भौतिकी

भाग 1

कक्षा 12 के लिए पाठ्यपुस्तक

© NCERT not to be republished



12091

राष्ट्रीय शैक्षिक अनुसंधान और प्रशिक्षण परिषद्
NATIONAL COUNCIL OF EDUCATIONAL RESEARCH AND TRAINING

2022-23

ISBN 81-7450-725-6

प्रथम संस्करण
अप्रैल 2007 चैत्र 1929

पुनर्मुद्रण
नवंबर 2007 कार्तिक 1929
फ़रवरी 2009 फाल्गुन 1930
जनवरी 2010 माघ 1931
जनवरी 2011 माघ 1932
जनवरी 2012 माघ 1933
दिसंबर 2012 अग्रहायण 1934
दिसंबर 2013 अग्रहायण 1935
जनवरी 2015 माघ 1936
दिसंबर 2015 पौष 1937
फ़रवरी 2017 माघ 1938
दिसंबर 2017 अग्रहायण 1939
फ़रवरी 2019 फाल्गुन 1940
जनवरी 2020 पौष 1941
जनवरी 2021 पौष 1942

PD 23T RPS

© राष्ट्रीय शैक्षिक अनुसंधान और प्रशिक्षण परिषद्, 2007

₹ ???.00

एन.सी.ई.आर.टी. वाटरमार्क 80 जी.एस.एम. पेपर पर मुद्रित।

प्रकाशन प्रभाग में सचिव, राष्ट्रीय शैक्षिक अनुसंधान और प्रशिक्षण परिषद्, श्री अरविंद मार्ग, नयी दिल्ली 110 016 द्वारा प्रकाशित तथा .....
..... द्वारा मुद्रित।

सर्वाधिकार सुरक्षित

- प्रकाशक की पूर्व अनुमति के बिना इस प्रकाशन के किसी भाग को छापना तथा इलेक्ट्रॉनिकी, मशीनी,फोटोप्रतिलिपि, रिकॉर्डिंग अथवा किसी अन्य विधि से पुनः प्रयोग पद्धति द्वारा उसका संग्रहण अथवा प्रसारण वर्जित है।
- इस पुस्तक की बिक्री इस शर्त के साथ की गई है कि प्रकाशक की पूर्व अनुमति के बिना यह पुस्तक अपने मूल आवरण अथवा जिल्द के अलावा किसी अन्य प्रकार से व्यापार द्वारा उधारी पर, पुनर्विक्रय या किराए पर न दी जाएगी, न बेची जाएगी।
- इस प्रकाशन का सही मूल्य इस पृष्ठ पर मुद्रित है। रबड़ की मुहर अथवा चिपकाई गई पर्ची (स्टिकर) या किसी अन्य विधि द्वारा अंकित कोई भी संशोधित मूल्य गलत है तथा मान्य नहीं होगा।

एन सी ई आर टी के प्रकाशन प्रभाग के कार्यालय

एन.सी.ई.आर.टी. कैंपस
श्री अरविंद मार्ग
नयी दिल्ली 110 016 फोन : 011-26562708

108, 100 फीट रोड
हेली एक्सटेंशन, होस्डेकेरे
बनाशंकरी III स्टेज
बेंगलुरु 560 085 फोन : 080-26725740

नवजीवन ट्रस्ट भवन
डाकघर नवजीवन
अहमदाबाद 380 014 फोन : 079-27541446

सी.डब्ल्यू.सी. कैंपस
निकट: धनकल बस स्टॉप पनिहटी
कोलकाता 700 114 फोन : 033-25530454

सी.डब्ल्यू.सी. कॉम्प्लैक्स
मालीगाँव
गुवाहाटी 781 021 फोन : 0361-2674869

प्रकाशन सहयोग

अध्यक्ष, प्रकाशन प्रभाग : *अनूप कुमार राजपूत*
मुख्य संपादक : *श्वेता उप्पल*
मुख्य उत्पादन अधिकारी : *अरुण चितकारा*
मुख्य व्यापार प्रबंधक (प्रभारी) : *विपिन दिवान*
संपादक : *नरेश यादव*
उत्पादन सहायक : *??*

आवरण एवं चित्रांकन

श्वेता राव

© NCERT not to be republished

आमुख

राष्ट्रीय पाठ्यचर्या की रूपरेखा (2005) सुझाती है कि बच्चों के स्कूली जीवन को बाहर के जीवन से जोड़ा जाना चाहिए। यह सिद्धांत किताबी ज्ञान की उस विरासत के विपरीत है जिसके प्रभाववश हमारी व्यवस्था आज तक स्कूल और घर के बीच अंतराल बनाए हुए है। नयी राष्ट्रीय पाठ्यचर्या पर आधारित पाठ्यक्रम और पाठ्यपुस्तकें इस बुनियादी विचार पर अमल करने का प्रयास हैं। इस प्रयास में हर विषय को एक मज़बूत दीवार से घेर देने और जानकारी को रटा देने की प्रवृत्ति का विरोध शामिल है। आशा है कि ये कदम हमें राष्ट्रीय शिक्षा नीति (1986) में वर्णित बाल-केंद्रित व्यवस्था की दिशा में काफ़ी दूर तक ले जाएँगे।

इस प्रयत्न की सफलता अब इस बात पर निर्भर है कि स्कूलों के प्राचार्य और अध्यापक बच्चों को कल्पनाशील गतिविधियों और सवालों की मदद से सीखने और सीखने के दौरान अपने अनुभवों पर विचार करने का कितना अवसर देते हैं। हमें यह मानना होगा कि यदि जगह, समय और आज़ादी दी जाए तो बच्चे बड़ों द्वारा सौंपी गई सूचना-सामग्री से जुड़कर और जूझकर नए ज्ञान का सृजन करते हैं। शिक्षा के विविध साधनों एवं स्रोतों की अनदेखी किए जाने का प्रमुख कारण पाठ्यपुस्तक को परीक्षा का एकमात्र आधार बनाने की प्रवृत्ति है। सर्जना और पहल को विकसित करने के लिए ज़रूरी है कि हम बच्चों को सीखने की प्रक्रिया में पूरा भागीदार मानें और बनाएँ, उन्हें ज्ञान की निर्धारित खुराक का ग्राहक मानना छोड़ दें।

ये उद्देश्य स्कूल की दैनिक ज़िंदगी और कार्यशैली में काफ़ी फेरबदल की माँग करते हैं। दैनिक समय-सारणी में लचीलापन उतना ही ज़रूरी है जितना वार्षिक कैलेंडर के अमल में चुस्ती, जिससे शिक्षण के लिए नियत दिनों की संख्या हकीकत बन सके। शिक्षण और मूल्यांकन की विधियाँ भी इस बात को तय करेंगी कि यह पाठ्यपुस्तक स्कूल में बच्चों के जीवन को मानसिक दबाव तथा बोरियत की जगह खुशी का अनुभव कराने में कितनी प्रभावी सिद्ध होती है। बोझ की समस्या से निपटने के लिए पाठ्यक्रम निर्माताओं ने विभिन्न चरणों में ज्ञान का पुनर्निर्धारण करते समय बच्चों के मनोविज्ञान एवं अध्यापन के लिए उपलब्ध समय का ध्यान रखने की पहले से अधिक सचेत कोशिश की है। इस कोशिश को और गहराने के यत्न में यह पाठ्यपुस्तक सोच-विचार और विस्मय, छोटे समूहों में बातचीत एवं बहस और हाथ से की जाने वाली गतिविधियों को प्राथमिकता देती है।

एन.सी.ई.आर.टी. इस पुस्तक की रचना के लिए बनाई गई पाठ्यपुस्तक निर्माण समिति के परिश्रम के लिए कृतज्ञता व्यक्त करती है। परिषद् विज्ञान एवं गणित पाठ्यपुस्तक सलाहकार समिति के अध्यक्ष, प्रोफ़ेसर जे.वी. नार्लीकर और इस पाठ्यपुस्तक के मुख्य सलाहकार, प्रोफ़ेसर ए.डब्ल्यू. जोशी, जिन्होंने इस समिति के कार्य को निर्देशित किया, की विशेष आभारी है। इस पाठ्यपुस्तक के विकास में कई शिक्षकों ने योगदान किया; इस योगदान को संभव बनाने के लिए हम उनके प्राचार्यों के आभारी हैं। हम उन सभी संस्थाओं और संगठनों के प्रति कृतज्ञ हैं जिन्होंने अपने संसाधनों, सामग्री तथा सहयोगियों की मदद लेने में हमें उदारतापूर्वक सहयोग दिया। प्रोफ़ेसर मृणाल मीरी और प्रोफ़ेसर जी. पी. देशपांडे की अध्यक्षता में मानव संसाधन विकास मंत्रालय के अधीन उच्च माध्यमिक शिक्षा विभाग द्वारा गठित निगरानी समिति (मॉनीटरिंग कमेटी) के सदस्यों के अमूल्य समय और सहयोग के लिए हम कृतज्ञ हैं। व्यवस्थागत सुधारों और अपने प्रकाशनों में निरंतर निखार लाने के प्रति समर्पित एन.सी.ई.आर.टी. टिप्पणियों एवं सुझावों का स्वागत करेगी, जिनसे भावी संशोधनों में मदद ली जा सके।

निदेशक

राष्ट्रीय शैक्षिक अनुसंधान और
प्रशिक्षण परिषद्

नयी दिल्ली
20 नवंबर 2006

© NCERT
not to be republished

प्रस्तावना

प्रस्तुत पुस्तक को विद्यार्थियों, शिक्षकों तथा जनमानस (जिसकी भूमिका अनदेखी नहीं की जा सकती) को सौंपते हुए मुझे हर्ष हो रहा है। 2006 में प्रकाशित कक्षा 12 की पाठ्यपुस्तक की यह स्वाभाविक अनुक्रम है। यह पुस्तक पूर्व प्रकाशित पाठ्यपुस्तक का एक सुव्यवस्थित रूप भी है। इस पुस्तक से *धारा के ऊष्मीय तथा रासायनिक प्रभाव* का अध्याय हटा दिया गया है। इस विषय को सी.बी.एस.ई. के पाठ्यक्रम से भी हटा दिया गया है। इसी प्रकार *संचार* के अध्याय से काफी विषय-वस्तु कम की गई है। इस अध्याय को आसानी से समझने योग्य रूप में पुनः लिखा गया है।

यद्यपि अधिकांश अन्य अध्याय पिछले संस्करणों पर ही आधारित हैं, फिर भी बहुत से भाग तथा अनुभाग पुनः लिखे गए हैं। देश के विभिन्न भागों के शिक्षकों से मिले अनेक सुझावों ने पाठ्यपुस्तक निर्माण समिति का मार्गदर्शन किया है।

कक्षा 11 तथा कक्षा 12 दोनों ही कक्षाओं की इन पुस्तकों के निर्माण में महत्त्व दिए जाने वाले बिंदुओं में मूल परिवर्तन किया गया है। दोनों ही पुस्तकों को विद्यार्थियों को बिना यह मानकर प्रेषित किया जा रहा है कि वे भौतिकी का अध्ययन उच्चतर माध्यमिक स्तर से आगे भी करेंगे। यह नया दृष्टिकोण राष्ट्रीय पाठ्यचर्या की रूपरेखा (2005) में दिए गए प्रेक्षणों एवं सुझावों के आधार पर प्रेरित है। इसी प्रकार, आज के शैक्षिक घटनाक्रम, जिसमें कोई विद्यार्थी विविध विषयों का कोई भी संयोजन/चयन कर सकता है, हम यह नहीं मान सकते कि भौतिकी का अध्ययन करने वाला विद्यार्थी गणित का अध्ययन भी कर रहा है। अतः भौतिकी की विषय वस्तु को 'एकला चलो' रूप में प्रस्तुत करना ही एक विकल्प है।

कक्षा 11 की पाठ्यपुस्तक की भाँति, कई अध्यायों में कुछ रोचक बॉक्स सामग्री भी सम्मिलित की गई है। ये पढ़ाने अथवा परीक्षा के लिए नहीं है। इन बॉक्सों को पाठ्यपुस्तक में सम्मिलित करने का उद्देश्य पाठकों के ध्यान को आकर्षित करना, विज्ञान एवं प्रौद्योगिकी के अन्य क्षेत्रों अथवा दैनिक जीवन में कुछ अनुप्रयोगों को दर्शाना, सरल प्रयोग सुझाना, भौतिकी के विभिन्न क्षेत्रों में अभिधारणाओं में संबंध, एकरसता अथवा नीरसता को तोड़कर पुस्तक को सजीव बनाना है।

पुस्तक के प्रत्येक अध्याय के अंत में सारांश, विचारणीय विषय, अभ्यास तथा अतिरिक्त अभ्यास एवं उदाहरण जैसे विशिष्ट लक्षणों को बनाए रखा गया है। संकल्पनाओं पर आधारित कई अभ्यासों को अध्यायों के अंत में दिए गए अभ्यासों से 'उदाहरण एवं उनके हल' के रूप में पाठ्य सामग्री में स्थानांतरित किया गया है। यह आशा की जाती है कि ऐसा करने से अध्याय में दी गई संकल्पनाएँ अधिक बोधगम्य बन जाएँगी। बहुत से नए उदाहरण तथा अभ्यास जोड़े गए हैं। उन विद्यार्थियों के लिए जो आगे भी भौतिकी का अध्ययन करना चाहते हैं, उनके लिए विचारणीय विषय तथा अतिरिक्त अभ्यास काफ़ी उपयोगी और विचारशील सिद्ध होंगे। *पुस्तक से बाहर के साधन* प्रदान करने तथा *ई-शिक्षा* को प्रोत्साहित करने की दृष्टि से प्रत्येक अध्याय में कुछ प्रासंगिक वेबसाइट के पते *ई-भौतिकी* शीर्षक के अंतर्गत प्रदान किए गए हैं। ये साइटें विद्यार्थियों को कुछ विशिष्ट विषयों पर अतिरिक्त सामग्री तथा अन्योन्य क्रियात्मक निदर्शन/प्रयोग प्रदान करती हैं।

भौतिकी की जटिल संकल्पनाओं की समझ, व्यापक बोध तथा महत्त्व जानना आवश्यक है। विद्यार्थियों को इस प्रकार के प्रश्न पूछना/सीखना चाहिए कि 'हम इसे क्यों तथा कैसे जानें' आदि। व्यापक रूप से वह यह पाएँगे कि भौतिकी तथा विज्ञान के क्षेत्र में लगभग सदैव ही 'क्यों' के प्रश्न का उत्तर नहीं पाया जाता। परंतु यह स्वयं में एक सीखने का अनुभव है, क्या आप ऐसा नहीं समझते! इसके विपरीत, 'कैसे' वाले प्रश्नों के अधिकांश प्राकृतिक परिघटनाओं के प्रकरण में भौतिक विज्ञानियों ने तर्कसंगत व सुविवेचित उत्तर दिए हैं। वास्तव में, यह समझने के पश्चात कि घटनाएँ कैसे होती हैं, बहुत सी परिघटनाओं का उपयोग करके मानव के उपयोग के प्रौद्योगिकीय अनुप्रयोग विकसित करना संभव हो पाया है।

उदाहरण के लिए, पुस्तक के किसी प्रकथन पर विचार कीजिए, जैसे 'ऋणावेशित इलेक्ट्रॉन धनावेशित पट्टिका द्वारा आकर्षित होता है' अथवा 'इस प्रयोग में प्रकाश (अथवा इलेक्ट्रॉन) तरंग की भाँति व्यवहार करता है।' आप यह अनुभव करेंगे कि इसके 'क्यों' का उत्तर देना संभव नहीं है। यह प्रश्न 'दर्शनशास्त्र' अथवा 'तत्वमीमांसा' के क्षेत्र के अंतर्गत आता है। परंतु हम 'कैसे' का उत्तर दे सकते हैं, हम आरोपित बल ज्ञात कर सकते हैं, हम फोटॉन (अथवा इलेक्ट्रान) की तरंगदैर्घ्य

© NCERT not to be republished

माप सकते हैं, हम यह निर्धारित कर सकते हैं कि विभिन्न परिस्थितियों में वस्तुएँ कैसे व्यवहार करती हैं तथा इन परिघटनाओं का उपयोग हम अपने लाभ के लिए उपकरण विकसित करने में कर सकते हैं।

समिति के सदस्यों के साथ उच्चतर माध्यमिक स्तर की इन पुस्तकों के लिए कार्य करने में मुझे प्रसन्नता हुई है। पुस्तक निर्माण समिति, पुनरीक्षण समिति तथा संपादन मंडल में कॉलेज तथा विश्वविद्यालयों के शिक्षक, भारतीय प्रौद्योगिकी संस्थानों के शिक्षक, राष्ट्रीय संस्थानों एवं प्रयोगशालाओं के वैज्ञानिकों के उच्चतर माध्यमिक, साथ-साथ विद्यालयों के शिक्षक सम्मिलित किए गए थे। विभिन्न समितियों में उच्चतर माध्यमिक विद्यालयों के शिक्षकों से प्राप्त सुझावों एवं विवेचनात्मक आलोचना अत्यंत प्रशंसनीय पाए गए। अधिकांश बॉक्स सामग्री किसी न किसी समिति के सदस्य द्वारा विकसित की गई है, परंतु उनमें से तीन मित्रों एवं हितैषियों द्वारा जो इन समितियों के सदस्य नहीं हैं, विकसित की गई हैं। हम अध्याय 3, 4 (भाग 1) तथा अध्याय 9 (भाग 2) की बॉक्स सामग्री का उपयोग करने की अनुमति देने के लिए क्रमशः पुणे के डॉ. पी.एन. सेन, दिल्ली की प्रोफ़ेसर रूपमंजरी घोष तथा मुंबई के डॉ. राजेश वी. खापर्डे का आभार प्रकट करते हैं। हम पुनरीक्षण कार्यशाला तथा संपादन कार्यशाला के प्रतिभागियों के प्रति भी आभार प्रकट करते हैं, जिन्होंने पाठ्यपुस्तक की प्रथम पांडुलिपि पर चर्चा करके परिष्कृत किया। हम प्रोफ़ेसर कृष्ण कुमार, निदेशक एन.सी.ई.आर.टी. के प्रति भी आभार प्रकट करते हैं जिन्होंने विज्ञान शिक्षा में सुधार के राष्ट्रीय प्रयास के एक भाग के रूप में इस पुस्तक को प्रस्तुत करने का कार्यभार हमें सौंपा। मैं एन.सी.ई.आर.टी. के संयुक्त निदेशक प्रोफ़ेसर जी. रवीन्द्रा का भी समय-समय पर सहायता देने के लिए धन्यवाद करता हूँ। प्रोफ़ेसर हुकुम सिंह, अध्यक्ष, विज्ञान एवं गणित शिक्षा विभाग, एन.सी.ई.आर.टी. भी हमारे इस कार्य में हर संभव सहायता के लिए इच्छुक रहे हैं।

हम अपने सम्मानित प्रयोक्ताओं, विशेषकर विद्यार्थियों एवं शिक्षकों से प्राप्त समीक्षा एवं सुझावों का आदर करते हैं। हम अपने युवा पाठकों की भौतिकी के रोमांचक कार्य क्षेत्र की ओर अग्रसर होने की कामना करते हैं।

ए.डब्ल्यू. जोशी
मुख्य सलाहकार
पाठ्यपुस्तक निर्माण समिति

© NCERT not to be republished

पाठ्यपुस्तक निर्माण समिति

अध्यक्ष, विज्ञान और गणित पाठ्यपुस्तकों की सलाहकार समिति

जे.वी. नार्लीकर, *इमेरिटस प्रोफ़ेसर*, अंतर-विश्वविद्यालय केंद्र– खगोलविज्ञान और खगोलभौतिकी (आई.यू.सी.ए.ए.), गणेशखिंड, पूना विश्वविद्यालय परिसर, पुणे

मुख्य सलाहकार

ए.डब्ल्यू. जोशी, *हॉनरेरी विजिटिंग साइंटिस्ट*, एन.सी.आर.ए., पूना विश्वविद्यालय परिसर, पुणे
(*भूतपूर्व प्रोफ़ेसर*, भौतिकी विभाग, पूना विश्वविद्यालय)

सदस्य

अंजली क्षीरसागर, *रीडर*, भौतिकी विभाग, पूना विश्वविद्यालय, पुणे
अतुल मोदी, *प्रवक्ता (एस.जी.)*, वी.ई.एस. कला, विज्ञान एवं वाणिज्य महाविद्यालय, मुंबई
अनुराधा माथुर, *पी.जी.टी.*, मॉडर्न स्कूल, बसंत विहार, नयी दिल्ली
अलिका खरे, *प्रोफ़ेसर*, भौतिकी विभाग, भारतीय प्रौद्योगिकी संस्थान, गुवाहाटी
आर. जोशी, *प्रवक्ता (एस.जी.)*, डी.ई.एस.एम., एन.सी.ई.आर.टी., नयी दिल्ली
ए.के. घटक, *इमेरिटस प्रोफ़ेसर*, भौतिकी विभाग, भारतीय प्रौद्योगिकी संस्थान, नयी दिल्ली
एच.सी. प्रधान, *प्रोफ़ेसर*, होमी भाभा विज्ञान शिक्षा केंद्र, (टी.आई.एफ.आर.), मुंबई
एन. पंचपकेशन, *प्रोफ़ेसर (अवकाशप्राप्त)*, भौतिकी एवं खगोलभौतिकी विभाग, दिल्ली विश्वविद्यालय, दिल्ली
एस.एन. प्रभाकर, *पी.जी.टी.*, डी.एम. स्कूल, क्षेत्रीय शिक्षा संस्थान, एन.सी.ई.आर.टी., मैसूर
एस.के. उपाध्याय, *पी.जी.टी.*, जवाहर नवोदय विद्यालय, मुज़फ़्फ़रनगर
एस.के. दाश, *रीडर*, डी.ई.एस.एम., एन.सी.ई.आर.टी., नयी दिल्ली
एस. राय चौधरी, *प्रोफ़ेसर*, भौतिकी एवं खगोलभौतिकी विज्ञान, दिल्ली विश्वविद्यालय, दिल्ली
चित्रा गोयल, *पी.जी.टी.*, राजकीय प्रतिभा विकास विद्यालय, त्यागराज नगर, नयी दिल्ली
बी.के. शर्मा, *प्रोफ़ेसर*, डी.ई.एस.एम., एन.सी.ई.आर.टी., नयी दिल्ली
विश्वजीत कुलकर्णी, *टीचर (ग्रेड I)*, उच्चतर माध्यमिक अनुभाग, श्रीमती पार्वतीबाई चोगुले महाविद्यालय, मारगो, गोवा
वी.एच. रायबागकर, *रीडर*, नौरोसजी वाडिया महाविद्यालय, पुणे

सदस्य-समन्वयक (अंग्रेज़ी संस्करण)

वी.पी. श्रीवास्तव, *रीडर*, डी.ई.एस.एम., एन.सी.ई.आर.टी., नयी दिल्ली

हिंदी अनुवादक

आर.एस. दास, *अवकाशप्राप्त उपप्रधानाचार्य*, बलवंत राय मेहता विद्याभवन सीनियर सेकंडरी स्कूल, नयी दिल्ली
कन्हैया लाल, *अवकाशप्राप्त प्राचार्य*, शिक्षा निदेशालय, राष्ट्रीय राजधानी क्षेत्र, दिल्ली
जे.पी. अग्रवाल, *अवकाशप्राप्त प्राचार्य*, शिक्षा निदेशालय, राष्ट्रीय राजधानी क्षेत्र, दिल्ली
शशि प्रभा, *प्रवक्ता*, डी.ई.एस.एम., एन.सी.ई.आर.टी., नयी दिल्ली

सदस्य-समन्वयक

गगन गुप्त, *रीडर*, डी.ई.एस.एम., एन.सी.ई.आर.टी., नयी दिल्ली

© NCERT not to be republished

भारत का संविधान

भाग 4क

नागरिकों के मूल कर्तव्य

अनुच्छेद 51 क

मूल कर्तव्य – भारत के प्रत्येक नागरिक का यह कर्तव्य होगा कि वह –

(क) संविधान का पालन करे और उसके आदर्शों, संस्थाओं, राष्ट्रध्वज और राष्ट्रगान का आदर करे;

(ख) स्वतंत्रता के लिए हमारे राष्ट्रीय आंदोलन को प्रेरित करने वाले उच्च आदर्शों को हृदय में संजोए रखे और उनका पालन करे;

(ग) भारत की संप्रभुता, एकता और अखंडता की रक्षा करे और उसे अक्षुण्ण बनाए रखे;

(घ) देश की रक्षा करे और आह्वान किए जाने पर राष्ट्र की सेवा करे;

(ङ) भारत के सभी लोगों में समरसता और समान भ्रातृत्व की भावना का निर्माण करे जो धर्म, भाषा और प्रदेश या वर्ग पर आधारित सभी भेदभावों से परे हो, ऐसी प्रथाओं का त्याग करे जो महिलाओं के सम्मान के विरुद्ध हों;

(च) हमारी सामासिक संस्कृति की गौरवशाली परंपरा का महत्त्व समझे और उसका परिरक्षण करे;

(छ) प्राकृतिक पर्यावरण की, जिसके अंतर्गत वन, झील, नदी और वन्य जीव हैं, रक्षा करे और उसका संवर्धन करे तथा प्राणिमात्र के प्रति दयाभाव रखे;

(ज) वैज्ञानिक दृष्टिकोण, मानववाद और ज्ञानार्जन तथा सुधार की भावना का विकास करे;

(झ) सार्वजनिक संपत्ति को सुरक्षित रखे और हिंसा से दूर रहे;

(ञ) व्यक्तिगत और सामूहिक गतिविधियों के सभी क्षेत्रों में उत्कर्ष की ओर बढ़ने का सतत् प्रयास करे, जिससे राष्ट्र निरंतर बढ़ते हुए प्रयत्न और उपलब्धि की नई ऊँचाइयों को छू सके; और

(ट) यदि माता-पिता या संरक्षक है, छह वर्ष से चौदह वर्ष तक की आयु वाले अपने, यथास्थिति, बालक या प्रतिपाल्य को शिक्षा के अवसर प्रदान करे।

© NCERT not to be republished

आभार

इस पुस्तक को अंतिम स्वरूप प्रदान करने के लिए आयोजित कार्यशाला में भाग लेने वाले निम्नलिखित प्रतिभागियों की बहुमूल्य टिप्पणियों के लिए परिषद् निम्नलिखित का आभार व्यक्त करती है : आर.ए. गोयल, *अवकाशप्राप्त प्राचार्य*, शिक्षा निदेशालय, दिल्ली; एन.सी. जैन, *पी.जी.टी.*, एस.ए.सी.जी. सर्वोदय विद्यालय नं. 2, लुडलो कैसल, नयी दिल्ली; के.सी. शर्मा, *प्रवाचक*, क्षेत्रीय शिक्षा संस्थान (एन.सी.ई.आर.टी.), अजमेर; नीलम सहगल, *पी.जी.टी.*, केंद्रीय विद्यालय, जे.एन.यू. परिसर, नयी दिल्ली; डी.सी. पांडेय, *अवकाशप्राप्त शिक्षा अधिकारी*, शिक्षा निदेशालय, दिल्ली; पी.एन. वार्ष्णेय, *अवकाशप्राप्त प्राचार्य*, शिक्षा निदेशालय, दिल्ली।

परिषद् सन 2017 में पाठ्य के पुनरीक्षण और परिष्करण में अमूल्य योगदान के लिए ए.के. श्रीवास्तव, डी.ई.एस.एम., एन.सी.ई.आर.टी., नई दिल्ली; अरनब सेन, एन.ई.आर.आइ.ई., शिलांग; एल.एस. चौहान, आर.आइ.ई., भोपाल; ओ.एन. अवस्थी (रिटायर्ड), आर.आइ.ई., भोपाल; रचना गर्ग, डी.ई.एस.एम., एन.सी.ई.आर.टी., नई दिल्ली; रामन नंबूदरी, आर.आइ.ई., मैसुरू; आर.आर. कोइरेंग, डी.सी.एस., एन.सी.ई.आर.टी., नई दिल्ली; शशि प्रभा, डी.ई.एस.एम., एन.सी.ई.आर.टी., नई दिल्ली; और एस.वी. शर्मा, आर.आइ.ई., अजमेर का भी आभार व्यक्त करती है।

शैक्षिक व प्रशासनिक सहयोग के लिए परिषद् हुकुम सिंह, *प्रोफ़ेसर* तथा *विभागाध्यक्ष*, डी.ई.एस.एम., एन.सी.ई.आर.टी., नयी दिल्ली की आभारी है।

परिषद् ए.पी.सी. कार्यालय तथा डी.ई.एस.एम. के प्रशासनिक स्टॉफ को उनके सहयोग के लिए आभार प्रकट करती है। इस पुस्तक में सहयोग के लिए परिषद् मुसर्रत परवीन, मनोज मोहन *कॉपी एडीटर*; रणधीर ठाकुर *प्रूफ़ रीडर*; ऋतु शर्मा, इन्द्र कुमार *डीटीपी ऑपरेटर*; दीपक कपूर *कंप्यूटर स्टेशन प्रभारी*, डी.ई.एस.एम., विजय कंप्यूटर्स (पुस्तक की टाइपिंग के लिए) और प्रकाशन विभाग का हार्दिक आभार ज्ञापित करती है।

© NCERT not to be republished

भारत का संविधान

भाग-3 (अनुच्छेद 12-35)
(अनिवार्य शर्तों, कुछ अपवादों और युक्तियुक्त निर्बंधन के अधीन)
द्वारा प्रदत्त

मूल अधिकार

समता का अधिकार

- विधि के समक्ष एवं विधियों के समान संरक्षण;
- धर्म, मूलवंश, जाति, लिंग या जन्मस्थान के आधार पर;
- लोक नियोजन के विषय में;
- अस्पृश्यता और उपाधियों का अंत।

स्वातंत्र्य-अधिकार

- अभिव्यक्ति, सम्मेलन, संघ, संचरण, निवास और वृत्ति का स्वातंत्र्य;
- अपराधों के लिए दोष सिद्धि के संबंध में संरक्षण;
- प्राण और दैहिक स्वतंत्रता का संरक्षण;
- छः से चौदह वर्ष की आयु के बच्चों को निःशुल्क एवं अनिवार्य शिक्षा;
- कुछ दशाओं में गिरफ्तारी और निरोध से संरक्षण।

शोषण के विरुद्ध अधिकार

- मानव के दुर्व्यापार और बलात श्रम का प्रतिषेध;
- परिसंकटमय कार्यों में बालकों के नियोजन का प्रतिषेध।

धर्म की स्वतंत्रता का अधिकार

- अंतःकरण की और धर्म के अबाध रूप से मानने, आचरण और प्रचार की स्वतंत्रता;
- धार्मिक कार्यों के प्रबंध की स्वतंत्रता;
- किसी विशिष्ट धर्म की अभिवृद्धि के लिए करों के संदाय के संबंध में स्वतंत्रता;
- राज्य निधि से पूर्णतः पोषित शिक्षा संस्थाओं में धार्मिक शिक्षा या धार्मिक उपासना में उपस्थित होने के संबंध में स्वतंत्रता।

संस्कृति और शिक्षा संबंधी अधिकार

- अल्पसंख्यक-वर्गों को अपनी भाषा, लिपि या संस्कृति विषयक हितों का संरक्षण;
- अल्पसंख्यक-वर्गों द्वारा अपनी शिक्षा संस्थाओं का स्थापन और प्रशासन।

सांविधानिक उपचारों का अधिकार

- उच्चतम न्यायालय एवं उच्च न्यायालय के निर्देश या आदेश या रिट द्वारा प्रदत्त अधिकारों को प्रवर्तित कराने का उपचार।

© NCERT not to be republished

विषय-सूची

आमुख *iii*

प्रस्तावना *v*

अध्याय 1

वैद्युत आवेश तथा क्षेत्र

1.1 भूमिका 1
1.2 वैद्युत आवेश 1
1.3 चालक तथा विद्युतरोधी 5
1.4 प्रेरण द्वारा आवेशन 6
1.5 वैद्युत आवेश के मूल गुण 8
1.6 कूलॉम नियम 10
1.7 बहुल आवेशों के बीच बल 15
1.8 विद्युत क्षेत्र 18
1.9 विद्युत क्षेत्र रेखाएँ 23
1.10 वैद्युत फ्लक्स 25
1.11 वैद्युत द्विध्रुव 27
1.12 एकसमान बाह्य क्षेत्र में द्विध्रुव 31
1.13 संतत आवेश वितरण 32
1.14 गाउस नियम 33
1.15 गाउस नियम के अनुप्रयोग 37

अध्याय 2

स्थिरवैद्युत विभव तथा धारिता

2.1 भूमिका 51
2.2 स्थिरवैद्युत विभव 53
2.3 बिंदु आवेश के कारण विभव 54
2.4 वैद्युत द्विध्रुव के कारण विभव 55
2.5 आवेशों के निकाय के कारण विभव 57
2.6 समविभव पृष्ठ 60
2.7 आवेशों के निकाय की स्थितिज ऊर्जा 61
2.8 बाह्य क्षेत्र में स्थितिज ऊर्जा 64
2.9 चालक–स्थिरवैद्युतिकी 67
2.10 परावैद्युत तथा ध्रुवण 71
2.11 संधारित्र तथा धारिता 73
2.12 समांतर पट्टिका संधारित्र 74
2.13 धारिता पर परावैद्युत का प्रभाव 75

© NCERT not to be republished

2.14 संधारित्रों का संयोजन 78
2.15 संधारित्र में संचित ऊर्जा 80
2.16 वान डे ग्राफ जनित्र 83

अध्याय 3
विद्युत धारा

3.1 भूमिका 93
3.2 विद्युत धारा 93
3.3 चालक में विद्युत धारा 94
3.4 ओम का नियम 95
3.5 इलेक्ट्रान का अपवाह एवं प्रतिरोधकता का उद्गम 97
3.6 ओम के नियम की सीमाएँ 101
3.7 विभिन्न पदार्थों की प्रतिरोधकता 101
3.8 प्रतिरोधकता की ताप पर निर्भरता 103
3.9 विद्युत ऊर्जा, शक्ति 105
3.10 प्रतिरोधकों का संयोजन–श्रेणी संयोजन तथा पार्श्व संयोजन 107
3.11 सेल, विद्युत वाहक बल (emf), आंतरिक प्रतिरोध 110
3.12 श्रेणी तथा पार्श्वक्रम में सेल 113
3.13 किरखोफ के नियम 115
3.14 व्हीटस्टोन सेतु 118
3.15 मीटर सेतु 120
3.16 पोटेंशियोमीटर (विभवमापी) 122

अध्याय 4
गतिमान आवेश और चुंबकत्व

4.1 भूमिका 132
4.2 चुंबकीय बल 133
4.3 चुंबकीय क्षेत्र में गति 137
4.4 संयुक्त विद्युत तथा चुंबकीय क्षेत्रों में गति 140
4.5 विद्युत धारा अवयव के कारण चुंबकीय क्षेत्र, बायो-सावर्ट नियम 143
4.6 विद्युत धारावाही वृत्ताकार पाश के अक्ष पर चुंबकीय क्षेत्र 145
4.7 ऐम्पियर का परिपथीय नियम 147
4.8 परिनालिका तथा टोरॉइड 150
4.9 दो समांतर विद्युत धाराओं के बीच बल–ऐम्पियर 154
4.10 विद्युत धारा पाश पर बल आघूर्ण, चुंबकीय द्विध्रुव 157
4.11 चल कुंडली गैल्वेनोमीटर 163

अध्याय 5
चुंबकत्व एवं द्रव्य

5.1 भूमिका 173
5.2 छड़ चुंबक 174

© NCERT not to be republished

5.3 चुंबकत्व एवं गाउस नियम 181
5.4 भू-चुंबकत्व 185
5.5 चुंबकीकरण एवं चुंबकीय तीव्रता 189
5.6 पदार्थों के चुंबकीय गुण 191
5.7 स्थायी चुंबक एवं विद्युत चुंबक 195

अध्याय 6
वैद्युतचुंबकीय प्रेरण

6.1 भूमिका 204
6.2 फैराडे एवं हेनरी के प्रयोग 205
6.3 चुंबकीय फ्लक्स 206
6.4 फैराडे का प्रेरण का नियम 207
6.5 लेंज का नियम तथा ऊर्जा संरक्षण 210
6.6 गतिक विद्युत वाहक बल 212
6.7 ऊर्जा दृष्टि : एक परिमाणात्मक अध्ययन 215
6.8 भँवर धाराएँ 218
6.9 प्रेरकत्व 219
6.10 प्रत्यावर्ती धारा जनित्र 224

अध्याय 7
प्रत्यावर्ती धारा

7.1 भूमिका 233
7.2 प्रतिरोधक पर प्रयुक्त ac वोल्टता 234
7.3 ac धारा एवं वोल्टता का घूर्णी सदिश द्वारा निरूपण–कलासमंजक (फेजर्स) 237
7.4 प्रेरक पर प्रयुक्त ac वोल्टता 237
7.5 संधारित्र पर प्रयुक्त ac वोल्टता 241
7.6 श्रेणीबद्ध LCR परिपथ पर प्रयुक्त ac वोल्टता 244
7.7 ac परिपथों में शक्ति : शक्ति गुणांक 252
7.8 LC दोलन 255
7.9 ट्रांसफॉर्मर 259

अध्याय 8
वैद्युतचुंबकीय तरंगें

8.1 भूमिका 269
8.2 विस्थापन धारा 270
8.3 वैद्युतचुंबकीय तरंगें 274
8.4 वैद्युतचुंबकीय स्पेक्ट्रम 280

उत्तर 288
पारिभाषिक शब्दावली 308

© NCERT not to be republished

मुखावरण

(http://nobelprize.org तथा 2006 में भौतिकी के नोबेल पुरस्कार से रूपांतरित)

विश्व के विकास के विभिन्न चरण

पश्चावरण

(http://www.iter.org तथा
http://www.dae.gov.in से रूपांतरित)

अंतर्राष्ट्रीय तापनाभिकीय प्रायोगिक रिएक्टर (ITER) युक्ति का व्यवच्छेदित दृश्य। आधार पर खड़ा व्यक्ति स्केल दर्शा रहा है।

ITER एक संयुक्त अंतर्राष्ट्रीय अनुसंधान एवं विकास परियोजना है जिसका उद्देश्य संलयन शक्ति की वैज्ञानिक एवं तकनीकी संभाव्यता का निदर्शन करना है।

भारत इस परियोजना के सात पूर्ण भागीदारी राष्ट्रों में से एक है। अन्य भागीदार यूरोपीय संघ (EURATOM द्वारा निरूपित), जापान, चीन गणराज्य, कोरिया गणराज्य, रूस फेडेरेशन तथा संयुक्त राज्य अमेरिका हैं। ITER का निर्माण यूरोप में फ्रांस के दक्षिण में कैडारके में किया जाएगा तथा इससे 500 MW की संलयन शक्ति उत्पन्न होगी।

सूर्य तथा तारों की ऊर्जा का स्रोत नाभिकीय संलयन है। पृथ्वी पर संलयन-अनुसंधान का उद्देश्य यह निदर्शित करना है कि इस ऊर्जा स्रोत का उपयोग पर्यावरण हितैषी तथा सुरक्षात्मक रूप से विद्युत उत्पन्न करने में किया जा सकता है तथा संसार की बढ़ती जनसंख्या की आवश्यकताओं की पूर्ति के लिए इसके प्रचुर ईंधन भंडार (संपदा) उपलब्ध हैं।

भारत की भूमिका को विस्तार से जानने के लिए परमाणु ऊर्जा विभाग (DAE) की उपरिलिखित वेबसाइट में उपलब्ध *Nuclear India*, Vol. 39, No. 11-12, May-June 2006 का संस्करण देखिए।

© NCERT not to be republished

12091CH01

अध्याय 1

वैद्युत आवेश तथा क्षेत्र

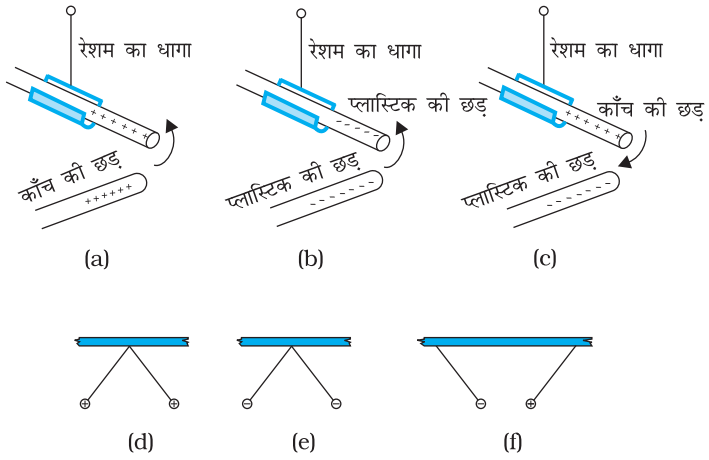
© NCERT not to be republished

1.1 भूमिका

हम सभी को, विशेषकर शुष्क मौसम में, स्वेटर अथवा संश्लिष्ट वस्त्रों को शरीर से उतारते समय चट-चट की ध्वनि सुनने अथवा चिनगारियाँ देखने का अनुभव होगा। महिलाओं के वस्त्रों जैसे पॉलिएस्टर साड़ी के साथ तो ऐसी घटना होना प्रायः अनिवार्य होता है। क्या आपने कभी इस परिघटना का स्पष्टीकरण खोजने का प्रयास किया है? विद्युत विसर्जन का एक अन्य सामान्य उदाहरण आकाश में गर्जन के समय तड़ित दिखाई देना है। विद्युत झटके के संवेदन का अनुभव हमें उस समय भी होता है जब हम किसी कार का दरवाज़ा खोलते हैं अथवा जब हम अपनी बस की सीट पर खिसकने के पश्चात उसमें लगी लोहे की छड़ को पकड़ते हैं। इन अनुभवों के होने के कारण हमारे शरीर में से होकर उन वैद्युत आवेशों का विसर्जित होना है जो विद्युतरोधी पृष्ठों पर रगड़ के कारण एकत्र हो जाते हैं। आपने यह भी सुना होगा कि यह वैद्युत आवेश (स्थिरवैद्युत) के उत्पन्न होने के कारण है। इस अध्याय तथा अगले अध्याय में भी हम इसी विषय पर चर्चा करेंगे। स्थिर से तात्पर्य है वह सब कुछ जो समय के साथ परिवर्तित अथवा गतिमय नहीं होता। *स्थिरवैद्युतिकी के अंतर्गत हम स्थिर आवेशों द्वारा उत्पन्न बलों, क्षेत्रों तथा विभवों के विषय में अध्ययन करते हैं।*

1.2 वैद्युत आवेश

इतिहास के अनुसार लगभग 600 ई. पूर्व हुई इस तथ्य की खोज का श्रेय, कि ऊन अथवा रेशमी-वस्त्र से रगड़ा गया ऐम्बर हलकी वस्तुओं को आकर्षित करता है, ग्रीस देश के मिलेटस के निवासी थेल्स को जाता है। 'इलेक्ट्रिसिटी' शब्द भी ग्रीस की भाषा के शब्द *इलेक्ट्रॉन* से व्युत्पन्न हुआ है जिसका अर्थ *ऐम्बर* है। उस समय पदार्थों के ऐसे बहुत से युगल ज्ञात थे जो परस्पर रगड़े



चित्र 1.1 छड़ें तथा सरकंडे की गोलियाँ: सजातीय आवेश एक-दूसरे को प्रतिकर्षित तथा विजातीय आवेश एक-दूसरे को आकर्षित करते हैं।

जाने पर भूसे के तिनकों, सरकंडे की गोलियों, कागज़ के छोटे टुकड़ों आदि हलकी वस्तुओं को आकर्षित कर लेते थे। आप इस प्रकार के प्रभाव का अनुभव अपने घर पर निम्नलिखित क्रियाकलाप द्वारा कर सकते हैं। सफ़ेद कागज़ की लंबी पतली पट्टियाँ काटकर उन पर धीरे से इस्तरी कीजिए। इन पट्टियों को टेलीविज़न के पर्दे अथवा कंप्यूटर के मॉनिटर के निकट लाइए। आप देखेंगे कि पट्टियाँ पर्दे की ओर आकर्षित हो जाती हैं। वास्तव में वे कुछ क्षण तक पर्दे से चिपकी रहती हैं।

यह भी प्रेक्षित किया गया कि यदि ऊन अथवा रेशम के कपड़े से रगड़ी हुई दो काँच की छड़ों को एक-दूसरे के निकट लाएँ तो वे एक-दूसरे को प्रतिकर्षित करती हैं [चित्र 1.1(a)]। ऊन की वे लड़ियाँ अथवा रेशम के कपड़े के वे टुकड़े जिनसे इन छड़ों को रगड़ा गया था, वे भी परस्पर एक-दूसरे को प्रतिकर्षित करते हैं परंतु काँच की छड़ तथा ऊन एक-दूसरे को आकर्षित करते हैं। इसी प्रकार, बिल्ली की समूर से रगड़ी हुई दो प्लास्टिक की छड़ें एक-दूसरे को प्रतिकर्षित करती हैं [चित्र 1.1(b)] परंतु समूर को आकर्षित करती हैं। इसके विपरीत, प्लास्टिक की छड़ें काँच की छड़ों को आकर्षित करती हैं [चित्र 1.1(c)] तथा सिल्क अथवा ऊन जिससे काँच की छड़ों को रगड़ा गया था, को प्रतिकर्षित करती हैं। काँच की छड़ समूर को प्रतिकर्षित करती है।

यदि समूर से रगड़ी हुई किसी प्लास्टिक की छड़ को रेशम अथवा नायलॉन के धागों से लटकी हुई दो छोटी सरकंडे की गोलियों (आजकल हम पॉलिएस्टरीन की गोलियाँ भी उपयोग कर सकते हैं) से स्पर्श करा दें, तो ये गोलियाँ एक-दूसरे को प्रतिकर्षित करती हैं [चित्र 1.1(d)] तथा स्वयं छड़ से भी प्रतिकर्षित होती हैं। यही प्रभाव उस समय भी दिखाई देता है जब सरकंडे की गोलियों को रेशम से रगड़ी काँच की छड़ से स्पर्श कराते हैं [चित्र 1.1(e)]। यह एक नाटकीय प्रेक्षण है कि काँच की छड़ से स्पर्श की हुई सरकंडे की गोली दूसरी प्लास्टिक छड़ से स्पर्श की गई सरकंडे की गोली को आकर्षित करती है [चित्र 1.1(f)]।

वर्षों के प्रयास तथा सावधानीपूर्वक किए गए प्रयोगों एवं उनके विश्लेषणों द्वारा सरल प्रतीत होने वाले ये तथ्य स्थापित हो पाए हैं। विभिन्न वैज्ञानिकों द्वारा किए गए बहुत से सावधानीपूर्ण अध्ययनों के पश्चात यह निष्कर्ष निकाला गया है कि एक राशि होती है, जिसे वैद्युत आवेश कहते हैं और यह केवल दो प्रकार के ही हो सकते हैं। वैद्युत आवेश कहलाने वाली राशि के केवल दो प्रकार ही होते हैं। हम कहते हैं कि प्लास्टिक एवं काँच की छड़, रेशम, समूर, सरकंडे की गोलियाँ आदि पिंड विद्युन्मय हो गए हैं। रगड़ने पर ये वैद्युत आवेश अर्जित कर लेते हैं। सरकंडे की गोलियों पर किए गए ये प्रयोग यह सुझाते हैं कि आवेश दो प्रकार के होते हैं तथा हम यह पाते हैं कि (i) *सजातीय आवेश* एक-दूसरे को प्रतिकर्षित तथा (ii) *विजातीय आवेश* एक-दूसरे को आकर्षित करते हैं। ये प्रयोग यह भी प्रदर्शित करते हैं कि स्पर्श करने पर, आवेश छड़ से सरकंडे की गोली में स्थानांतरित हो जाते हैं। यह कहा जाता है कि सरकंडे की गोलियाँ स्पर्श द्वारा विद्युन्मय अथवा आवेशित (आविष्ट) होती हैं। वह गुण जो दो प्रकार के आवेशों में भेद करता है, *आवेश की ध्रुवता* कहलाता है।

जब काँच की छड़ को रेशम से रगड़ते हैं तो छड़ एक प्रकार का आवेश अर्जित करती है तथा रेशम दूसरे प्रकार का आवेश अर्जित करता है। यह उन सभी वस्तुओं के युगल के लिए सत्य है जो विद्युन्मय होने के लिए परस्पर रगड़े जाते हैं। अब यदि विद्युन्मय काँच की छड़ को उस रेशम के संपर्क में लाते हैं जिससे उसे रगड़ा गया था, तो वे अब एक-दूसरे को आकर्षित नहीं करते। ये अब अन्य हलकी वस्तुओं को भी आकर्षित अथवा प्रतिकर्षित नहीं करते जैसा कि ये विद्युन्मय होने पर कर रहे थे।

© NCERT not to be republished

इस प्रकार, रगड़ने के पश्चात वस्तुओं द्वारा अर्जित आवेश आवेशित वस्तुओं को एक-दूसरे के संपर्क में लाने पर लुप्त हो जाता है। इन प्रेक्षणों से आप क्या निष्कर्ष निकाल सकते हैं? यह तो केवल इतना बताता है कि वस्तुओं द्वारा अर्जित विजातीय आवेश एक-दूसरे के प्रभाव को निष्फल कर देते हैं। इसीलिए अमेरिकी वैज्ञानिक बेंजामिन फ्रेंकलिन ने आवेशों को धनात्मक तथा ऋणात्मक कहा। हम जानते हैं कि जब हम किसी धनात्मक संख्या को उसी परिमाण की ऋणात्मक संख्या से जोड़ते हैं तो योगफल शून्य होता है। आवेशों को धनात्मक तथा ऋणात्मक नाम देने के पीछे भी यही तर्क रहा होगा। परिपाटी के अनुसार काँच की छड़ अथवा बिल्ली के समूर पर आवेश धनात्मक कहलाता है तथा प्लास्टिक-छड़ अथवा रेशम पर आवेश ऋणात्मक कहलाता है। जब किसी वस्तु पर कोई आवेश होता है तो वह वस्तु *विद्युन्मय* अथवा *आवेशित* (आविष्ट) कही जाती है। जब उस पर कोई आवेश नहीं होता तब उसे *अनावेशित* कहते हैं।

विद्युत तथा चुंबकत्व का एकीकरण

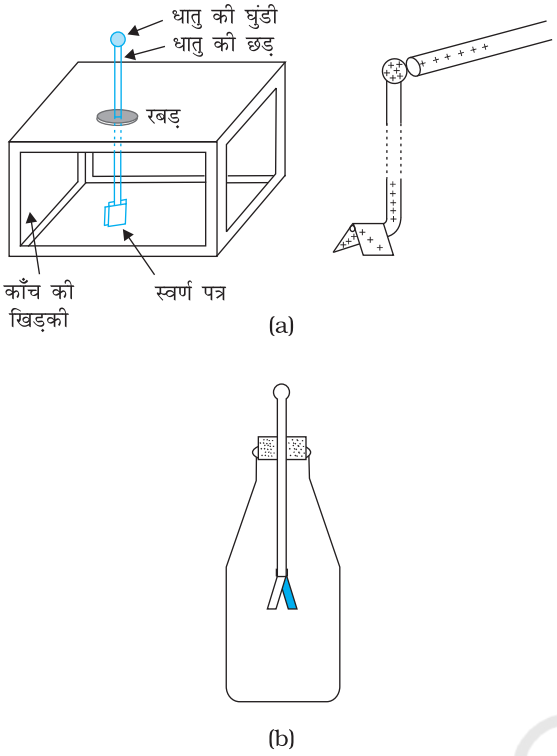
प्राचीन काल में विद्युत तथा चुंबकत्व पृथक विषय समझे जाते थे। विद्युत के अंतर्गत काँच की छड़ों, बिल्ली के समूर, बैटरी, तड़ित आदि के आवेशों पर चर्चा होती थी जबकि चुंबकत्व के अंतर्गत चुंबकों, लौह-छीलन, चुंबकीय सुई आदि में अन्योन्य क्रिया का वर्णन किया जाता था। सन 1820 ई. में डेनमार्क के वैज्ञानिक ऑर्स्टेड ने यह पाया कि चुंबकीय सुई के निकट रखे तार से विद्युत धारा प्रवाहित करने पर सुई विक्षेपित हो जाती है। ऐम्पियर तथा फैराडे ने इस प्रेक्षण का यह कहकर पोषण किया कि गतिशील आवेश चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करते हैं तथा गतिशील चुंबक विद्युत धारा उत्पन्न करते हैं। विद्युत तथा चुंबकत्व में एकीकरण तब स्थापित हुआ जब स्कॉटलैंड के भौतिकविद मैक्सवेल तथा हॉलैंड के भौतिकविद लोरेंज ने एक सिद्धांत प्रतिपादित किया जिसमें उन्होंने यह दर्शाया कि ये दोनों विषय एक-दूसरे पर निर्भर हैं। इस क्षेत्र को *वैद्युतचुंबकत्व* कहते हैं। हमारे चारों ओर की अधिकांश परिघटनाओं की व्याख्या वैद्युतचुंबकत्व के अंतर्गत की जा सकती है। वस्तुतः वे सभी बल जिनके विषय में हम विचार करते हैं, जैसे घर्षण पदार्थ को संयोजित रखने के लिए उनके परमाणुओं के बीच लगने वाला रासायनिक बल यहाँ तक कि सजीवों की कोशिकाओं में होने वाली प्रक्रियाओं की व्याख्या करने वाले बलों का उद्भव भी वैद्युतचुंबकीय बलों से हुआ है। वैद्युतचुंबकीय बल प्रकृति के मूल बलों में से एक है।

मैक्सवेल ने चार समीकरण प्रस्तुत किए जिनकी क्लासिकल वैद्युतचुंबकत्व में वही भूमिका है, जो यांत्रिकी में न्यूटन की गति की समीकरणों तथा गुरुत्वाकर्षण नियम की है। उन्होंने यह भी प्रमाणित किया कि प्रकाश की प्रकृति वैद्युतचुंबकीय है तथा इसकी चाल केवल विद्युत तथा चुंबकीय मापों द्वारा प्राप्त की जा सकती है। उन्होंने यह भी दावा किया कि प्रकाशिकी के विज्ञान तथा विद्युत एवं चुंबकत्व में प्रगाढ़ संबंध है।

विद्युत एवं चुंबकत्व का विज्ञान आधुनिक प्रौद्योगिक सभ्यता की नींव है। विद्युत शक्ति, दूरसंचार, रेडियो और टेलीविज़न तथा दैनिक जीवन में उपयोग होने वाली विस्तृत प्रकार की प्रायोगिक युक्तियाँ इसी विज्ञान के सिद्धांतों पर आधारित हैं। यद्यपि गतिशील आवेशित कण विद्युत तथा चुंबकीय दोनों बल आरोपित करते हैं, परंतु ऐसे निर्देश फ्रेम जिसमें सभी आवेश विराम में हों, आरोपित बल केवल विद्युत बल होते हैं। आप जानते हैं कि गुरुत्वाकर्षण बल दीर्घ-परासी बल है। इसका प्रभाव वहाँ भी अनुभव किया जाता है, जहाँ अन्योन्य क्रिया करने वाले कणों के बीच की दूरी अत्यधिक होती है क्योंकि यह बल अन्योन्य क्रिया करने वाले पिंडों के बीच की दूरी के वर्ग के व्युत्क्रमानुसार घटता है। इस अध्याय के अंतर्गत हम यह सीखेंगे कि विद्युत बल भी उतना ही व्यापक है तथा वास्तव में गुरुत्वाकर्षण बल की तुलना में परिमाण की कोटि कई गुना प्रबल है (भौतिकी पाठ्यपुस्तक कक्षा 11 का अध्याय 1 देखिए)।

आवेशों की उपस्थिति के संसूचन के लिए एक सरल उपकरण *स्वर्ण पत्र विद्युतदर्शी* है [चित्र 1.2 (a)]। इसमें एक बॉक्स में धातु की एक छड़ ऊर्ध्वाधरतः लगी होती है जिसके निचले सिरे पर सोने के वर्क की दो पट्टियाँ बँधी होती हैं। जब कोई आवेशित वस्तु छड़ के ऊपरी सिरे को छूती है तो छड़ में होता हुआ आवेश सोने के वर्कों पर आ जाता है और वे एक-दूसरे से दूर हट जाते हैं। आवेश जितना अधिक होता है, वर्कों के निचले सिरों के बीच उतनी ही अधिक दूरी हो जाती है।

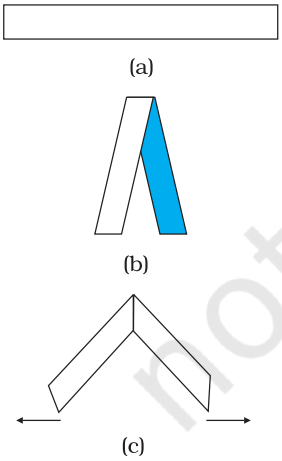
© NCERT not to be republished



चित्र 1.2 विद्युतदर्शी (a) स्वर्ण पत्र विद्युतदर्शी (b) सरल विद्युतदर्शी की रूपरेखा।

विद्यार्थी नीचे बताए अनुसार सरल विद्युतदर्शी बना सकते हैं [चित्र 1.2(b)]। परदे लटकाने वाली ऐलुमिनियम की ऐसी बारीक छड़ लीजिए जिसके दोनों सिरों पर गोले जुड़े हों। इसका लगभग 20 cm लंबा एक टुकड़ा इस प्रकार काटिए जिससे छड़ का एक सिरा चपटा तथा दूसरा सिरा गोले वाला बन जाए। एक इतनी बड़ी बोतल लीजिए जिसके मुँह पर कॉर्क लगाकर उस कॉर्क में छेद करके चित्र में दर्शाए अनुसार इस छड़ को फिट किया जा सके। छड़ का गोले वाला सिरा बोतल के बाहर तथा कटा सिरा बोतल के भीतर रखना चाहिए। लंबा पतला ऐलुमिनियम पत्र (लगभग 6 cm) लेकर इसे बीच में मोड़िए और इसे छड़ के चपटे सिरे पर सेल्युलोस-टेप के साथ जोड़ दीजिए। इस प्रकार आपके विद्युतदर्शी के पत्र बन जाते हैं। अब कॉर्क को बोतल में इस प्रकार फिट करिए कि छड़ का गोले वाला सिरा कॉर्क से लगभग 5 cm बाहर निकला रहे। बोतल के भीतर एक कागज़ का पैमाना पहले से ही पत्रों की पृथकता को मापने के लिए लगाया जा सकता है। पत्रों की पृथकता विद्युतदर्शी पर आवेश की मात्रा की एक माप होती है।

यह समझने के लिए कि विद्युतदर्शी किस प्रकार कार्य करता है सफ़ेद कागज़ की वह पट्टियाँ लीजिए जिनका उपयोग हमने आवेशित वस्तुओं द्वारा आकर्षण देखने के लिए किया था। पट्टी को आधा मोड़िए ताकि पट्टी पर मोड़ का निशान बन जाए। पट्टी को खोलिए तथा इस पर चित्र 1.3 में दर्शाए अनुसार, पर्वतीय मोड़ बनाकर हलकी इस्तरी कीजिए। इसे मोड़ पर चुटकी भरकर पकड़िए। आप यह पाएँगे कि दोनों अर्धभाग एक-दूसरे से दूर जाते हैं। यह दर्शाता है कि इस्तरी करने पर पट्टी आवेश अर्जित कर लेती है। जब आप पट्टी को आधा मोड़ते हैं तो दोनों अर्धभागों पर सजातीय आवेश होता है, अतः वे एक-दूसरे को प्रतिकर्षित करते हैं। पत्र विद्युतदर्शी में भी यही प्रभाव दिखाई देता है। परदे की छड़ के गोले को विद्युन्मय वस्तु से स्पर्श कराने पर परदे की छड़ पर आवेश स्थानांतरित होकर उसके दूसरे सिरे पर जुड़े ऐलुमिनियम पत्रों पर पहुँच जाता है। पत्र के दोनों अर्धभाग सजातीय आवेश अर्जित करने के कारण एक-दूसरे को प्रतिकर्षित करते हैं। पत्रों की अपसारिता द्वारा उन पर आवेश की मात्रा सुनिश्चित की जाती है। आइए, अब पहले यह समझें कि द्रव्य से बनी वस्तुएँ क्यों आवेश को अर्जित करती हैं।



चित्र 1.3 कागज़-पट्टी प्रयोग।

सभी पदार्थ परमाणुओं और/अथवा अणुओं से बने हैं। यद्यपि वस्तुएँ सामान्यतः वैद्युत उदासीन होती हैं, उनमें आवेश तो होते हैं परंतु उनके ये आवेश ठीक-ठीक संतुलित होते हैं। अणुओं को सँभालने वाला रासायनिक बल, ठोसों में परमाणुओं को एकसाथ थामे रखने वाले बल, गोंद का आसंजक बल, पृष्ठ तनाव से संबद्ध बल–इन सभी बलों की मूल प्रकृति *वैद्युतीय* है, और ये आवेशित कणों के बीच लगने वाले विद्युत बलों से उत्पन्न होते हैं। इस प्रकार, वैद्युतचुंबकीय बल सर्वव्यापी है और यह हमारे जीवन से संबद्ध प्रत्येक क्षेत्र में सम्मिलित है। अतः यह आवश्यक है कि हम इस प्रकार के बल के विषय में अधिक जानकारी प्राप्त करें।

किसी उदासीन वस्तु को आवेशित करने के लिए हमें उससे एक प्रकार के आवेश को जोड़ने अथवा हटाने की आवश्यकता होती है। जब हम यह कहते हैं कि कोई वस्तु आवेशित है तो हम सदैव ही इस आवेश के आधिक्य अथवा अभाव का उल्लेख करते हैं। ठोसों में कुछ इलेक्ट्रॉन परमाणु में कम कसकर आबद्ध होने के कारण, वे आवेश होते हैं जो एक वस्तु से दूसरी वस्तु में स्थानांतरित हो जाते हैं। इस प्रकार कोई वस्तु अपने कुछ इलेक्ट्रॉन खोकर धनावेशित हो सकती है। इसी प्रकार किसी वस्तु को इलेक्ट्रॉन देकर ऋणावेशित भी बनाया जा सकता है। जब हम काँच की छड़ को

© NCERT not to be republished

रेशम से रगड़ते हैं तो छड़ के कुछ इलेक्ट्रॉन रेशम के कपड़े में स्थानांतरित हो जाते हैं। इस प्रकार छड़ धनावेशित तथा रेशम ऋणावेशित हो जाता है। रगड़ने की प्रक्रिया में कोई नया आवेश उत्पन्न नहीं होता। साथ ही स्थानांतरित होने वाले इलेक्ट्रॉनों की संख्या वस्तु में उपस्थित इलेक्ट्रॉनों की संख्या की तुलना में एक बहुत छोटा अंश होती है। और केवल वस्तु के कम कसकर आबद्ध इलेक्ट्रॉन ही रगड़कर एक वस्तु से दूसरी वस्तु में स्थानांतरित किए जा सकते हैं। इसीलिए, जब किसी वस्तु को किसी अन्य वस्तु से रगड़ा जाता है, तो वस्तुएँ आवेशित हो जाती हैं और यही कारण है कि रगड़ द्वारा वस्तुओं पर आए आवेश को दर्शाने के लिए हमें पदार्थों के कुछ निश्चित युगलों तक ही अटके रहना पड़ता है।

1.3 चालक तथा विद्युतरोधी

हाथ में पकड़ी धातु की छड़ ऊन से रगड़े जाने पर आवेशित होने का कोई संकेत नहीं दर्शाती। परंतु, यदि धातु की छड़ पर लकड़ी अथवा प्लास्टिक का हैंडिल लगा है और उसके धातु के भाग को स्पर्श नहीं किया गया है, तो वह आवेशित होने का संकेत दे देती है। मान लीजिए हम किसी ताँबे के तार के एक सिरे को उदासीन सरकंडे की गोली से जोड़ देते हैं तथा दूसरे सिरे को ऋणावेशित प्लास्टिक-छड़ से जोड़ देते हैं तो हम यह पाते हैं कि सरकंडे की गोली ऋणावेशित हो जाती है। यदि इसी प्रयोग को नॉयलोन के धागे अथवा रबर के छल्ले के साथ दोहराएँ तो प्लास्टिक-छड़ से सरकंडे की गोली में कोई आवेश स्थानांतरित नहीं होता। छड़ से गोली में आवेश के स्थानांतरित न होने का क्या कारण है?

कुछ पदार्थ तुरंत ही अपने में से होकर विद्युत को प्रवाहित होने देते हैं जबकि कुछ अन्य ऐसा नहीं करते। जो पदार्थ आसानी से अपने में से होकर विद्युत को प्रवाहित होने देते हैं उन्हें *चालक* कहते हैं। उनमें ऐसे वैद्युत आवेश (इलेक्ट्रॉन) होते हैं जो पदार्थ के भीतर गति के लिए अपेक्षाकृत स्वतंत्र होते हैं। धातुएँ, मानव तथा जंतु शरीर और पृथ्वी चालक हैं। काँच, पॉर्सेलेन, प्लास्टिक, नॉयलोन, लकड़ी जैसी अधिकांश अधातुएँ अपने से होकर प्रवाहित होने वाली विद्युत पर उच्च प्रतिरोध लगाती हैं। इन्हें *विद्युतरोधी* कहते हैं। अधिकांश पदार्थ ऊपर वर्णित इन दो वर्गों में से किसी एक में आते हैं।*

जब कुछ आवेश किसी चालक पर स्थानांतरित होता है तो वह तुरंत ही उस चालक के समस्त पृष्ठ पर फैल जाता है। इसके विपरीत यदि कुछ आवेश किसी विद्युतरोधी को दें तो वह वहीं पर रहता है। ऐसा क्यों होता है, यह आप अगले अध्याय में सीखेंगे।

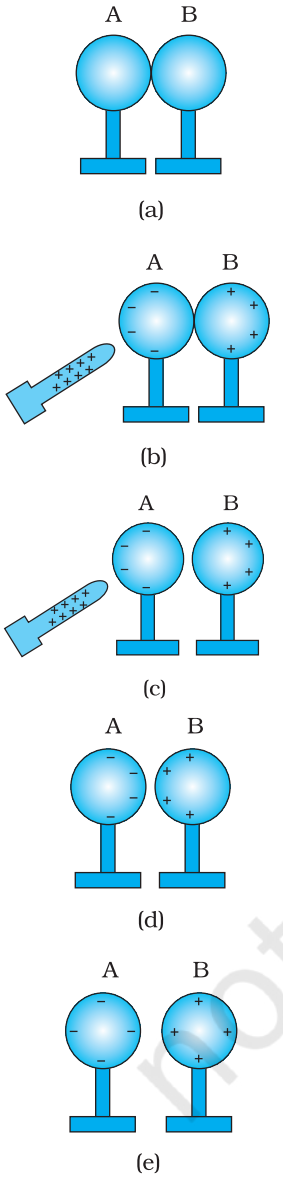
पदार्थों का यह गुण हमें बताता है कि सूखे बालों में कंघी करने अथवा रगड़ने पर नॉयलोन या प्लास्टिक की कंघी क्यों आवेशित हो जाती है, परंतु धातु की वस्तुएँ जैसे चम्मच आवेशित क्यों नहीं होती? धातुओं से आवेश का क्षरण हमारे शरीर से होकर धरती में हो जाता है, ऐसा होने का कारण यह है कि धातु तथा हमारा शरीर दोनों ही विद्युत के अच्छे चालक हैं।

जब हम किसी आवेशित वस्तु को पृथ्वी के संपर्क में लाते हैं तो उसका अतिरिक्त आवेश जोड़ने वाले चालक (जैसे हमारा शरीर) में से होते हुए क्षणिक विद्युत धारा उत्पन्न करके भूमि में चला जाता है। आवेशों के भूमि के साथ बंटन की इस प्रक्रिया को *भूसंपर्कण* (भूसंपर्कित करना) कहते हैं। भूसंपर्कण विद्युत परिपथों एवं अनुप्रयुक्तियों की सुरक्षा के लिए की गई एक व्यवस्था है। धातु की एक मोटी प्लेट को भूमि में गहराई तक गाड़ा जाता है तथा इस प्लेट से मोटे तारों को निकालकर भवनों में इन तारों का उपयोग मुख्य आपूर्ति के निकट भूसंपर्कण के लिए किया जाता

* एक तीसरी श्रेणी जिसे *अर्धचालक* कहते हैं, आवेशों की गति में अवरोध उत्पन्न करती है। इस अवरोध का परिमाण चालकों तथा विद्युतरोधियों के मध्यवर्ती होता है।

© NCERT not to be republished

है। हमारे घरों में विद्युत की आपूर्ति के लिए तीन तार उपयोग किए जाते हैं : विद्युन्मय तार, उदासीन तार तथा भूसंपर्क तार। इनमें से पहले दो तार विद्युत धारा को शक्ति स्टेशन से युक्तियों तक ले जाते हैं तथा तीसरा तार भूमि में गड़ी धातु की प्लेट से जोड़ा जाता है। विद्युत अनुप्रयुक्तियों; जैसे – विद्युत इस्तरी, रेफ्रिजरेटर, टेलीविज़न के धातु के आवरण भूसंपर्क तार से जुड़े होते हैं। परिपथ में कोई त्रुटि होने पर अथवा विद्युन्मय तार का धातु के आवरण से स्पर्श होने पर आवेश भूमि में प्रवाहित हो जाता है। इन अनुप्रयुक्तियों को कोई हानि नहीं होती तथा मनुष्यों को कोई क्षति भी नहीं होती; यदि भूसंपर्क तार न हो तो क्षति पहुँचना/दुर्घटना होना अपरिहार्य हो जाएगा, क्योंकि मानव शरीर विद्युत का अच्छा चालक है।



चित्र 1.4 दो गोलों के साथ प्रेरण द्वारा आवेशन।

1.4 प्रेरण द्वारा आवेशन

जब हम किसी सरकंडे की गोली से किसी आवेशित प्लास्टिक-छड़ को स्पर्श कराते हैं तो छड़ का कुछ आवेश सरकंडे की गोली पर स्थानांतरित हो जाता है और वह आवेशित हो जाती है। इस प्रकार सरकंडे की गोली संपर्क द्वारा आवेशित होती है। तब यह प्लास्टिक-छड़ से प्रतिकर्षित होती है तथा काँच की छड़ जो विजातीय आवेशित है, की ओर आकर्षित होती है। परंतु, कोई विद्युन्मय छड़ हलकी वस्तुओं को क्यों आकर्षित करती है, इस प्रश्न का उत्तर अभी भी नहीं मिल पाया है। आइए, हम यह समझने का प्रयास करें कि निम्नलिखित प्रयोग को करने पर क्या हो सकता है।

(i) विद्युतरोधी स्टैंडों पर रखे दो धातु के गोलों A एवं B को चित्र 1.4 (a) में दर्शाए अनुसार एक दूसरे के संपर्क में लाइए।

(ii) एक धनावेशित छड़ इन गोलों में किसी एक (माना A) के निकट लाइए तथा यह सावधानी बरतिए कि छड़ गोले से स्पर्श न करे। गोले के मुक्त इलेक्ट्रॉन छड़ की ओर आकर्षित होते हैं। गोले B के पिछले पृष्ठ पर धनावेश का आधिक्य हो जाता है। दोनों प्रकार के आवेश धातु के गोलों में आबद्ध रहते हैं, पलायन नहीं कर पाते। अतः वे पृष्ठों पर ही चित्र 1.4(b) में दर्शाए अनुसार रहते हैं। गोले A के बाएँ पृष्ठ पर ऋणावेश का आधिक्य तथा गोले के दाएँ पृष्ठ पर धनात्मक आवेश का आधिक्य होता है। तथापि गोले के सारे इलेक्ट्रॉन गोले A के बाएँ पृष्ठ पर संचित नहीं होते। जैसे ही गोले A के बाएँ पृष्ठ पर इलेक्ट्रॉन एकत्र होने शुरू होते हैं अन्य इलेक्ट्रॉन इनके द्वारा प्रतिकर्षित हो जाते हैं। कुछ ही क्षण में छड़ के आकर्षण के कारण क्रिया तथा संचित आवेशों के कारण प्रतिकर्षण के बीच साम्य स्थापित हो जाता है। चित्र 1.4(b) साम्यावस्था को दर्शाता है। इस प्रक्रिया को *आवेश का प्रेरण* कहते हैं तथा यह लगभग तात्कालिक है। जब तक काँच की छड़ गोले के निकट रहती है तब तक चित्र में दर्शाए अनुसार संचित आवेश पृष्ठ पर रहता है। यदि छड़ को हटा लेते हैं तो आवेशों पर कोई बाह्य बल कार्य नहीं करता तथा वे अपनी उदासीन अवस्था में वापस लौट जाते हैं।

(iii) चित्र 1.4(c) में दर्शाए अनुसार काँच की छड़ को बाएँ गोले के निकट रखते हुए दोनों गोलों को एक-दूसरे से कुछ पृथक कीजिए। ऐसा करने पर दोनों गोले विजातीय आवेशों द्वारा आवेशित होकर एक-दूसरे को आकर्षित करते हैं।

(iv) छड़ को हटा लीजिए। गोलों पर आवेश चित्र 1.4(d) में दर्शाए अनुसार स्वयं को पुनर्व्यवस्थित कर लेते हैं। अब दोनों गोलों के बीच पृथकन अधिक कीजिए। ऐसा करने पर चित्र 1.4(e) में दर्शाए अनुसार आवेश गोलों पर एकसमान रूप से वितरित हो जाता है।

इस प्रक्रिया में धातु के गोले आवेशित हो जाते हैं। धनावेशित काँच की छड़ के आवेश की कोई क्षति नहीं होती, जो संपर्क द्वारा आवेशित करने की प्रक्रिया के विपरीत है।

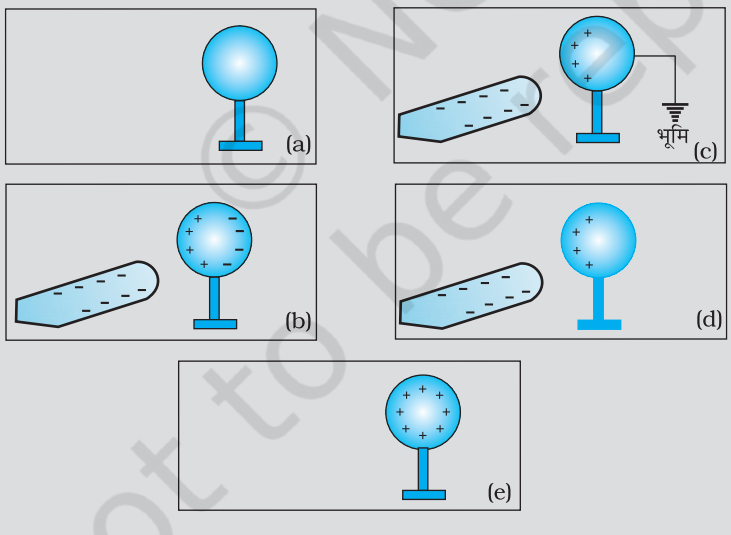
जब किसी विद्युन्मय छड़ को हलकी वस्तुओं के निकट लाते हैं तो यही प्रभाव होता है। छड़ वस्तुओं के पास वाले पृष्ठ पर विजातीय आवेश प्रेरित करती है तथा सजातीय आवेश वस्तुओं के

© NCERT not to be republished

दूर वाले भाग पर पहुँच जाता है [ऐसा तब भी होता है जब हलकी वस्तु चालक नहीं होती। यह प्रक्रिया किस प्रकार होती है इसका स्पष्टीकरण बाद में अनुच्छेद 1.10 तथा 2.10 में किया गया है]। दोनों प्रकार के आवेशों के केंद्रों में कुछ पृथकन होता है। हम जानते हैं कि सजातीय आवेशों में प्रतिकर्षण तथा विजातीय आवेशों में आकर्षण होता है। तथापि, बल का परिमाण आवेशों के बीच दूरी पर निर्भर करने के कारण आकर्षण बल प्रतिकर्षण बल की तुलना में अधिक होता है। फलस्वरूप कागज़ के टुकड़े, सरकंडे की गोली आदि हलके होने के कारण छड़ की ओर खिंच आते हैं।

उदाहरण 1.1 आप किसी धातु के गोले को स्पर्श किए बिना कैसे धनावेशित कर सकते हैं?

हल चित्र 1.5(a) में किसी विद्युतरोधी धातु के स्टैंड पर कोई अनावेशित धातु का गोला रखा दर्शाया गया है। चित्र 1.5(b) में दर्शाए अनुसार इस गोले के निकट कोई ऋणावेशित छड़ लाइए। गोले के मुक्त इलेक्ट्रॉन प्रतिकर्षण के कारण दूर जाकर दूरस्थ सिरे पर एकत्र हो जाते हैं। पास का सिरा इलेक्ट्रॉनों की कमी के कारण धनावेशित हो जाता है। जब गोले की धातु के मुक्त इलेक्ट्रॉनों पर लगने वाला नेट बल शून्य हो जाता है तो आवेशों के वितरण की यह प्रक्रिया बंद हो जाती है। किसी चालक तार द्वारा गोले को भूसंपर्कित कीजिए। इलेक्ट्रॉन भूमि में प्रवाहित हो जाएँगे जबकि पास के सिरे का धनावेश, छड़ के ऋणावेश के आकर्षण बल के कारण चित्र 1.5(c) में दर्शाए अनुसार बद्ध रहेगा। गोले का भूसंपर्क तोड़ दीजिए। पास के सिरे पर धनावेश की बद्धता बनी रहती है [चित्र 1.5(d)]। विद्युन्मय छड़ को हटा लीजिए। चित्र 1.5(e) में दर्शाए अनुसार धनावेश गोले के पृष्ठ पर एकसमान रूप से फैल जाता है।



चित्र 1.5

इस प्रयोग में धातु का गोला प्रेरण की प्रक्रिया द्वारा आवेशित हो जाता है तथा छड़ अपना कोई आवेश नहीं खोती।

प्रेरण द्वारा धातु के गोले को ऋणावेशित करने की प्रक्रिया के भी ये ही चरण होते हैं, इसमें धनावेशित छड़ गोले के समीप लाई जाती है। इस प्रकरण में इलेक्ट्रॉन भूमि से गोले में उस समय स्थानांतरित (प्रवाहित) होते हैं जब तार द्वारा गोले को भूसंपर्कित किया जाता है। क्या आप इसका कारण स्पष्ट कर सकते हैं?

उदाहरण 1.1

भौतिकी

प्रेरण द्वारा दो गोलों के निकाय के आवेशन संबंधी प्रभावी सजीव चित्रण
http://www.physicsclassroom.com/mmedia/estatics/estatic/itsn.cfm

© NCERT not to be republished

1.5 वैद्युत आवेश के मूल गुण

हमने यह देखा है कि दो प्रकार के आवेश होते हैं– धनावेश तथा ऋणावेश तथा इनमें एक-दूसरे के प्रभाव को निरस्त करने की प्रवृत्ति होती है। अब, हम यहाँ वैद्युत आवेश के अन्य गुणों का वर्णन करेंगे।

यदि आवेशित वस्तुओं का साइज़ उनके बीच की दूरी की तुलना में बहुत कम होता है तो हम उन्हें बिंदु आवेश मानते हैं। यह मान लिया जाता है कि वस्तु का संपूर्ण आवेश आकाश में एक बिंदु पर संकेंद्रित है।

1.5.1 आवेशों की योज्यता

अब तक हमने आवेश की परिमाणात्मक परिभाषा नहीं दी है; इसे हम अगले अनुभाग में समझेंगे। अंतरिम रूप में हम यह मानेंगे कि ऐसा किया जा सकता है और फिर आगे बढ़ेंगे। यदि किसी निकाय में दो बिंदु आवेश q_1 तथा q_2 हैं तो निकाय का कुल आवेश q_1 तथा q_2 को बीजगणितीय रीति से जोड़ने पर प्राप्त होता है, अर्थात आवेशों को वास्तविक संख्याओं की भाँति जोड़ा जा सकता है अथवा आवेश द्रव्यमान की भाँति अदिश राशि है। यदि किसी निकाय में n आवेश $q_1, q_2, q_3 \ldots q_n$, हैं तो निकाय का कुल आवेश $q_1 + q_2 + q_3 + \ldots + q_n$ है। आवेश का द्रव्यमान की भाँति ही परिमाण होता है दिशा नहीं होती। तथापि आवेश तथा द्रव्यमान में एक अंतर है। किसी वस्तु का द्रव्यमान सदैव धनात्मक होता है जबकि कोई आवेश या तो धनात्मक हो सकता है अथवा ऋणात्मक। किसी निकाय के आवेश का योग करते समय उसके उपयुक्त चिह्न का उपयोग करना होता है। उदाहरणार्थ, किसी निकाय में किसी यादृच्छिक मात्रक में मापे गए पाँच आवेश +1, +2, –3, +4 तथा –5 हैं, तब उसी मात्रक में निकाय का कुल आवेश = (+1) + (+2) + (–3) + (+4) + (–5) = –1 है।

1.5.2 वैद्युत आवेश संरक्षित है

हम इस तथ्य की ओर पहले ही संकेत दे चुके हैं कि जब वस्तुएँ रगड़ने पर आवेशित होती हैं तो एक वस्तु से दूसरी वस्तु में इलेक्ट्रॉनों का स्थानांतरण होता है, कोई नया आवेश उत्पन्न नहीं होता है, और न ही आवेश नष्ट होता है। वैद्युत आवेशयुक्त कणों को दृष्टि में लाएँ तो हमें आवेश के संरक्षण की धारणा समझ में आएगी। जब हम दो वस्तुओं को परस्पर रगड़ते हैं तो एक वस्तु जितना आवेश प्राप्त करती है, दूसरी वस्तु उतना आवेश खोती है। बहुत सी आवेशित वस्तुओं के किसी वियुक्त निकाय के भीतर, वस्तुओं में अन्योन्य क्रिया के कारण, आवेश पुनः वितरित हो सकते हैं, परंतु यह पाया गया है कि *वियुक्त निकाय का कुल आवेश सदैव संरक्षित रहता है।* आवेश-संरक्षण को प्रायोगिक रूप से स्थापित किया जा चुका है।

यद्यपि किसी प्रक्रिया में आवेशवाही कण उत्पन्न अथवा नष्ट किए जा सकते हैं, परंतु किसी वियुक्त निकाय के नेट आवेश को उत्पन्न करना अथवा नष्ट करना संभव नहीं है। कभी-कभी प्रकृति आवेशित कण उत्पन्न करती है : कोई न्यूट्रॉन एक प्रोटॉन तथा एक इलेक्ट्रॉन में रूपांतरित हो जाता है। इस प्रकार उत्पन्न प्रोटॉन तथा इलेक्ट्रॉन पर, परिमाण में समान एवं विजातीय (विपरीत) आवेश उत्पन्न होते हैं तथा इस रचना से पूर्व और रचना के पश्चात का कुल आवेश शून्य रहता है।

1.5.3 वैद्युत आवेश का क्वांटमीकरण

प्रायोगिक रूप से यह स्थापित किया गया है कि सभी मुक्त आवेश परिमाण में आवेश की मूल इकाई, जिसे e द्वारा दर्शाया जाता है, के पूर्णांकी गुणज हैं। इस प्रकार, किसी वस्तु के आवेश q को सदैव इस प्रकार दर्शाया जाता है –

© NCERT not to be republished

$q = ne$

यहाँ n कोई धनात्मक अथवा ऋणात्मक पूर्णांक है। आवेश की यह मूल इकाई इलेक्ट्रॉन अथवा प्रोटॉन के आवेश का परिमाण है। परिपाटी के अनुसार, इलेक्ट्रॉन के आवेश को ऋणात्मक मानते हैं; इसीलिए किसी इलेक्ट्रॉन पर आवेश $-e$ तथा प्रोटॉन पर आवेश $+e$ द्वारा व्यक्त करते हैं।

वैद्युत आवेश सदैव e का पूर्णांक गुणज होता है। इस तथ्य को *आवेश का क्वांटमीकरण* कहते हैं। भौतिकी में ऐसी बहुत सी अवस्थितियाँ हैं जहाँ कुछ भौतिक राशियाँ क्वांटीकृत हैं। आवेश के क्वांटमीकरण का सुझाव सर्वप्रथम अंग्रेज़ प्रयोगकर्ता फैराडे द्वारा खोजे गए विद्युत अपघटन के प्रायोगिक नियमों से प्राप्त हुआ था। सन् 1912 में मिलिकन ने इसे वास्तव में प्रायोगिक रूप से निदर्शित किया था।

मात्रकों की अंतर्राष्ट्रीय प्रणाली (SI) में आवेश का मात्रक *कूलॉम* है, जिसका प्रतीक C है। एक कूलॉम को विद्युत धारा के मात्रक के पदों में परिभाषित किया जाता है जिसके विषय में आप अगले अध्याय में सीखेंगे। इस परिभाषा के अनुसार, एक कूलॉम वह आवेश है जो किसी तार में 1 A (ऐम्पियर) धारा 1 सेकंड तक प्रवाहित करता है [भौतिकी की पाठ्यपुस्तक कक्षा 11, भाग 1 का अध्याय 2 देखिए]। इस प्रणाली में, आवेश की मूल इकाई

$e = 1.602192 \times 10^{-19}$ C

इस प्रकार, –1C आवेश में लगभग 6×10^{18} इलेक्ट्रॉन होते हैं। स्थिरवैद्युतिकी में इतने विशाल परिमाण के आवेशों से यदा-कदा ही सामना होता है और इसीलिए हम इसके छोटे मात्रकों 1 μC (माइक्रोकूलॉम) = 10^{-6} C अथवा 1 mC (मिलीकूलॉम) = 10^{-3} C का उपयोग करते हैं।

यदि केवल इलेक्ट्रॉन तथा प्रोटॉन ही विश्व में आवेश के मूल मात्रक हैं तो सभी प्रेक्षित आवेशों को e का पूर्णांक गुणज होना चाहिए। इस प्रकार यदि किसी वस्तु में n_1 इलेक्ट्रॉन तथा n_2 प्रोटॉन हैं तो उस वस्तु पर कुल आवेश $n_2 \times e + n_1 \times (-e) = (n_2 - n_1)\, e$ है। चूँकि n_1 तथा n_2 पूर्णांक हैं, इनका अंतर भी एक पूर्णांक है। अतः किसी वस्तु पर आवेश सदैव e का पूर्णांक गुणज होता है जिसे e के चरणों में ही घटाया अथवा बढ़ाया जा सकता है।

किंतु, मूल मात्रक e का साइज़ बहुत छोटा होता है और स्थूल स्तर पर हम कुछ μC के आवेशों को व्यवहार में लाते हैं, इस पैमाने पर यह तथ्य दृष्टिगोचर नहीं होता कि किसी वस्तु का आवेश e के मात्रकों में घट अथवा बढ़ सकता है। आवेश की कणिकीय प्रकृति लुप्त हो जाती है और यह सतत प्रतीत होता है।

इस स्थिति की तुलना बिंदु तथा रेखा की ज्यामितीय परिकल्पनाओं से की जा सकती है। दूर से देखने पर कोई बिंदुकित रेखा हमें सतत प्रतीत होती है परंतु वह वास्तव में सतत नहीं होती। जिस प्रकार एक-दूसरे के अत्यधिक निकट के बहुत से बिंदु हमें सतत रेखा का आभास देते हैं, उसी प्रकार एक साथ लेने पर बहुत से छोटे आवेशों का संकलन भी सतत आवेश वितरण जैसा दिखाई देता है।

स्थूल स्तर पर हम ऐसे आवेशों से व्यवहार करते हैं जो इलेक्ट्रॉन e के आवेश की तुलना में परिमाण में अत्यधिक विशाल होते हैं। चूँकि $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C, परिमाण में 1 μC आवेश में एक इलेक्ट्रॉन के आवेश का लगभग 10^{13} गुना आवेश होता है। इस पैमाने पर, यह तथ्य कि किसी वस्तु में आवेश की कमी अथवा वृद्धि केवल e के मात्रकों में ही हो सकती है, इस कथन से सर्वथा भिन्न नहीं है कि आवेश सतत मान ग्रहण कर सकता है। इस प्रकार, स्थूल स्तर पर आवेश के क्वांटीकरण का कोई व्यावहारिक महत्त्व नहीं है तथा इसकी उपेक्षा की जा सकती है। सूक्ष्म स्तर पर जहाँ आवेश के परिमाण e के कुछ दशक अथवा कुछ शतक कोटि के होते हैं अर्थात जिनकी गणना की जा

© NCERT not to be republished

सकती है, वहाँ पर आवेश विविक्त प्रतीत होते हैं तथा आवेश के क्वांटमीकरण की उपेक्षा नहीं की जा सकती। अत: यह जानना बहुत महत्वपूर्ण है कि किस परिमाण के आवेश की बात हो रही है।

उदाहरण 1.2

उदाहरण 1.2 यदि किसी पिंड से एक सेकंड में 10^9 इलेक्ट्रॉन किसी अन्य पिंड में स्थानांतरित होते हैं तो 1C आवेश के स्थानांतरण में कितना समय लगेगा?

हल 1 सेकंड में पिंड से 10^9 इलेक्ट्रॉन निकलते हैं, अत: पिंड द्वारा 1s में दिया जाने वाला आवेश $1.6 \times 10^{-19} \times 10^9$ C = 1.6×10^{-10} C

तब 1 C आवेश के संचित होने के समय का आकलन 1 C ÷ (1.6×10^{-10} C/s) = 6.25×10^9 s = $6.25 \times 10^9 \div (365 \times 24 \times 3600)$ वर्ष = 198 वर्ष। इस प्रकार जिस पिंड से 10^9 इलेक्ट्रॉन प्रति सेकंड की दर से उत्सर्जन हो रहा है, उससे 1 C आवेश संचित करने में लगभग 200 वर्ष लगेंगे। अत: बहुत से व्यावहारिक कार्यों की दृष्टि से एक कूलॉम आवेश का एक अति विशाल मात्रक है।

तथापि यह जानना भी अति महत्वपूर्ण है कि किसी पदार्थ के 1 घन सेंटीमीटर टुकड़े में लगभग कितने इलेक्ट्रॉन होते हैं। 1 cm भुजा के ताँबे के घन में लगभग 2.5×10^{24} इलेक्ट्रॉन होते हैं।

उदाहरण 1.3

उदाहरण 1.3 एक कप जल में कितने धन तथा ऋण आवेश होते हैं?

हल मान लीजिए कि एक कप जल का द्रव्यमान 250 g है। जल का अणु द्रव्यमान 18 g है। इस प्रकार एक मोल (= 6.02×10^{23} अणु) जल का द्रव्यमान 18 g है। अत: एक कप जल में अणुओं की संख्या = $(250/18) \times 6.02 \times 10^{23}$ ।

जल के प्रत्येक अणु में दो हाइड्रोजन परमाणु तथा एक ऑक्सीजन परमाणु होता है, अर्थात, 10 इलेक्ट्रॉन तथा 10 प्रोटॉन होते हैं। अत: कुल धन तथा कुल ऋण आवेश परिमाण में समान होते हैं। आवेश का यह परिमाण = $(250/18) \times 6.02 \times 10^{23} \times 10 \times 1.6 \times 10^{-19}$ C = 1.34×10^7 C

1.6 कूलॉम नियम

कूलॉम नियम दो बिंदु आवेशों के बीच लगे बल के विषय में एक मात्रात्मक प्रकथन है। जब आवेशित वस्तुओं के साइज़ उनको पृथक करने वाली दूरी की तुलना में बहुत कम होते हैं तो ऐसी आवेशित वस्तुओं के साइज़ों की उपेक्षा की जा सकती है और उन्हें *बिंदु आवेश* माना जा सकता है। कूलॉम ने दो बिंदु आवेशों के बीच लगे बल की माप की और यह पाया कि यह बल दोनों आवेशों के परिमाणों के गुणनफल के अनुक्रमानुपाती तथा उनके बीच की दूरी के वर्ग के व्युत्क्रमानुपाती है तथा यह दोनों आवेशों को मिलाने वाली रेखा के अनुदिश कार्य करता है। इस प्रकार यदि दो बिंदु आवेशों q_1 तथा q_2 के बीच निर्वात में पृथकन r है, तो इनके बीच लगे बल (**F**) का परिमाण है

$$F = k \frac{|q_1 \; q_2|}{r^2} \qquad (1.1)$$

अपने प्रयोगों से किस प्रकार कूलॉम इस नियम तक पहुँचे? कूलॉम ने धातु के दो आवेशित गोलों के बीच लगे बल की माप के लिए ऐंठन तुला* का उपयोग किया। जब दो गोलों के बीच पृथकन प्रत्येक गोले की त्रिज्या की तुलना में बहुत अधिक होता है तो प्रत्येक आवेशित गोले को बिंदु आवेश मान सकते हैं। तथापि आरंभ करते समय गोलों पर आवेश अज्ञात थे। तब वह किस प्रकार

* ऐंठन तुला बल मापने की एक सुग्राही युक्ति है। इस तुला का उपयोग बाद में कैवेंडिश ने दो पिंडों के बीच लगे गुरुत्वाकर्षण बल की माप के लिए भी करके न्यूटन के गुरुत्वाकर्षण नियम को सत्यापित किया।

© NCERT not to be republished

समीकरण (1.1) जैसे संबंध को खोज पाए? कूलॉम ने निम्नलिखित सरल उपाय सोचा–मान लीजिए धातु के गोले पर आवेश q है। यदि इस गोले को इसके सर्वसम किसी अन्य अनावेशित गोले के संपर्क में रख दें तो आवेश q दोनों गोलों पर फैल जाएगा। सममिति के अनुसार, प्रत्येक गोले पर $q/2$* आवेश होगा। इस प्रक्रिया को दोहराकर हम $q/2$, $q/4$ आदि आवेश प्राप्त कर सकते हैं। कूलॉम ने आवेशों के नियत युगल के लिए दूरियों में परिवर्तन करके विभिन्न दूरियों के लिए बल की माप की। तत्पश्चात उन्होंने प्रत्येक युगल के लिए दूरी नियत रखकर युगलों में आवेशों में परिवर्तन किया। विभिन्न दूरियों पर आवेशों के विभिन्न युगलों के लिए बलों की तुलना करके कूलॉम समीकरण (1.1) के संबंध पर पहुँच गए।

कूलॉम नियम जो कि एक सरल गणितीय कथन है, उस तक आरंभ में, ऊपर वर्णित प्रयोगों के आधार पर पहुँचा गया। यद्यपि इन मूल प्रयोगों ने इसे स्थूल स्तर पर स्थापित किया, अवपरमाणुक स्तर ($r \sim 10^{-10}$ m) तक भी इसे स्थापित किया जा चुका है।

कूलॉम ने अपने नियम की खोज बिना आवेशों के परिमाणों के सही संज्ञान के, की थी। वास्तव में, इसे विपरीत अनुप्रयोग के लिए उपयोग में लाया जा सकता है–कूलॉम के नियम का उपयोग अब हम आवेश के मात्रक को परिभाषित करने के लिए कर सकते हैं। समीकरण (1.1) के संबंध में अब तक k का मान यादृच्छिक है। हम k के लिए किसी भी धनात्मक मान का चयन कर सकते हैं। k का चयन आवेश के मात्रक का साइज़ निर्धारित करता है। SI मात्रकों में k का मान लगभग $9 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$ है। इस चयन के फलस्वरूप आवेश का जो मात्रक प्राप्त होता है उसे कूलॉम कहते हैं जिसकी परिभाषा हमने पहले अनुच्छेद 1.4 में दे दी है। समीकरण (1.1) में k का यह मान रखने पर हम यह पाते हैं कि $q_1 = q_2 = 1$ C तथा $r = 1$ m के लिए

$$F = 9 \times 10^9 \text{ N}$$

अर्थात 1 C वह आवेश है जो निर्वात में 1 m दूरी पर रखे इसी परिमाण के किसी अन्य सजातीय आवेश को 9×10^9 न्यूटन बल से प्रतिकर्षित करे। स्पष्ट रूप से, 1 C व्यावहारिक कार्यों के लिए आवेश का बहुत बड़ा मात्रक है। स्थिरवैद्युतिकी में, व्यवहार में इसके छोटे मात्रकों जैसे 1mC तथा 1 μC का उपयोग किया जाता है।

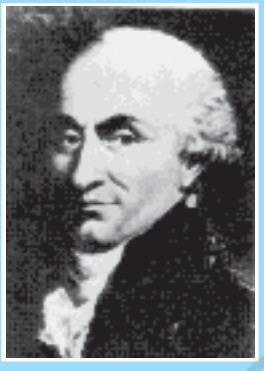
बाद की सुविधा के लिए समीकरण (1.1) के नियतांक k को प्रायः $k = 1/4\pi\varepsilon_0$ लिखते हैं, जिससे कूलॉम नियम को इस प्रकार व्यक्त किया जाता है

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \qquad (1.2)$$

ε_0 को *मुक्त आकाश या निर्वात की विद्युतशीलता* अथवा *परावैद्युतांक* कहते हैं। SI मात्रकों में ε_0 का मान

$$\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1}\text{m}^{-2}$$

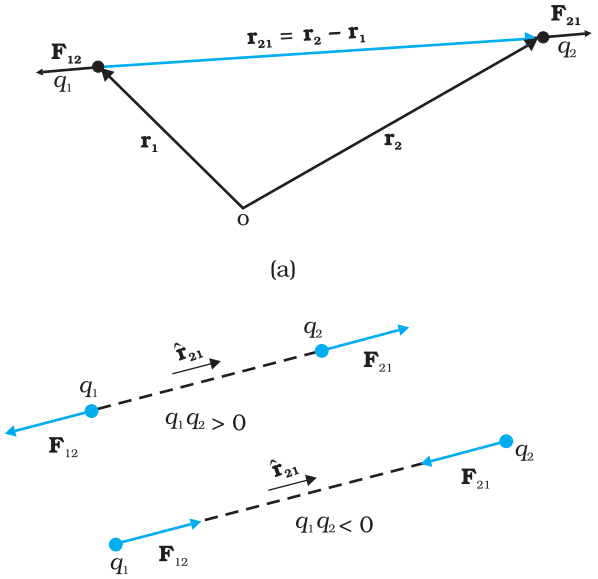
बल एक सदिश है, अतः कूलॉम नियम को सदिश संकेतन में लिखना उत्तम होता है। मान लीजिए q_1 तथा q_2 आवेशों के स्थिति सदिश क्रमशः $\mathbf{r}_1$ तथा $\mathbf{r}_2$ हैं [चित्र 1.6(a) देखिए]। हम q_2



चार्ल्स ऑगस्टिन डे कूलॉम (1736 – 1806) फ्रांसीसी भौतिकविद कूलॉम ने वेस्टइंडीज में एक फौजी इंजीनियर के रूप में अपना कैरियर आरंभ किया। सन् 1776 में वे पेरिस लौट आए तथा एक छोटी सी संपत्ति बनाकर एकांत में अपना शोध कार्य करने लगे। बल के परिमाण को मापने के लिए इन्होंने एक ऐंठन तुला का आविष्कार किया और इसका उपयोग इन्होंने छोटे आवेशित गोलों के बीच लगने वाले आकर्षण अथवा प्रतिकर्षण बलों को ज्ञात करने में किया। इस प्रकार, सन् 1785 में ये व्युत्क्रम वर्ग नियम को खोज पाए जिसे आज कूलॉम का नियम कहते हैं। इस नियम का पूर्व अनुमान प्रिस्टले तथा कैवेंडिश ने लगा लिया था परंतु कैवेंडिश ने अपने परिणाम कभी प्रकाशित नहीं किए। कूलॉम ने सजातीय तथा विजातीय चुंबकीय ध्रुवों के बीच लगने वाले व्युत्क्रम वर्ग नियम का भी पता लगाया।

चार्ल्स ऑगस्टिन डे कूलॉम (1736–1806)

* इसमें आवेशों की योज्यशीलता तथा आवेशों के संरक्षण की अवधारणाएँ अंतर्निहित हैं। दो आवेशों (प्रत्येक $q/2$) के संयोजन से कुल आवेश q बनता है।



चित्र 1.6 (a) ज्यामिति तथा (b) आवेशों के बीच आरोपित बल।

के द्वारा q_1 पर आरोपित बल को $\mathbf{F}_{12}$ तथा q_1 के द्वारा q_2 पर आरोपित बल को $\mathbf{F}_{21}$ द्वारा व्यक्त करते हैं। दो बिंदु आवेशों q_1 तथा q_2 को सुविधा के लिए 1 तथा 2 अंक द्वारा व्यक्त किया गया है। साथ ही 1 से 2 की ओर जाते सदिश को $\mathbf{r}_{21}$ द्वारा व्यक्त किया गया है–

$$\mathbf{r}_{21} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$$

इसी प्रकार 2 से 1 की ओर जाते सदिश को $\mathbf{r}_{12}$ द्वारा व्यक्त किया जाता है–

$$\mathbf{r}_{12} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2 = -\mathbf{r}_{21}$$

सदिशों $\mathbf{r}_{21}$ तथा $\mathbf{r}_{12}$ के परिमाणों का संकेतन क्रमशः r_{21} एवं r_{12} द्वारा होता है ($r_{n21} = r_{n12}$)। किसी सदिश की दिशा का विशेष उल्लेख उस सदिश के अनुदिश एकांक सदिश द्वारा किया जाता है। बिंदु 1 से 2 की ओर (अथवा 2 से 1 की ओर) इंगित करने वाले एकांक सदिश की परिभाषा हम इस प्रकार करते हैं :

$$\hat{\mathbf{r}}_{21} = \frac{\mathbf{r}_{21}}{r_{21}}, \quad \hat{\mathbf{r}}_{12} = \frac{\mathbf{r}_{12}}{r_{12}}, \quad \hat{\mathbf{r}}_{21} = -\hat{\mathbf{r}}_{12}$$

क्रमशः $\mathbf{r}_1$ तथा $\mathbf{r}_2$ पर अवस्थित बिंदु आवेशों q_1 तथा q_2 के बीच लगे कूलॉम बल नियम को तब इस प्रकार व्यक्त किया जाता है

$$\mathbf{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q_1 q_2}{r_{21}^2}\hat{\mathbf{r}}_{21} \qquad (1.3)$$

समीकरण (1.3) के संबंध में कुछ टिप्पणियाँ प्रासंगिक हैं :

- समीकरण (1.3) q_1 तथा q_2 के किसी भी चिह्न, धनात्मक अथवा ऋणात्मक के लिए मान्य है। यदि q_1 तथा q_2 समान चिह्न के हैं (या तो दोनों ही धनात्मक अथवा दोनों ही ऋणात्मक हैं) तब $\mathbf{F}_{21}$, $\hat{\mathbf{r}}_{21}$ के अनुदिश है, जो प्रतिकर्षण को प्रदर्शित करता है जैसा सजातीय आवेशों के लिए होना ही चाहिए। यदि q_1 तथा q_2 के विपरीत चिह्न हैं तब $\mathbf{F}_{21}$, $-\hat{\mathbf{r}}_{21}$ के अनुदिश है, जो आकर्षण को प्रदर्शित करता है तथा विजातीय आवेशों के लिए हम इसी की आशा करते हैं। इस प्रकार हमें सजातीय तथा विजातीय आवेशों के प्रकरणों के लिए पृथक-पृथक समीकरण लिखने की आवश्यकता नहीं है। समीकरण (1.3) दोनों ही प्रकरणों को सही-सही प्रकट कर देती है [चित्र 1.6(b) देखिए]।
- q_2 के कारण q_1 पर आरोपित बल $\mathbf{F}_{12}$ को समीकरण (1.3) में 1 तथा 2 में सरल अंतर्परिवर्तन करके प्राप्त किया जा सकता है, अर्थात

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r_{12}^2}\hat{\mathbf{r}}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$$

इस प्रकार, कूलॉम नियम न्यूटन के गति के तृतीय नियम के अनुरूप ही है।

- कूलॉम नियम (समीकरण 1.3) से निर्वात में स्थित दो आवेशों q_1 तथा q_2 के बीच आरोपित बल प्राप्त होता है। यदि आवेश किसी द्रव्य में स्थित हैं अथवा दोनों आवेशों के बीच के रिक्त स्थान में कोई द्रव्य भरा है, तब इस द्रव्य के आवेशित अवयवों के कारण स्थिति जटिल बन जाती है। अगले अध्याय में हम द्रव्य में स्थिरवैद्युतिकी पर विचार करेंगे।

© NCERT not to be republished

उदाहरण 1.4 दो वैद्युत आवेशों के बीच स्थिर वैद्युत बल के लिए कूलॉम नियम तथा दो स्थिर बिंदु द्रव्यमानों के बीच गुरुत्वाकर्षण बल के लिए न्यूटन का नियम दोनों में ही बल आवेशों/द्रव्यमानों के बीच की दूरी के वर्ग के व्युत्क्रमानुपाती होता है। (a) इन दोनों बलों के परिमाण ज्ञात करके इनकी प्रबलताओं की तुलना की जाए (i) एक इलेक्ट्रॉन तथा एक प्रोटॉन के लिए, (ii) दो प्रोटॉनों के लिए। (b) इलेक्ट्रॉन तथा प्रोटॉन में पारस्परिक आकर्षण के वैद्युत बल के कारण इलेक्ट्रॉन तथा प्रोटॉन के त्वरण आकलित कीजिए जबकि इनके बीच की दूरी 1 Å (= 10^{-10} m) है। ($m_p = 1.67 \times 10^{-27}$ K, $m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg)

हल

(a) (i) एक इलेक्ट्रॉन तथा एक प्रोटॉन के बीच वैद्युत बल जबकि इनके बीच की दूरी r है :

$$F_e = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r^2}$$

यहाँ पर ऋणात्मक चिह्न आकर्षण बल को इंगित करता है। इसके तदनुरूपी गुरुत्वाकर्षण बल (जो सदैव धनात्मक है) :

$$F_G = -G\frac{m_p\ m_e}{r^2}$$

यहाँ m_p तथा m_e क्रमशः प्रोटॉन तथा इलेक्ट्रॉन के द्रव्यमान हैं।

$$\left|\frac{F_e}{F_G}\right| = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 G m_p m_e} = 2.4 \times 10^{39}$$

(ii) इसी प्रकार r दूरी पर स्थित दो प्रोटॉनों के बीच वैद्युत बल तथा गुरुत्वाकर्षण बल के परिमाणों का अनुपात–

$$\left|\frac{F_e}{F_G}\right| = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 G m_p m_p} = 1.3 \times 10^{36}$$

तथापि यहाँ यह उल्लेख करना महत्वपूर्ण है कि यहाँ पर दो बलों के चिह्नों में अंतर है। दो प्रोटॉनों के लिए गुरुत्वाकर्षण बल आकर्षी है तथा कूलॉम बल प्रतिकर्षी है। नाभिक के भीतर इन बलों के वास्तविक मान (नाभिक के भीतर दो प्रोटॉनों के बीच की दूरी ~ 10^{-15} m है): $F_e \sim 230$ N है जबकि $F_G \sim 1.9 \times 10^{-34}$ N हैं।
इन दोनों बलों का (विमाहीन) अनुपात यह दर्शाता है कि गुरुत्वाकर्षण बल की तुलना में वैद्युत बल अत्यंत प्रबल होते हैं।

(b) एक प्रोटॉन द्वारा एक इलेक्ट्रॉन पर आरोपित वैद्युत बल **F** परिमाण में एक इलेक्ट्रॉन द्वारा एक प्रोटॉन पर आरोपित बल समान है; तथापि इलेक्ट्रॉन तथा प्रोटॉन के द्रव्यमान भिन्न होते हैं। इस प्रकार बल का परिमाण है

$$|\mathbf{F}| = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r^2} = 8.987 \times 10^9\ \text{Nm}^2/\text{C}^2 \times (1.6 \times 10^{-19}\text{C})^2 / (10^{-10}\text{m})^2$$
$$= 2.3 \times 10^{-8}\ \text{N}$$

न्यूटन के गति के दूसरे नियम $F = ma$ के अनुसार इलेक्ट्रॉन में उत्पन्न त्वरण
$a = 2.3 \times 10^{-8}\ \text{N} / 9.11 \times 10^{-31}\ \text{kg} = 2.5 \times 10^{22}\ \text{m/s}^2$
इसकी गुरुत्वीय त्वरण से तुलना करने पर हम यह निष्कर्ष निकाल सकते हैं कि इलेक्ट्रॉन की गति पर गुरुत्वीय क्षेत्र का प्रभाव नगण्य है तथा किसी प्रोटॉन द्वारा इलेक्ट्रॉन पर आरोपित कूलॉम बल की क्रिया के अधीन इलेक्ट्रॉन में उत्पन्न त्वरण अत्यधिक है।

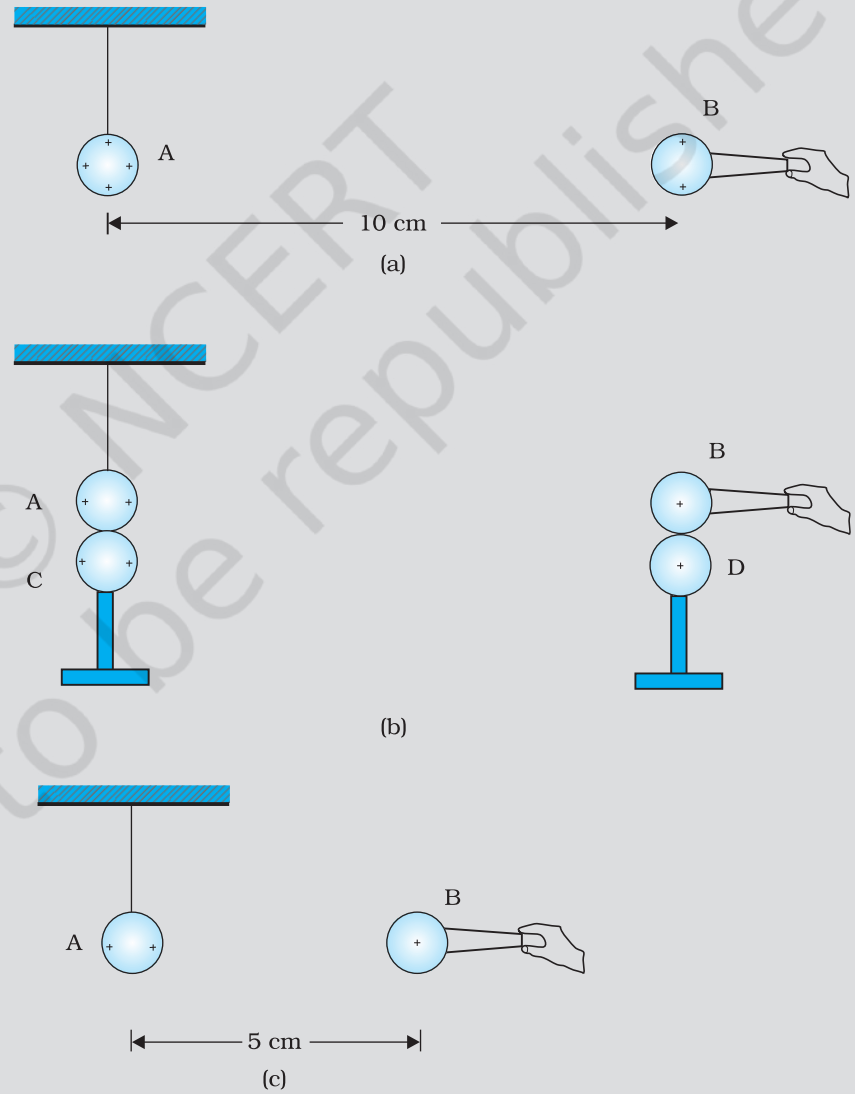
प्रोटॉन के लिए त्वरण का मान
$2.3 \times 10^{-8}\ \text{N} / 1.67 \times 10^{-27}\ \text{kg} = 1.4 \times 10^{19}\ \text{m/s}^2$ है।

उदाहरण 1.4

भौतिकी
कूलॉम के नियम का प्रभावी सजीव चित्रण
http://webphysics.davidson.edu/physlet_resources/bu_semester2/menu_semester2.html

© NCERT not to be republished

उदाहरण 1.5 धातु का आवेशित गोला A नाइलॉन के धागे से निलंबित है। विद्युतरोधी हत्थी द्वारा किसी अन्य धातु के आवेशित गोले B को A के इतने निकट लाया जाता है कि चित्र 1.7(a) में दर्शाए अनुसार इनके केंद्रों के बीच की दूरी 10 cm है। गोले A के परिणामी प्रतिकर्षण को नोट किया जाता है (उदाहरणार्थ– गोले पर चमकीला प्रकाश पुंज डालकर तथा अंशांकित पर्दे पर बनी इसकी छाया का विक्षेपण मापकर)। A तथा B गोलों को चित्र 1.7(b) में दर्शाए अनुसार, क्रमशः अनावेशित गोलों C तथा D से स्पर्श कराया जाता है। तत्पश्चात चित्र 1.7(c) में दर्शाए अनुसार C तथा D को हटाकर B को A के इतना निकट लाया जाता है कि इनके केंद्रों के बीच की दूरी 5.0 cm हो जाती है। कूलॉम नियम के अनुसार A का कितना अपेक्षित प्रतिकर्षण है? गोले A तथा C एवं गोले B तथा D के साइज़ सर्वसम हैं। A तथा B के केंद्रों के पृथकन की तुलना में इनके साइज़ों की उपेक्षा कीजिए।



चित्र 1.7

हल मान लीजिए गोले A पर मूल आवेश q तथा गोले B पर मूल आवेश q' है। दोनों गोलों के केंद्रों

उदाहरण 1.5

© NCERT not to be republished

उदाहरण 1.5

के बीच दूरी r पर, प्रत्येक पर लगे स्थिर वैद्युत बल का परिमाण

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qq'}{r^2}$$

यहाँ r की तुलना में गोलों A तथा B के साइज़ नगण्य हैं। जब कोई सर्वसम परंतु अनावेशित गोला C गोले A को स्पर्श करता है तो A तथा C पर आवेश का पुनर्वितरण होता है और सममिति द्वारा प्रत्येक गोले पर आवेश $(q/2)$ होता है। इसी प्रकार, B तथा D के स्पर्श के पश्चात इनमें प्रत्येक पर पुनर्वितरित आवेश $(q'/2)$ होता है। अब यदि A तथा B का पृथकन आधा रह जाए तो प्रत्येक पर स्थिरवैद्युत बल

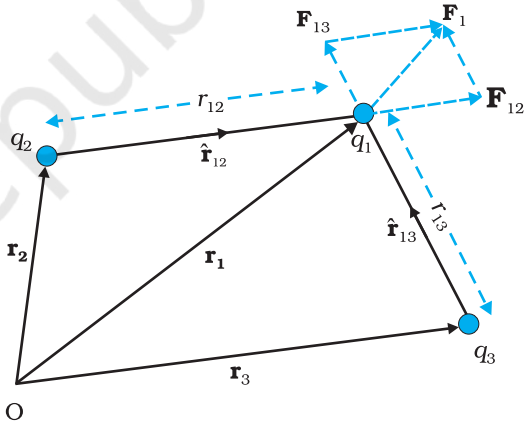
$$F' = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{(q/2)(q'/2)}{(r/2)^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{(qq')}{r^2} = F$$

इस प्रकार B के कारण A पर स्थिरवैद्युत बल अपरिवर्तित रहता है।

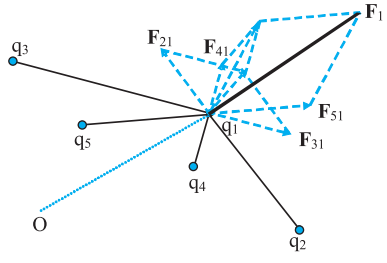
1.7 बहुल आवेशों के बीच बल

दो आवेशों के बीच पारस्परिक वैद्युत बल कूलॉम नियम द्वारा प्राप्त होता है। उस स्थिति में किसी आवेश पर आरोपित बल का परिकलन कैसे करें, जहाँ उसके निकट एक आवेश न होकर उसे बहुत से आवेश चारों ओर से घेरे हों? निर्वात में स्थित n स्थिर आवेशों $q_1, q_2, q_3, \ldots, q_n$ के निकाय पर विचार कीजिए। q_1 पर $q_2, q_3, \ldots, q_n$ के कारण कितना बल लगता है? इसका उत्तर देने के लिए कूलॉम नियम पर्याप्त नहीं है। याद कीजिए, यांत्रिक मूल के बलों का संयोजन सदिशों के संयोजन के समांतर चतुर्भुज नियम द्वारा किया जाता है। क्या यही स्थिरवैद्युत मूल के बलों पर भी लागू होता है?

प्रयोगों द्वारा यह सत्यापित हो चुका है कि *किसी आवेश पर कई अन्य आवेशों के कारण बल उस आवेश पर लगे उन सभी बलों के सदिश योग के बराबर होता है जो इन आवेशों द्वारा इस आवेश पर एक-एक कर लगाया जाता है। किसी एक आवेश द्वारा लगाया गया विशिष्ट बल अन्य आवेशों की उपस्थिति के कारण प्रभावित नहीं होता। इसे अध्यारोपण का सिद्धांत कहते हैं।*



(a)



(b)

चित्र 1.8 (a) तीन आवेशों (b) बहुल आवेशों के निकाय।

इस अवधारणा को भलीभाँति समझने के लिए तीन आवेशों q_1, q_2 तथा q_3 के निकाय, जिसे चित्र 1.8(a) में दर्शाया गया है, पर विचार कीजिए। किसी एक आवेश, जैसे q_1 पर अन्य दो आवेशों q_2 तथा q_3 के कारण बल को इनमें से प्रत्येक आवेश के कारण लगे बलों का सदिश संयोजन करके प्राप्त किया जा सकता है। इस प्रकार यदि q_2 के कारण q_1 पर बल को $\mathbf{F}_{12}$ द्वारा निर्दिष्ट किया जाता है, तो $\mathbf{F}_{12}$ को समीकरण (1.3) द्वारा अन्य आवेशों की उपस्थिति होते हुए भी इस प्रकार व्यक्त किया जाता है :

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1q_2}{r_{12}^2}\hat{\mathbf{r}}_{12}$$

इसी प्रकार q_3 के कारण q_1 पर लगा कूलॉम बल जिसे $\mathbf{F}_{13}$ द्वारा निर्दिष्ट करते हैं तथा जिसे लिख सकते हैं

$$\mathbf{F}_{13} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1q_3}{r_{13}^2}\hat{\mathbf{r}}_{13}$$

© NCERT not to be republished

यह भी q_3 के कारण q_1 पर लगा कूलॉम बल ही है, जबकि अन्य आवेश q_2 उपस्थित हैं।

इस प्रकार q_1 पर दो आवेशों q_2 तथा q_3 के कारण कुल बल $\mathbf{F}_1$ है

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{13} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r_{12}^2}\hat{\mathbf{r}}_{12} + \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_3}{r_{13}^2}\hat{\mathbf{r}}_{13} \tag{1.4}$$

चित्र 1.8(b) में दर्शाए अनुसार तीन से अधिक आवेशों के निकाय के लिए उपरोक्त परिकलन का व्यापकीकरण किया जा सकता है।

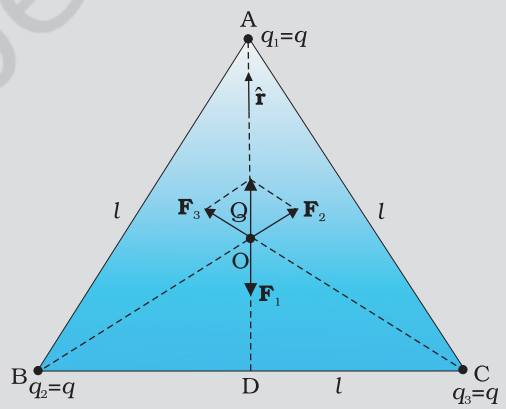
अध्यारोपण के सिद्धांत के अनुसार आवेशों q_1, q_2, ..., q_n के किसी निकाय में आवेश q_1 पर q_2 द्वारा लगा बल कूलॉम नियम द्वारा लगे बल के समान होता है, अर्थात यह अन्य आवेशों q_3, q_4, ..., q_n की उपस्थिति से प्रभावित नहीं होता। आवेश q_1 पर सभी आवेशों द्वारा लगा कुल बल $\mathbf{F}_1$ तब $\mathbf{F}_{12}$, $\mathbf{F}_{13}$, ..., $\mathbf{F}_{1n}$ का सदिश योग होगा। अत:

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{13} + \ldots + \mathbf{F}_{1n} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{q_1 q_2}{r_{12}^2}\hat{\mathbf{r}}_{12} + \frac{q_1 q_3}{r_{13}^2}\hat{\mathbf{r}}_{13} + \ldots + \frac{q_1 q_n}{r_{1n}^2}\hat{\mathbf{r}}_{1n}\right]$$

$$= \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0}\sum_{i=2}^{n}\frac{q_i}{r_{1i}^2}\hat{\mathbf{r}}_{1i} \tag{1.5}$$

सदिशों के संयोजन की सामान्य विधि, समांतर चतुर्भुज के नियम द्वारा सदिश योग प्राप्त किया जाता है। वास्तव में मूल रूप से समस्त स्थिरवैद्युतिकी कूलॉम नियम तथा अध्यारोपण के सिद्धांत का एक परिणाम है।

उदाहरण 1.6 तीन आवेशों q_1, q_2, q_3 पर विचार कीजिए जिनमें प्रत्येक q के बराबर है तथा l भुजा वाले समबाहु त्रिभुज के शीर्षों पर स्थित है। त्रिभुज के केंद्रक पर चित्र 1.9 में दर्शाए अनुसार स्थित आवेश Q (जो q का सजातीय) पर कितना परिणामी बल लग रहा है?



चित्र 1.9

हल दिए गए l भुजा के समबाहु त्रिभुज ABC में यदि हम भुजा BC पर AD लंब खींचें तो AD = AC cos 30º = $(\sqrt{3}/2)\,l$ तथा A से केंद्रक की दूरी AD = (2/3) AD = $(1/\sqrt{3})l$ सममिति से AO = BO = CO

उदाहरण 1.6

© NCERT not to be republished

उदाहरण 1.6

इस प्रकार

A पर स्थित आवेश q के कारण Q पर बल, $\mathbf{F}_1 = \frac{3}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Qq}{l^2}$ AO के अनुदिश

B पर स्थित आवेश q के कारण Q पर बल, $\mathbf{F}_2 = \frac{3}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Qq}{l^2}$ BO के अनुदिश

C पर स्थित आवेश q के कारण Q पर बल, $\mathbf{F}_3 = \frac{3}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Qq}{l^2}$ CO के अनुदिश

बलों $\mathbf{F}_2$ तथा $\mathbf{F}_3$ का परिणामी समांतर चतुर्भुज नियम द्वारा $\frac{3}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Qq}{l^2}$ OA के अनुदिश है।

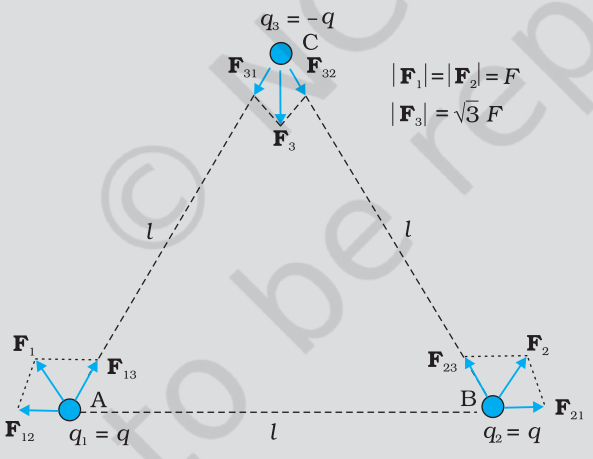
इसीलिए, Q पर कुल बल $= \frac{3}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Qq}{l^2}(\hat{\mathbf{r}} - \hat{\mathbf{r}}) = 0$ यहाँ $\hat{\mathbf{r}}$, OA के अनुदिश एकांक सदिश है।

सममिति द्वारा भी यह स्पष्ट है कि उन तीनों बलों का योग शून्य होगा।

मान लीजिए परिणामी बल शून्येतर था परंतु किसी दिशा में था। विचार कीजिए कि क्या हुआ होता यदि इस निकाय को O के गिर्द (परितः) 60º पर घूर्णन कराया जाता।

उदाहरण 1.7

उदाहरण 1.7 चित्र 1.10 में दर्शाए अनुसार किसी समबाहु त्रिभुज के शीर्षों पर स्थित आवेशों q, q, तथा $-q$ पर विचार कीजिए। प्रत्येक आवेश पर कितना बल लग रहा है?



चित्र 1.10

हल चित्र 1.10 में दर्शाए अनुसार, A पर स्थित आवेश q पर अन्य आवेशों जैसे B पर स्थित q के कारण बल $\mathbf{F}_{12}$ BA के अनुदिश तथा C पर स्थित $-q$ के कारण बल $\mathbf{F}_{13}$ AC के अनुदिश है। समांतर चतुर्भुज नियम द्वारा A पर स्थित q पर कुल बल $\mathbf{F}_1$ है

$\mathbf{F}_1 = F\,\hat{\mathbf{r}}_1$ यहाँ $\hat{\mathbf{r}}_1$ BC के अनुदिश एकांक सदिश है।

आवेशों के प्रत्येक युगल के लिए आकर्षण अथवा प्रतिकर्षण बलों के परिमाण F समान हैं तथा

$$F = \frac{q^2}{4\pi\varepsilon_0 l^2}$$

इस प्रकार B पर स्थित आवेश q पर कुल बल $\mathbf{F}_2 = F\,\hat{\mathbf{r}}_2$ यहाँ $\hat{\mathbf{r}}_2$ AC के अनुदिश एकांक सदिश है।

© NCERT not to be republished

उदाहरण 1.7

इसी प्रकार, C पर स्थित आवेश $-q$ पर कुल बल $\mathbf{F}_3 = \sqrt{3}\ F\hat{\mathbf{n}}$ है। यहाँ $\hat{\mathbf{n}}$ एकांक सदिश है जिसकी दिशा $\angle BCA$ को समद्विभाजित करने वाली रेखा के अनुदिश है।

यहाँ रोचक बात यह है कि तीनों आवेशों पर लगे बलों का योग शून्य है, अर्थात

$\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \mathbf{F}_3 = 0$

यह परिणाम चौंकाने वाला नहीं है। यह इस तथ्य का अनुसरण करता है कि कूलॉम नियम तथा न्यूटन के तृतीय नियम के बीच सामंजस्य है। इस कथन की निष्पत्ति आपके अभ्यास के लिए छोड़ी जा रही है।

1.8 विद्युत क्षेत्र

माना निर्वात में एक बिंदु आवेश Q मूल बिंदु O पर रखा है। यदि एक अन्य बिंदु आवेश q, बिंदु P पर रखा जाए, जहाँ $\mathbf{OP} = \mathbf{r}$, तो आवेश Q, q पर कूलॉम के नियमानुसार बल लगाएगा। हम यह प्रश्न पूछ सकते हैं : यदि आवेश q को हटा लें तो Q के परिवेश में क्या बचेगा? क्या कुछ भी नहीं बचेगा? यदि ऐसा है तो P पर आवेश q रखने पर इस पर बल कैसे लगता है? इस प्रकार के प्रश्नों का उत्तर देने के लिए प्रारंभिक वैज्ञानिकों ने क्षेत्र की अवधारणा प्रस्तुत की। इसके अनुसार हम कहते हैं कि आवेश Q अपने चारों ओर विद्युत क्षेत्र उत्पन्न करता है जब इसमें कोई अन्य आवेश q बिंदु P पर लाया जाता है तो क्षेत्र इस पर बल आरोपित करता है।

किसी बिंदु $\mathbf{r}$ पर आवेश Q द्वारा उत्पन्न विद्युत क्षेत्र

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r^2}\hat{\mathbf{r}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r^2}\hat{\mathbf{r}} \qquad (1.6)$$

यहाँ $\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{r}/r$, मूल बिंदु से बिंदु $\mathbf{r}$ तक मात्रक सदिश है। इस प्रकार, समीकरण (1.6) स्थिति सदिश $\mathbf{r}$ के प्रत्येक मान के लिए विद्युत क्षेत्र का संगत मान बताती है। शब्द 'क्षेत्र' यह बताता है कि किस प्रकार कोई वितरित राशि (जो सदिश अथवा अदिश हो सकती है) स्थिति के साथ परिवर्तित होती है। आवेश के प्रभाव को विद्युत क्षेत्र के अस्तित्व में समाविष्ट किया गया है। आवेश Q द्वारा आवेश q पर आरोपित बल $\mathbf{F}$ को हम इस प्रकार प्राप्त करते हैं :

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Qq}{r^2}\hat{\mathbf{r}} \qquad (1.7)$$

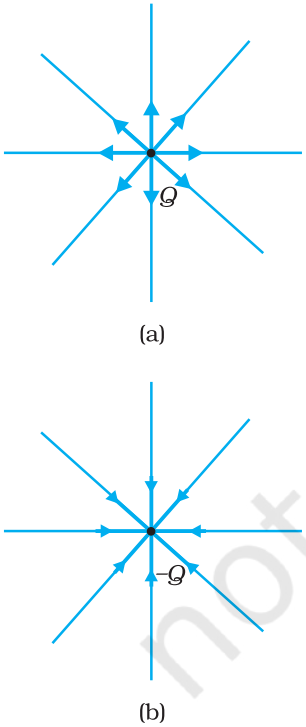
ध्यान दीजिए आवेश q भी आवेश Q पर परिमाण में समान परंतु दिशा में विपरीत बल आरोपित करता है। Q तथा q आवेशों के बीच स्थिरवैद्युत बल को हम आवेश q तथा Q के विद्युत क्षेत्र के बीच अन्योन्य क्रिया अथवा विलोमतः के रूप में समझ सकते हैं। यदि हम आवेश q की स्थिति को सदिश $\mathbf{r}$ द्वारा निर्दिष्ट करें, तो यह q की अवस्थिति पर एक बल $\mathbf{F}$ का अनुभव करता है जो आवेश q तथा विद्युत क्षेत्र $\mathbf{E}$ के गुणनफल के बराबर है। इस प्रकार

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = q\,\mathbf{E}(\mathbf{r}) \qquad (1.8)$$

समीकरण (1.8) विद्युत क्षेत्र के SI मात्रक को N/C* के रूप में परिभाषित करती है।

यहाँ कुछ महत्वपूर्ण टिप्पणियाँ की जा सकती हैं:

(i) समीकरण (1.8) से यह निष्कर्ष निकाला जा सकता है कि यदि q एकांक है तो आवेश Q के कारण विद्युत क्षेत्र का आंकिक मान इसके द्वारा आरोपित बल के बराबर होता है। इस प्रकार *दिक्स्थान में किसी बिंदु पर आवेश Q के कारण विद्युत क्षेत्र को उस बल के रूप में परिभाषित किया जा सकता है जिसे कोई एकांक धनावेश उस बिंदु पर रखे जाने पर अनुभव करता है।*



चित्र 1.11 (a) आवेश Q के कारण विद्युत क्षेत्र, (b) आवेश $-Q$ के कारण विद्युत क्षेत्र।

* अगले अध्याय में विद्युत क्षेत्र के लिए एक अन्य वैकल्पिक मात्रक V/m पर विचार किया जाएगा।

© NCERT not to be republished

वह आवेश Q जो विद्युत क्षेत्र उत्पन्न कर रहा है *स्रोत आवेश* कहलाता है तथा आवेश q जो स्रोत आवेश के प्रभाव का परीक्षण करता है, को *परीक्षण आवेश* कहते हैं। ध्यान दीजिए स्रोत आवेश को अपनी मूल अवस्थिति पर ही रहना चाहिए। तथापि, यदि किसी आवेश q को Q के चारों ओर कहीं लाया जाता है, तो Q स्वयं भी आवेश q के कारण वैद्युत बल का अनुभव करने के लिए बाध्य है और उसमें गति करने की प्रवृत्ति होगी। इससे मुक्ति का केवल एक ही उपाय है कि हम q को उपेक्षणीय छोटा बनाएँ, तब बल $\mathbf{F}$ उपेक्षणीय छोटा होता है परंतु अनुपात $\mathbf{F}/q$ एक परिमित राशि होती है तथा विद्युत क्षेत्र को पारिभाषित करती है :

$$\mathbf{E} = \lim_{q \to 0} \left(\frac{\mathbf{F}}{q} \right) \tag{1.9}$$

इस समस्या (आवेश Q को आवेश q की उपस्थिति के कारण विक्षुब्ध न होने देना) से मुक्ति का एक व्यावहारिक उपाय यह है कि आवेश Q की किन्हीं अनिर्दिष्ट बलों द्वारा अपनी अवस्थिति पर बाँधे रखा जाए। यह विलक्षण प्रतीत हो सकता है, परंतु व्यवहार में ऐसा ही होता है। जब हम आवेशित की समतल चादर के कारण परीक्षण आवेश q पर लगे वैद्युत बल पर विचार करते हैं (अनुच्छेद 1.15), तब चादर पर आवेश, चादर के भीतर अनिर्दिष्ट आवेशित अवयवों द्वारा लगे बलों के कारण अपनी अवस्थितियों पर ही बँधे रहते हैं।

(ii) ध्यान दीजिए, आवेश Q के कारण विद्युत क्षेत्र $\mathbf{E}$ की परिभाषा यद्यपि प्रभावी रूप से परीक्षण आवेश q के पदों में की जाती है, तथापि यह q पर निर्भर नहीं करती है। इसका कारण यह है कि बल $\mathbf{F}$ आवेश q के अनुक्रमानुपाती है, इसलिए अनुपात $\mathbf{F}/q$ आवेश q पर निर्भर नहीं करता है। Q के कारण q पर बल आवेश q की किसी विशेष अवस्थिति से आवेश Q के चारों ओर के दिक्स्थान में कहीं भी हो सकती है। इस प्रकार Q के कारण विद्युत क्षेत्र $\mathbf{E}$ दिक्स्थान निर्देशांक $\mathbf{r}$ पर भी निर्भर करता है। सारे दिक्स्थान में आवेश की विभिन्न स्थितियों के लिए हमें विद्युत क्षेत्र $\mathbf{E}$ के भिन्न मान प्राप्त होते हैं। विद्युत क्षेत्र का अस्तित्व त्रिविमीय दिक्स्थान के प्रत्येक बिंदु पर होता है।

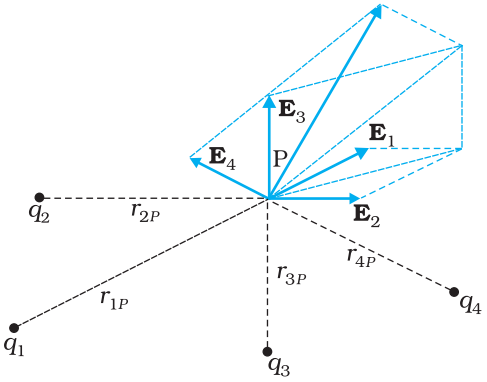
(iii) धनावेश के कारण विद्युत क्षेत्र आवेश से बाहर की ओर उन्मुख त्रिज्यीय होता है। इसके विपरीत, यदि स्रोत आवेश ऋणात्मक है तो विद्युत क्षेत्र सदिश, हर बिंदु पर त्रिज्यीय, किंतु अंदर की ओर उन्मुख होता है।

(iv) चूँकि आवेश Q के कारण आवेश q पर लगे बल $\mathbf{F}$ का परिमाण केवल आवेश Q से आवेश q के बीच की दूरी r पर निर्भर करता है, विद्युत क्षेत्र $\mathbf{E}$ का परिमाण भी केवल दूरी r पर निर्भर करता है। इस प्रकार, आवेश Q से समान दूरियों पर इसके कारण उत्पन्न विद्युत क्षेत्र $\mathbf{E}$ का परिमाण समान होता है। इस प्रकार किसी गोले के केंद्र पर स्थित बिंदु आवेश के कारण विद्युत क्षेत्र $\mathbf{E}$ का परिमाण उसके पृष्ठ के हर बिंदु पर समान होता है; दूसरे शब्दों में, वह क्षेत्र गोलीय रूप से सममित होता है।

1.8.1 आवेशों के निकाय के कारण विद्युत क्षेत्र

आइए, $q_1, q_2, \ldots, q_n$ आवेशों के एक निकाय पर विचार करते हैं जिनके किसी मूल बिंदु O के सापेक्ष स्थिति सदिश क्रमशः $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \ldots, \mathbf{r}_n$ हैं। किसी एकल आवेश के कारण दिक्स्थान के किसी बिंदु पर विद्युत क्षेत्र की ही भाँति आवेशों के निकाय के कारण दिक्स्थान के किसी बिंदु पर विद्युत क्षेत्र को उस बिंदु पर रखे किसी एकांक धनावेश द्वारा अनुभव किए जाने वाले बल द्वारा परिभाषित किया जाता है। यहाँ यह माना जाता है कि एकांक आवेश के कारण $q_1, q_2, \ldots, q_n$ आवेशों की मूल स्थितियाँ विक्षुब्ध नहीं होतीं। बिंदु P, जिसे स्थिति सदिश $\mathbf{r}$ द्वारा निर्दिष्ट किया जाता है, पर विद्युत क्षेत्र को निर्धारित करने के लिए हम कूलॉम नियम तथा अध्यारोपण के सिद्धांत का उपयोग करते हैं।

© NCERT not to be republished



चित्र 1.12 आवेशों के निकाय के कारण किसी बिंदु पर वैद्युत क्षेत्र पृथक-पृथक आवेशों के कारण उस बिंदु पर वैद्युत क्षेत्रों के सदिश योग के बराबर होता है।

$\mathbf{r}_1$ पर स्थित आवेश q_1 के कारण अवस्थिति $\mathbf{r}$ पर विद्युत क्षेत्र $\mathbf{E}_1$ इस प्रकार व्यक्त किया जाता है।

$$\mathbf{E}_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1}{r_{1P}}\hat{\mathbf{r}}_{1P}$$

यहाँ $\hat{\mathbf{r}}_{1P}$ आवेश q_1 से P की दिशा में एकांक सदिश है तथा r_{1P} आवेश q_1 तथा P के बीच की दूरी है। इसी प्रकार $\mathbf{r}_2$ पर स्थित आवेश q_2 के कारण अवस्थिति $\mathbf{r}$ पर विद्युत क्षेत्र $\mathbf{E}_2$ को इस प्रकार व्यक्त करते हैं

$$\mathbf{E}_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_2}{r_{2P}}\hat{\mathbf{r}}_{2P}$$

यहाँ $\hat{\mathbf{r}}_{2P}$ आवेश q_2 से P की दिशा में एकांक सदिश है तथा r_{2P} आवेश q_2 तथा P के बीच की दूरी है। इसी प्रकार के व्यंजक q_3, q_4, ..., q_n आवेशों के विद्युत क्षेत्रों $\mathbf{E}_3$, $\mathbf{E}_4$, ..., $\mathbf{E}_n$ लिखे जा सकते हैं। अध्यारोपण सिद्धांत द्वारा आवेशों के निकाय के कारण $\mathbf{r}$ पर विद्युत क्षेत्र (चित्र 1.12 में दर्शाए अनुसार) इस प्रकार व्यक्त किया जा सकता है–

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_1(\mathbf{r}) + \mathbf{E}_2(\mathbf{r}) + \ldots + \mathbf{E}_n(\mathbf{r})$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1}{r_{1P}^2}\hat{\mathbf{r}}_{1P} + \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_2}{r_{2P}^2}\hat{\mathbf{r}}_{2P} + \ldots + \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_n}{r_{nP}^2}\hat{\mathbf{r}}_{nP}$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{n}\frac{q_i}{r_{iP}^2}\hat{\mathbf{r}}_{iP} \qquad (1.10)$$

$\mathbf{E}$ एक सदिश राशि है जिसका मान दिक्स्थान में एक बिंदु से दूसरे बिंदु पर जाने पर परिवर्तित हो जाता है तथा यह स्रोत आवेशों की स्थितियों से निर्धारित होता है।

1.8.2 विद्युत क्षेत्र का भौतिक अभिप्राय

आपको आश्चर्य हो सकता है कि हमें यहाँ विद्युत क्षेत्र की धारणा से परिचित क्यों कराया जा रहा है। वैसे भी, आवेशों के किसी भी निकाय के लिए मापने योग्य राशि किसी आवेश पर लगा बल है जिसे सीधे ही कूलॉम नियम तथा अध्यारोपण सिद्धांत द्वारा (समीकरण 1.5) निर्धारित किया जा सकता है। फिर विद्युत क्षेत्र नामक इस मध्यवर्ती राशि को प्रस्तावित क्यों किया जा रहा है?

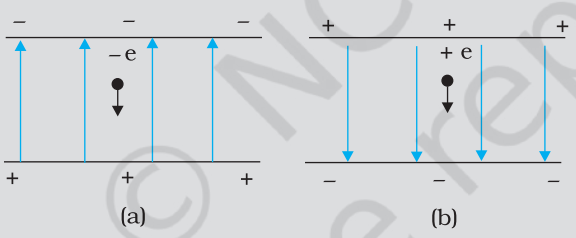
स्थिरवैद्युतिकी के लिए विद्युत क्षेत्र की अभिधारणा सुगम तो है पर वास्तव में आवश्यक नहीं है। विद्युत क्षेत्र आवेशों के किसी निकाय के वैद्युत पर्यावरण को अभिलक्षित करने का सुरुचि संपन्न उपाय है। आवेशों के निकाय के चारों ओर के दिक्स्थान में किसी बिंदु पर विद्युत क्षेत्र आपको यह बताता है कि निकाय को विक्षुब्ध किए बिना यदि इस बिंदु पर कोई एकांक धनात्मक परीक्षण आवेश रखे तो वह कितना बल अनुभव करेगा। विद्युत क्षेत्र आवेशों के निकाय का एक अभिलक्षण है तथा विद्युत क्षेत्र के निर्धारण के लिए आपके द्वारा उस बिंदु पर रखे जाने वाले परीक्षण आवेश पर निर्भर नहीं करता। भौतिकी में *क्षेत्र* शब्द का उपयोग व्यापक रूप से उस राशि को निर्दिष्ट करने के लिए किया जाता है, जो दिक्स्थान के प्रत्येक बिंदु पर पारिभाषित की जा सके तथा एक बिंदु से दूसरे बिंदु पर परिवर्तित होती हो। चूँकि बल सदिश राशि है, अतः विद्युत क्षेत्र एक सदिश राशि है।

तथापि विद्युत क्षेत्र की अभिधारणा की वास्तविक भौतिक सार्थकता तभी प्रकट होती है जब हम स्थिरवैद्युतिकी से बाहर निकलकर कालाश्रित वैद्युतचुंबकीय परिघटनाओं से व्यवहार करते हैं। मान लीजिए हम त्वरित गति से गतिमान दो दूरस्थ आवेशों q_1 तथा q_2 के बीच लगे बल पर विचार करते हैं। अब, वह अधिकतम चाल जिससे कोई संकेत अथवा सूचना एक स्थान से दूसरे स्थान तक

© NCERT not to be republished

जा सकती है, वह प्रकाश की चाल c है। इस प्रकार, q_2 पर q_1 की किसी गति का प्रभाव तात्क्षणिक उत्पन्न नहीं हो सकता। कारण (q_1 की गति) तथा प्रभाव (q_2 पर बल) के बीच कुछ न कुछ काल विलंब अवश्य होता है। यहीं पर सार्थक रूप में विद्युत क्षेत्र (सही अर्थों में वैद्युतचुंबकीय क्षेत्र) की अवधारणा स्वाभाविक एवं अति उपयोगी है। क्षेत्र का चित्रण इस प्रकार है: *आवेश q_1 की त्वरित गति वैद्युतचुंबकीय तरंगें उत्पन्न करती है जो फिर प्रकाश की चाल से फैलकर q_2 तक पहुँचती है तथा q_2 पर बल लगाती है।* क्षेत्र की अवधारणा काल विलंब का सुचारु रूप से स्पष्टीकरण करती है। इस प्रकार, यद्यपि वैद्युत तथा चुंबकीय बलों की संसूचना केवल आवेशों पर इनके प्रभावों (बलों) द्वारा ही की जा सकती है, उन्हें भौतिक सत्व माना जाता है, ये मात्र गणितीय रचनाएँ ही नहीं हैं। इनकी अपनी *स्वतंत्र गतिकी* है, अर्थात ये अपने नियमों के अनुसार विकसित होते हैं। ये ऊर्जा का परिवहन भी कर सकते हैं। इस प्रकार, कालाश्रित वैद्युतचुंबकीय क्षेत्रों का कोई स्रोत जिसे अल्प समय अंतराल के लिए खोलकर फिर बंद किया जा सकता है, ऊर्जा परिवहन करने वाले वैद्युतचुंबकीय क्षेत्रों को पीछे छोड़ देता है। क्षेत्र की अवधारणा सर्वप्रथम फैराडे ने प्रस्तावित की थी जो भौतिकी की प्रमुख अवधारणाओं में स्थान रखती है।

उदाहरण 1.8 कोई इलेक्ट्रॉन 2.0×10^4 N C^{-1} परिमाण के एकसमान विद्युत क्षेत्र में 1.5 cm दूरी तक गिरता है [चित्र 1.13(a)]। क्षेत्र का परिमाण समान रखते हुए इसकी दिशा उत्क्रमित कर दी जाती है तथा अब कोई प्रोटॉन इस क्षेत्र में उतनी ही दूरी तक गिरता है [चित्र 1.13(b)]। दोनों प्रकरणों में गिरने में लगे समय की गणना कीजिए। इस परिस्थिति की 'गुरुत्व के अधीन मुक्त पतन' से तुलना कीजिए।



चित्र 1.13

हल चित्र 1.13(a) में क्षेत्र उपरिमुखी है, अत: ऋणावेशित इलेक्ट्रॉन eE परिमाण का अधोमुखी बल अनुभव करता है, यहाँ E विद्युत क्षेत्र का परिमाण है। अत: इलेक्ट्रॉन का त्वरण

$$a_e = eE/m_e$$

यहाँ m_e इलेक्ट्रॉन का द्रव्यमान है।

विरामावस्था से आरंभ करके, इलेक्ट्रॉन के मुक्त रूप से h दूरी तक गिरने में लगा समय

$$t_e = \sqrt{\frac{2h}{a_e}} = \sqrt{\frac{2hm_e}{eE}}$$

$e = 1.6 \times 10^{-19}$C, $m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg,

$E = 2.0 \times 10^4$ N C^{-1}, $h = 1.5 \times 10^{-2}$ m,

$t_e = 2.9 \times 10^{-9}$s

चित्र 1.13 (b) में क्षेत्र अधोमुखी है, अत: धनावेशित प्रोटॉन eE परिमाण का अधोमुखी बल अनुभव करता है। अत: प्रोटॉन का त्वरण

$$a_p = eE/m_p$$

यहाँ m_p प्रोटॉन का द्रव्यमान है; $m_p = 1.67 \times 10^{-27}$ kg। अत: प्रोटॉन द्वारा गिरने में लिया

उदाहरण 1.8

© NCERT not to be republished

गया समय $t_p = \sqrt{\frac{2h}{a_p}} = \sqrt{\frac{2hm_p}{eE}} = 1.3\times10^{-7}\,\text{s}$

इस प्रकार, समान दूरी गिरने में भारी कण (प्रोटॉन) अधिक समय लेता है। 'गुरुत्व के अधीन मुक्त पतन' और इस पतन में यही मूल विषमता है क्योंकि गुरुत्व के अधीन पतन में समय वस्तु के द्रव्यमान पर निर्भर नहीं करता। ध्यान दीजिए यहाँ हमने पतन का समय परिकलित करते समय गुरुत्वीय त्वरण की उपेक्षा की है। यह देखने के लिए कि क्या यह न्यायसंगत है, आइए दिए गए विद्युत क्षेत्र में प्रोटॉन का त्वरण परिकलित करते हैं :

उदाहरण 1.8

$$a_p = \frac{eE}{m_p}$$

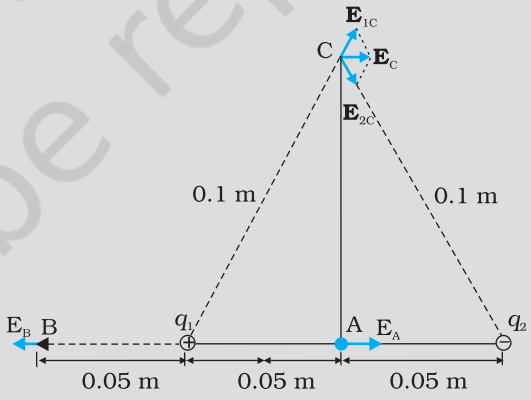
$$= \frac{(1.6 \times 10^{-19}\ \text{C}) \times (2.0 \times 10^{4}\ \text{N C}^{-1})}{1.67 \times 10^{-27}\ \text{kg}}$$

$$= 1.9 \times 10^{12}\ \text{m s}^{-2}$$

यह त्वरण गुरुत्वीय त्वरण ($9.8\ \text{m s}^{-2}$) की तुलना में अत्यंत विशाल है। इलेक्ट्रॉन का त्वरण तो इस त्वरण से भी अधिक है। इस प्रकार, इस उदाहरण में गुरुत्वीय त्वरण के प्रभाव की उपेक्षा की जा सकती है।

उदाहरण 1.9

उदाहरण 1.9 दो बिंदु आवेश q_1 तथा q_2 जिनके परिमाण क्रमशः $+10^{-8}$ C तथा -10^{-8} C हैं एक दूसरे से 0.1 m दूरी पर रखे हैं। चित्र 1.14 में दर्शाए बिंदुओं A, B तथा C पर विद्युत क्षेत्र परिकलित कीजिए।



चित्र 1.14

हल धनावेश q_1 के कारण A पर विद्युत क्षेत्र सदिश $\mathbf{E}_{1A}$ दाईं ओर निर्दिष्ट है तथा इसका परिमाण

$$E_{1A} = \frac{(9\times10^{9}\,\text{Nm}^2\text{C}^{-2})\times(10^{-8}\,\text{C})}{(0.05\,\text{m})^2} = 3.6 \times 10^{4}\ \text{N C}^{-1}$$

ऋणावेश q_2 के कारण A पर विद्युत क्षेत्र सदिश $\mathbf{E}_{2A}$ भी दाईं ओर निर्दिष्ट है तथा इसका परिमाण E_A के समान है। अतः A पर कुल विद्युत क्षेत्र $\mathbf{E}_A$ का परिमाण

$E_A = E_{1A} + E_{2A} = 7.2 \times 10^{4}\ \text{N C}^{-1}$ (यह दाईं ओर निर्दिष्ट है)

धनावेश q_1 के कारण B पर विद्युत क्षेत्र सदिश $\mathbf{E}_{1B}$ बाईं ओर निर्दिष्ट है तथा इसका परिमाण

© NCERT not to be republished

$$E_{1B} = \frac{(9\times10^{9}\,\mathrm{Nm^2C^{-2}})\times(10^{-8}\,\mathrm{C})}{(0.05\,\mathrm{m})^2} = 3.6\times10^{4}\ \mathrm{N\ C^{-1}}$$

ऋणावेश q_2 के कारण B पर विद्युत क्षेत्र सदिश $\mathbf{E}_{2B}$ दाईं ओर निर्दिष्ट है तथा इसका परिमाण

$$E_{2B} = \frac{(9\times10^{9}\,\mathrm{Nm^2C^{-2}})\times(10^{-8}\,\mathrm{C})}{(0.15\,\mathrm{m})^2} = 4\times10^{3}\ \mathrm{N\ C^{-1}}$$

B पर कुल विद्युत क्षेत्र का परिमाण

$E_B = E_{1B} - E_{2B} = 3.2\times10^{4}\ \mathrm{N\ C^{-1}}$ (यह बाईं ओर निर्दिष्ट है)

q_1 तथा q_2 में प्रत्येक के कारण बिंदु C पर विद्युत क्षेत्र सदिश का परिमाण समान है, अत:

$$E_{1C} = E_{2C} = \frac{(9\times10^{9}\,\mathrm{Nm^2C^{-2}})\times(10^{-8}\,\mathrm{C})}{(0.10\,\mathrm{m})^2} = 9\times10^{3}\ \mathrm{N\ C^{-1}}$$

इन दोनों सदिशों की दिशाएँ चित्र 1.14 में दर्शायी गई हैं। इन दो सदिशों के परिणामी सदिश का परिमाण

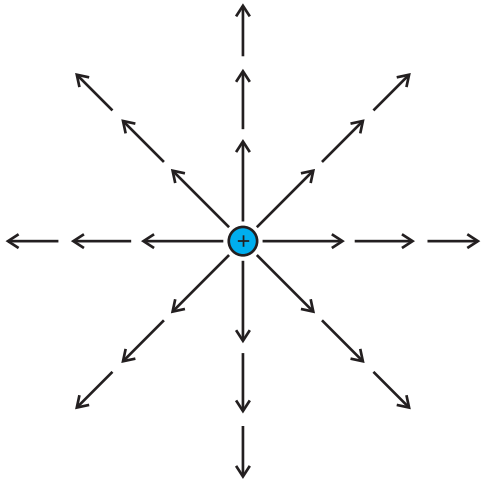
$$E_C = E_{1C}\cos\frac{\pi}{3} + E_{2C}\cos\frac{\pi}{3} = 9\times10^{3}\ \mathrm{N\ C^{-1}}$$

E_c दाईं ओर निर्दिष्ट है।

उदाहरण 1.9

1.9 विद्युत क्षेत्र रेखाएँ

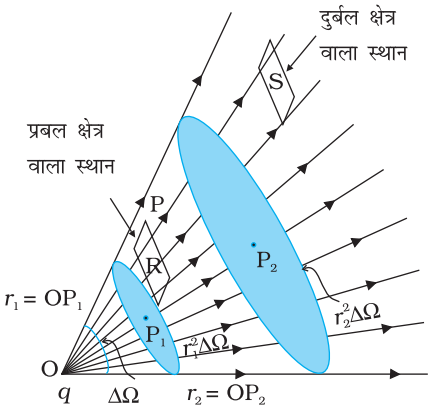
पिछले अनुभाग में हमने विद्युत क्षेत्र का अध्ययन किया। यह एक सदिश राशि है तथा इसे हम सदिशों की भाँति ही निरूपित कर सकते हैं। आइए किसी बिंदु आवेश के कारण **E** को चित्रात्मक निरूपित करने का प्रयास करते हैं। मान लीजिए बिंदु आवेश मूल बिंदु पर स्थित है। प्रत्येक बिंदु पर विद्युत क्षेत्र की दिशा के अनुदिश संकेत करते हुए क्षेत्र की तीव्रता की आनुपातिक लंबाई के सदिश खींचिए। चूँकि किसी बिंदु पर विद्युत क्षेत्र का परिमाण आवेश से उस बिंदु की दूरी के वर्ग के व्युत्क्रमानुसार घटता है, मूल बिंदु से दूर जाने पर सदिश की लंबाई निरंतर घटती जाती है तथा इसकी दिशा सदैव बहिर्मुखी अरीय संकेत करती है। चित्र 1.15 इसी चित्रण को दर्शाता है। इस चित्रण में प्रत्येक तीर विद्युत क्षेत्र अर्थात उस तीर के पुच्छ पर स्थित इकाई धन आवेश पर लगने वाला बल दर्शाता है। एक दिशा में संकेत करने वाले तीरों को मिलाने पर प्राप्त परिणामी चित्र क्षेत्र रेखा को निरूपित करता है। इस प्रकार हमें बहुत सी क्षेत्र रेखाएँ प्राप्त होती हैं जिनमें सभी बिंदु आवेश से बाहर की ओर संकेत करती हैं। क्या अब हमने विद्युत क्षेत्र की तीव्रता अथवा परिमाण के विषय में जानकारी नष्ट कर दी है, क्योंकि वह तो तीर की लंबाई में समाई हुई थी? नहीं। अब, क्षेत्र के परिमाण को क्षेत्र रेखाओं के घनत्व द्वारा निरूपित किया जाता है। आवेश के निकट **E** प्रबल होता है। अत: आवेश के निकट क्षेत्र रेखाओं का घनत्व अधिक होता है तथा क्षेत्र रेखाएँ सघन होती हैं। आवेश से दूर जाने पर क्षेत्र दुर्बल होता जाता है तथा क्षेत्र रेखाओं का घनत्व कम होता है परिणामस्वरूप रेखाएँ भी दूर-दूर होती हैं।



चित्र 1.15 बिंदु आवेश का क्षेत्र।

कोई व्यक्ति अधिक रेखाएँ खींच सकता है। परंतु रेखाओं की संख्या महत्वपूर्ण नहीं है। वास्तव में किसी क्षेत्र में असंख्य रेखाएँ खींची जा सकती हैं। अत: महत्वपूर्ण यह है कि विभिन्न क्षेत्रों में रेखाओं का आपेक्षिक घनत्व क्या है?

© NCERT not to be republished



चित्र 1.16 विद्युत क्षेत्र प्रबलता की दूरी पर निर्भरता तथा इसका क्षेत्र रेखाओं की संख्या से संबंध।

हम कागज़ के पृष्ठ पर चित्र खींचते हैं अर्थात हम द्विविमीय चित्र खींचते हैं, परंतु हम तीन विमाओं में रहते हैं। अत: यदि हमें क्षेत्र रेखाओं के घनत्व का आकलन करना है तो हमें इन रेखाओं के लंबवत अनुप्रस्थ काट के प्रति एकांक क्षेत्रफल में क्षेत्र रेखाओं की संख्या पर विचार करना होता है। चूँकि किसी बिंदु आवेश से दूरी के वर्ग के अनुसार विद्युत क्षेत्र कम होता जाता है तथा आवेश को परिबद्ध करने वाला क्षेत्र दूरी के वर्ग के अनुसार बढ़ता जाता है, परिबद्ध क्षेत्र से गुजरने वाली क्षेत्र रेखाओं की संख्या सदैव नियत रहती है, चाहे आवेश से उस क्षेत्र की दूरी कुछ भी हो।

हमने आरंभ में यह कहा था कि क्षेत्र रेखाएँ दिक्स्थान के विभिन्न बिंदुओं पर विद्युत क्षेत्र की दिशा के विषय में सूचनाएँ पहुँचाती हैं। कुछ क्षेत्र रेखाओं का समुच्चय खींचने पर विभिन्न बिंदुओं पर क्षेत्र रेखाओं का आपेक्षिक संख्या घनत्व (अर्थात अत्यधिक निकटता) उन बिंदुओं पर विद्युत क्षेत्र की आपेक्षिक प्रबलता इंगित करता है। जहाँ क्षेत्र रेखाएँ सघन होती हैं वहाँ क्षेत्र प्रबल होता है तथा जहाँ दूर-दूर होती हैं वहाँ दुर्बल होता है। चित्र 1.16 में क्षेत्र रेखाओं का समुच्चय दर्शाया गया है। हम बिंदुओं R तथा S पर वहाँ की क्षेत्र रेखाओं के अभिलंबवत दो समान तथा छोटे क्षेत्र अवयवों की कल्पना कर सकते हैं। हमारे चित्रण में इन क्षेत्र अवयवों को काटने वाली क्षेत्र रेखाओं की संख्या इन बिंदुओं पर विद्युत क्षेत्रों के परिमाणों के अनुक्रमानुपाती है। चित्रण यह दर्शाता है कि बिंदु R पर क्षेत्र, बिंदु S पर क्षेत्र की तुलना में अधिक प्रबल है।

क्षेत्रफल पर अथवा क्षेत्र अवयव द्वारा अंतरित घन कोण* पर, क्षेत्र रेखाओं की निर्भरता को समझने के लिए आइए हम क्षेत्रफल और घन कोण (जो कोण का तीन विमाओं में व्यापकीकरण है) के बीच संबंध स्थापित करने का प्रयास करते हैं। याद कीजिए दो विमाओं में किसी (समतल) कोण की परिभाषा किस प्रकार की जाती है। मान लीजिए कोई छोटा अनुप्रस्थ रेखा अवयव Δl बिंदु O से r दूरी पर रखा जाता है। तब O पर Δl द्वारा अंतरित कोण का सन्निकटन $\Delta\theta = \Delta l/r$ के रूप में किया जा सकता है। इसी प्रकार, तीन विमाओं में किसी छोटे लंबवत क्षेत्र ΔS द्वारा दूरी r पर अंतरित घन कोण* को $\Delta\Omega = \Delta S/r^2$ व्यक्त किया जा सकता है। हम जानते हैं कि किसी दिए गए घन कोण में अरीय क्षेत्र रेखाओं की संख्या समान होती है। चित्र 1.16 में आवेश से r_1 तथा r_2 दूरियों पर स्थित दो बिंदुओं P_1 तथा P_2 के लिए घन कोण $\Delta\Omega$ द्वारा P_1 पर अंतरित क्षेत्र अवयव $r_1^2\,\Delta\Omega$ तथा P_2 पर अंतरित क्षेत्र अवयव $r_2^2\,\Delta\Omega$ है। इन क्षेत्र अवयवों को काटने वाली रेखाओं की संख्या (मान लीजिए n) समान है। अत: एकांक क्षेत्र अवयव को काटने वाली क्षेत्र रेखाओं की संख्या P_1 पर $n/(r_1^2\,\Delta\Omega)$ तथा P_2 पर $n/(r_2^2\,\Delta\Omega)$ है। इस प्रकार स्पष्ट है कि क्षेत्र रेखाओं की संख्या और इसीलिए क्षेत्र-प्रबलता स्पष्ट रूप से $1/r^2$ पर निर्भर है।

क्षेत्र रेखाओं के चित्रण की खोज फैराडे ने आवेशित विन्यासों के चारों ओर विद्युत क्षेत्र का मानस प्रत्यक्षीकरण करने के एक अंतर्दर्शी अगणितीय उपाय को विकसित करने के लिए की थी। फैराडे ने इन्हें *बल रेखाएँ* कहा था। *यह पद विशेषकर चुंबकीय क्षेत्रों के प्रकरण के लिए कुछ भ्रामक है। इनके लिए अधिक उचित पद क्षेत्र रेखाएँ (वैद्युत अथवा चुंबकीय) है जिसे हमने इस पुस्तक में अपनाया है।*

इस प्रकार विद्युत क्षेत्र रेखाएँ आवेशों के अभिविन्यास के चारों ओर विद्युत क्षेत्र के चित्रात्मक निरूपण का एक उपाय है। व्यापक रूप में, विद्युत क्षेत्र रेखा एक ऐसा वक्र होती है जिसके किसी भी बिंदु पर खींचा गया स्पर्शी उस बिंदु पर लगे नेट बल की दिशा को निरूपित करता है। इस वक्र के किसी बिंदु पर, स्पष्ट रूप से, स्पर्शी द्वारा विद्युत क्षेत्र की दो संभावित दिशाओं में से कोई एक

* घन कोण शंकु की एक माप है। R त्रिज्या के गोले वाले दिए गए शंकु के परिच्छेद पर विचार कीजिए। शंकु के घन कोण $\Delta\Omega$ की परिभाषा इसे $\Delta S/R^2$ के बराबर मानकर करते हैं, यहाँ ΔS शंकु द्वारा गोले पर काटा गया क्षेत्रफल है।

दिशा दर्शाने के लिए वक्र पर तीर का चिह्न अंकित करना आवश्यक है। क्षेत्र रेखा एक दिक्स्थान वक्र अर्थात तीन दिशाओं में वक्र होती है।

चित्र 1.17 में कुछ सरल आवेश विन्यासों के चारों ओर क्षेत्र रेखाएँ दर्शायी गई हैं। जैसा कि पहले वर्णन किया जा चुका है, ये क्षेत्र रेखाएँ तीन विमीय दिक्स्थान में हैं यद्यपि चित्र में इन्हें केवल एक तल में दर्शाया गया है। एकल धनावेश के कारण क्षेत्र रेखाएँ त्रिज्यत: (अरीय) बहिर्मुखी होती हैं जबकि एकल ऋणावेश के कारण क्षेत्र रेखाएँ त्रिज्यत: अंतर्मुखी होती हैं। दो धनावेशों (q, q) के निकाय के चारों ओर की क्षेत्र रेखाएँ पारस्परिक प्रतिकर्षण का एक सजीव चित्रण प्रस्तुत करती हैं जबकि परिमाण में समान दो विजातीय आवेशों $(q, -q)$ के निकाय, अर्थात किसी द्विध्रुव के चारों ओर क्षेत्र रेखाएँ आवेशों के बीच स्पष्ट पारस्परिक आकर्षण दर्शाती हैं। क्षेत्र रेखाएँ कुछ महत्वपूर्ण सामान्य गुणों का पालन करती हैं–

(i) क्षेत्र रेखाएँ धनावेश से आरंभ होकर ऋणावेश पर समाप्त होती हैं। यदि आवेश एकल है तो ये अनंत से आरंभ अथवा अनंत पर समाप्त हो सकती हैं।

(ii) किसी आवेश मुक्त क्षेत्र में, क्षेत्र रेखाओं को ऐसे संतत वक्र माना जा सकता है जो कहीं नहीं टूटते।

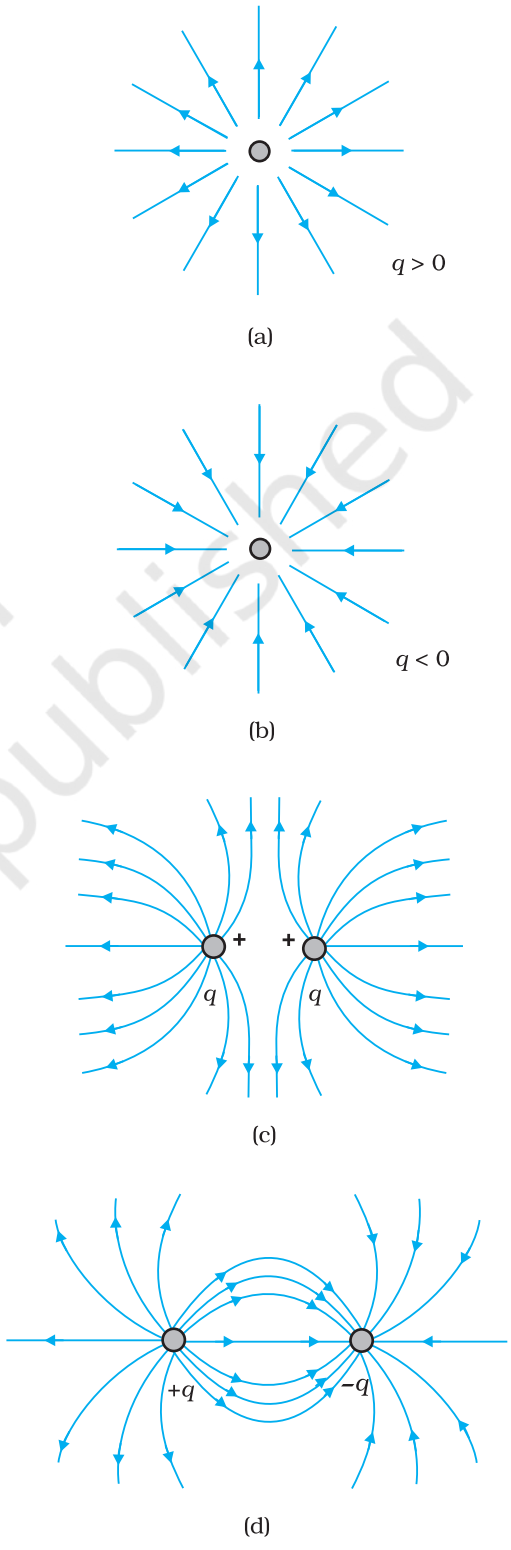
(iii) दो क्षेत्र रेखाएँ एक-दूसरे को कदापि नहीं काटतीं। (यदि वे ऐसा करें तो प्रतिच्छेदन बिंदु पर क्षेत्र की केवल एक दिशा नहीं होगी, जो निरर्थक है।

(iv) स्थिरवैद्युत क्षेत्र रेखाएँ बंद लूप नहीं बनातीं। यह विद्युत क्षेत्र की संरक्षणात्मक प्रकृति से अनुशासित है (अध्याय 2 देखिए)।

1.10 वैद्युत फ्लक्स

किसी dS क्षेत्रफल के छोटे पृष्ठ से उसके अभिलंबवत $\mathbf{v}$ वेग से प्रवाहित होने वाले किसी द्रव के प्रवाह पर विचार कीजिए। द्रव के प्रवाह की दर इस क्षेत्र से प्रति एकांक समय में गुजरने वाले आयतन $v\, dS$ द्वारा प्राप्त होती है तथा यह उस तल से गुजरने वाले द्रव के फ्लक्स को निरूपित करती है। यदि इस तल (पृष्ठ) पर अभिलंब द्रव के प्रवाह की दिशा अर्थात $\mathbf{v}$ के समांतर नहीं है, और इनके बीच θ कोण बनता है तो $\mathbf{v}$ के लंबवत तल में प्रक्षेपित क्षेत्रफल $dS \cos \theta$ होगा। अत: पृष्ठ dS से बाहर जाने वाला फ्लक्स $\mathbf{v} \cdot \hat{\mathbf{n}}\, dS$ होता है। विद्युत क्षेत्र के प्रकरण के लिए, हम एक समतुल्य राशि को परिभाषित करते हैं और इसे *वैद्युत फ्लक्स* कहते हैं। तथापि हमें यह ध्यान में रखना चाहिए कि द्रव-प्रवाह के प्रकरण के विपरीत यहाँ प्राकृतिक नियमों के अनुसार प्रेक्षण योग्य राशि का कोई *प्रवाह* नहीं है।

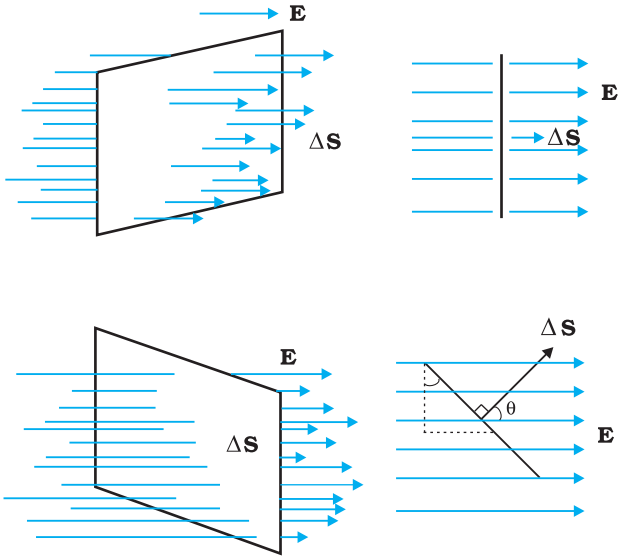
उपरोक्त वर्णित विद्युत क्षेत्र रेखाओं के चित्रण में हमने देखा कि किसी बिंदु पर क्षेत्र के अभिलंबवत रखे एकांक क्षेत्रफल से गुजरने वाली क्षेत्र रेखाओं की संख्या उस बिंदु पर विद्युत क्षेत्र प्रबलता की माप होती है। इसका तात्पर्य यह है कि यदि हम किसी बिंदु पर $\mathbf{E}$ के अभिलंबवत कोई ΔS क्षेत्रफल का छोटा समतलीय अवयव रखें तो इससे गुजरने वाली क्षेत्र रेखाओं की संख्या E ΔS के अनुक्रमानुपाती* है। अब मान लीजिए हम क्षेत्रफल अवयव को किसी



चित्र 1.17 विभिन्न आवेश वितरणों के कारण क्षेत्र रेखाएँ।

* यह कहना उचित नहीं है कि क्षेत्र रेखाओं की संख्या $E\Delta S$ के बराबर है। वास्तव में क्षेत्र रेखाओं की संख्या ऐसा विषय है जो हम कितनी क्षेत्र रेखाएँ खींचने का चयन करते हैं, पर निर्भर है। अत: विभिन्न बिंदुओं पर दिए गए क्षेत्रफल से गुजरने वाली क्षेत्र रेखाओं की आपेक्षिक संख्या के ज्ञात होने में ही इनकी भौतिक सार्थकता है।

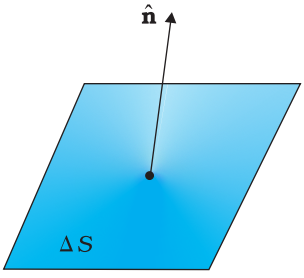
© NCERT not to be republished



चित्र 1.18 **E** तथा $\hat{n}$ के बीच झुकाव θ पर फ्लक्स की निर्भरता।

कोण θ पर झुका देते हैं। स्पष्ट है अब इस क्षेत्रफल अवयव से गुजरने वाली क्षेत्र रेखाओं की संख्या घट जाएगी। चूँकि E के अभिलंबवत क्षेत्रफल अवयव ΔS का प्रक्षेप $\Delta S \cos\theta$ है, अत: ΔS से गुजरने वाली क्षेत्र रेखाओं की संख्या $E\,\Delta S \cos\theta$ के अनुक्रमानुपाती है। जब $\theta = 90°$ होता है तो क्षेत्र रेखाएँ ΔS के समांतर हो जाती हैं और इससे कोई भी क्षेत्र रेखा नहीं गुजरती (चित्र 1.18 देखिए)।

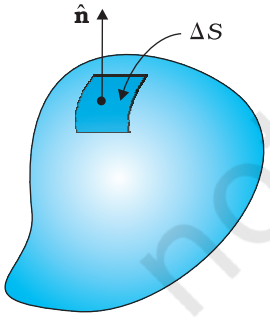
बहुत से संदर्भों में क्षेत्रफल अवयव के परिमाण के साथ-साथ उसका दिक्विन्यास भी महत्वपूर्ण होता है। उदाहरण के लिए, किसी जल-प्रवाह में किसी रिंग से गुजरने वाले जल का परिमाण स्वाभाविक रूप से इस बात पर निर्भर करता है कि आप जल धारा में इसे किस प्रकार पकड़े हुए हैं। यदि आप इसे जल-प्रवाह के अभिलंबवत रखते हैं तो अन्य सभी दिक्विन्यासों की तुलना में इस विन्यास में रिंग से अधिकतम जल गुजरेगा। इससे यह निष्कर्ष निकलता है कि क्षेत्रफल-अवयव को सदिश के समान मानना चाहिए। इसमें परिमाण के साथ दिशा भी होती है। समतलीय क्षेत्र की दिशा कैसे निर्दिष्ट की जाए? स्पष्ट रूप से तल पर अभिलंब तल का दिक्विन्यास निर्दिष्ट करता है। इस प्रकार समतलीय क्षेत्र सदिश की दिशा इसके अभिलंब के अनुदिश होती है।



$\Delta \mathbf{S} = \Delta S\,\hat{\mathbf{n}}$

किसी वक्रित पृष्ठ के क्षेत्रफल को किसी सदिश से कैसे संबद्ध किया जाता है? हम यह कल्पना करते हैं कि वक्रित पृष्ठ बहुत से छोटे-छोटे क्षेत्रफल अवयवों में विभाजित है। इनमें से प्रत्येक छोटा क्षेत्रफल अवयव समतलीय माना जा सकता है और पहले स्पष्टीकरण के अनुसार इससे सदिश संबद्ध किया जा सकता है।

यहाँ एक संदिग्धता पर ध्यान दीजिए। किसी क्षेत्रफल अवयव की दिशा उसके अभिलंब के अनुदिश होती है। परंतु अभिलंब दो दिशाएँ संकेत कर सकता है। किसी क्षेत्रफल अवयव से संबद्ध सदिश की दिशा का चयन किस प्रकार किया जाता है? इस समस्या का समाधान इस संदर्भ में उचित कुछ परिपाटियों के निर्धारण द्वारा किया गया है। बंद पृष्ठों के प्रकरणों के लिए यह परिपाटी अति सरल है। किसी बंद पृष्ठ के प्रत्येक क्षेत्रफल अवयव से संबद्ध सदिश की दिशा *बहिर्मुखी* अभिलंब की दिशा मानी जाती है। इसी परिपाटी का उपयोग चित्र 1.19 में किया गया है। इस प्रकार, किसी बंद पृष्ठ के किसी बिंदु पर क्षेत्रफल अवयव सदिश $\Delta \mathbf{S}$ का मान $\Delta \mathbf{S}\ \hat{\mathbf{n}}$ होता है, यहाँ $\Delta \mathbf{S}$ क्षेत्रफल सदिश का परिमाण तथा $\hat{\mathbf{n}}$ इस बिंदु पर बहिर्मुखी अभिलंब की दिशा में एकांक सदिश है।



चित्र 1.19 अभिलंब $\hat{n}$ तथा ΔS को परिभाषित करने की परिपाटी।

अब हम वैद्युत फ्लक्स की परिभाषा पर आते हैं। किसी क्षेत्रफल अवयव $\Delta \mathbf{S}$ से गुजरने वाले वैद्युत फ्लक्स $\Delta\phi$ की परिभाषा इस प्रकार करते हैं :

$$\Delta\phi = \mathbf{E}\cdot\Delta\mathbf{S} = E\,\Delta S\,\cos\theta \qquad (1.11)$$

जो पहले की भाँति इस क्षेत्रफल अवयव को काटने वाली क्षेत्र रेखाओं की संख्या के अनुक्रमानुपाती है। यहाँ θ क्षेत्र अवयव $\Delta \mathbf{S}$ तथा **E** के बीच का कोण है। पूर्वोक्त परिपाटी के अनुसार बंद पृष्ठ के लिए θ क्षेत्र-अवयव पर बहिर्मुखी अभिलंब तथा **E** के बीच का कोण है। ध्यान दीजिए, हम व्यंजक $E\,\Delta S\cos\theta$ पर दो ढंग से विचार कर सकते हैं: $E\,(\Delta S\cos\theta)$ अर्थात E पर क्षेत्र-अभिलंब के प्रक्षेप का **E** गुना, अथवा $E_\perp\,\Delta S$ अर्थात क्षेत्र-अवयव पर अभिलंब के अनुदिश **E** का अवयव गुना क्षेत्र-अवयव का परिमाण। वैद्युत फ्लक्स का मात्रक $\mathrm{N\,C^{-1}\,m^2}$ है।

© NCERT not to be republished

समीकरण (1.11) से प्राप्त वैद्युत फ्लक्स की मूल परिभाषा को सैद्धांतिक रूप में, किसी दिए गए पृष्ठ से गुजरने वाले कुल फ्लक्स को परिकलित करने में उपयोग कर सकते हैं। इसके लिए हमें यह करना होता है कि हम पहले पृष्ठ को छोटे-छोटे क्षेत्रफल अवयवों में विभाजित करते हैं और फिर प्रत्येक अवयव के लिए फ्लक्स परिकलित करके उन्हें जोड़कर कुल फ्लक्स प्राप्त कर लेते हैं। अत: पृष्ठ S से गुजरने वाला कुल फ्लक्स ϕ है

$$\phi \simeq \Sigma\, \mathbf{E}\cdot\Delta\mathbf{S} \qquad (1.12)$$

यहाँ सन्निकटन चिह्न लगाने का कारण यह है कि हमने छोटे क्षेत्रफल अवयव पर विद्युत क्षेत्र $\mathbf{E}$ को नियत माना है। गणितीय रूप से यह केवल तभी यथार्थ है जब आप सीमा $\Delta S \to 0$ लें तथा समीकरण (1.12) में योग को समाकलन के रूप में व्यक्त करें।

1.11 वैद्युत द्विध्रुव

परिमाण में समान एवं विजातीय बिंदु आवेशों q तथा $-q$ का कोई युगल जिनके बीच पृथकन $2a$ है, *वैद्युत द्विध्रुव* कहलाता है। दोनों आवेशों को संयोजित करने वाली रेखा दिक्स्थान में किसी दिशा को परिभाषित करती है। परिपाटी के अनुसार $-q$ से q की दिशा द्विध्रुव की दिशा कहलाती है। $-q$ तथा q की अवस्थितियों का मध्य बिंदु द्विध्रुव का केंद्र कहलाता है।

प्रत्यक्ष रूप से वैद्युत द्विध्रुव का कुल आवेश शून्य होता है। परंतु इसका यह अर्थ नहीं है कि द्विध्रुव का विद्युत क्षेत्र शून्य है। चूँकि आवेश q तथा $-q$ में कुछ पृथकन है, इनके कारण विद्युत क्षेत्र जब जोड़े जाते हैं तब ये एक-दूसरे को यथार्थ रूप से निरस्त नहीं करते। परंतु यदि द्विध्रुव बनाने वाले आवेशों के पृथकन की तुलना में दूरी अधिक ($r >> 2a$) है, तो q एवं $-q$ के कारण क्षेत्र लगभग निरस्त हो जाते हैं। अत: अधिक दूरियों पर किसी वैद्युत द्विध्रुव के कारण विद्युत क्षेत्र $1/r^2$ (एकल आवेश q के कारण विद्युत क्षेत्र की r पर निर्भरता) से भी अधिक गति से मंद होता जाता है। यह गुणात्मक धारणा नीचे दिए गए सुस्पष्ट परिकलन से उत्पन्न हुई है:

1.11.1 वैद्युत द्विध्रुव के कारण क्षेत्र

आवेशों के युगल ($-q$ तथा q) के कारण दिक्स्थान में किसी बिंदु पर विद्युत क्षेत्र कूलॉम नियम तथा अध्यारोपण सिद्धांत से ज्ञात किया जा सकता है। निम्नलिखित दो प्रकरणों के परिणाम सरल हैं: (i) जब बिंदु द्विध्रुव के अक्ष पर है, (ii) जब बिंदु द्विध्रुव के *विषुवतीय तल*, अर्थात द्विध्रुव अक्ष के केंद्र से गुजरने वाले द्विध्रुव अक्ष के लंबवत तल में है। किसी व्यापक बिंदु P पर विद्युत क्षेत्र, आवेश $-q$ के कारण P पर विद्युत क्षेत्र $\mathbf{E}_{-q}$ तथा आवेश $+q$ के कारण P पर विद्युत क्षेत्र $\mathbf{E}_{+q}$ को सदिशों के समांतर चतुर्भुज नियम द्वारा संयोजित करके प्राप्त किया जाता है।

(i) अक्ष पर स्थित बिंदुओं के लिए

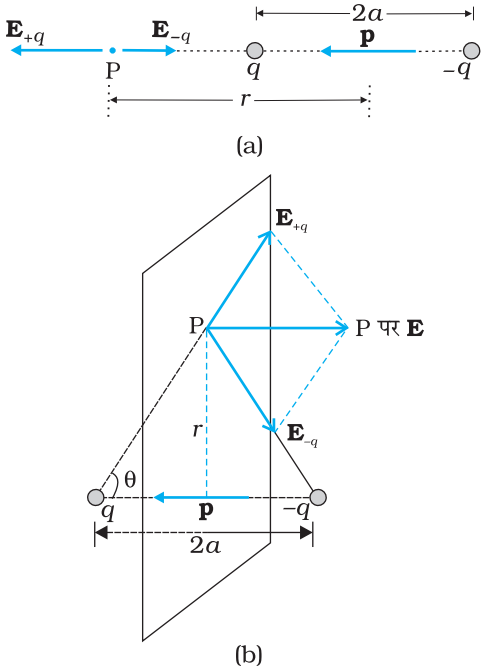
मान लीजिए बिंदु P द्विध्रुव के केंद्र से q की ओर चित्र (1.20a) में दर्शाए अनुसार r दूरी पर है, तब

$$\mathbf{E}_{-q} = -\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 (r+a)^2}\hat{\mathbf{p}} \qquad [1.13(a)]$$

यहाँ $\hat{\mathbf{p}}$ द्विध्रुव अक्ष ($-q$ से q की ओर) के अनुदिश एकांक सदिश है। साथ ही

$$\mathbf{E}_{+q} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 (r-a)^2}\hat{\mathbf{p}} \qquad [1.13(b)]$$

P पर कुल विद्युत क्षेत्र है



चित्र 1.20 (a) अक्ष पर स्थित किसी बिंदु, (b) द्विध्रुव के विषुवतीय तल पर स्थित किसी बिंदु पर द्विध्रुव का विद्युत क्षेत्र। द्विध्रुव आघूर्ण **p** सदिश है जिसका परिमाण $p = q \times 2a$ है तथा दिशा $-q$ से q की ओर है।

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{+q} + \mathbf{E}_{-q} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_o}\left[\frac{1}{(r-a)^2} - \frac{1}{(r+a)^2}\right]\mathbf{p}$$

$$= \frac{q}{4\pi\varepsilon_o}\,\frac{4ar}{(r^2-a^2)^2}\,\hat{\mathbf{p}} \qquad (1.14)$$

$r >> a$ के लिए

$$\mathbf{E} = \frac{4qa}{4\pi\varepsilon_o r^3}\hat{\mathbf{p}} \qquad (r >> a) \qquad (1.15)$$

(ii) विषुवतीय तल पर स्थित बिंदुओं के लिए

दो आवेशों $+q$ तथा $-q$ के कारण विद्युत क्षेत्रों के परिमाण

$$E_{+q} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_o}\frac{1}{r^2+a^2} \qquad [1.16(a)]$$

$$E_{-q} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_o}\frac{1}{r^2+a^2} \qquad [1.16(b)]$$

समान हैं।

$\mathbf{E}_{+q}$ तथा $\mathbf{E}_{-q}$ की दिशाएँ चित्र 1.20(b) में दर्शायी गई हैं। स्पष्ट है कि द्विध्रुव अक्ष के अभिलंबवत अवयव एक-दूसरे को निरस्त कर देते हैं। द्विध्रुव अक्ष के अनुदिश अवयव संयोजित हो जाते हैं। कुल विद्युत क्षेत्र $\hat{\mathbf{p}}$ के विपरीत होता है। अतः

$$\mathbf{E} = -(E_{+q} + E_{-q})\cos\theta\ \hat{\mathbf{p}}$$

$$= -\frac{2qa}{4\pi\varepsilon_o(r^2+a^2)^{3/2}}\hat{\mathbf{p}} \qquad (1.17)$$

अधिक दूरियों ($r >> a$) पर

$$\mathbf{E} = -\frac{2qa}{4\pi\varepsilon_o r^3}\hat{\mathbf{p}} \qquad (r >> a) \qquad (1.18)$$

समीकरणों (1.15) तथा (1.18) से स्पष्ट है कि अधिक दूरियों पर द्विध्रुव क्षेत्र में q तथा a पृथक रूप से सम्मिलित नहीं होते; यह इनके संयुक्त गुणनफल qa पर निर्भर करता है। इससे द्विध्रुव आघूर्ण की परिभाषा का संकेत मिलता है। किसी वैद्युत द्विध्रुव के *द्विध्रुव आघूर्ण सदिश* **p** की परिभाषा इस प्रकार की जा सकती है:

$$\mathbf{p} = q \times 2a\ \hat{\mathbf{p}} \qquad (1.19)$$

अर्थात यह एक सदिश है जिसका परिमाण आवेश q तथा पृथकन $2a$ (आवेशों q, $-q$ के युगल के बीच की दूरी) तथा दिशा $-q$ से q की ओर होती है। **p** के पदों में, किसी द्विध्रुव का विद्युत क्षेत्र अधिक दूरियों पर एक सरल रूप ले लेता है।

द्विध्रुव अक्ष के किसी बिंदु पर

$$\mathbf{E} = \frac{2\mathbf{p}}{4\pi\varepsilon_o r^3} \qquad (r >> a) \qquad (1.20)$$

विषुवतीय तल के किसी बिंदु पर

$$\mathbf{E} = -\frac{\mathbf{p}}{4\pi\varepsilon_o r^3} \qquad (r >> a) \qquad (1.21)$$

© NCERT not to be republished

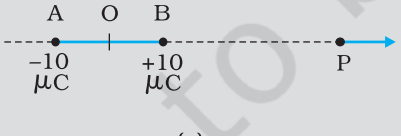
इस महत्वपूर्ण तथ्य पर ध्यान दीजिए कि द्विध्रुव क्षेत्र अधिक दूरियों पर $1/r^2$ के रूप में नहीं वरन् $1/r^3$ के रूप में मंद होता है। इसके अतिरिक्त द्विध्रुव क्षेत्र का परिमाण तथा दिशा केवल दूरी **r** पर ही निर्भर नही है वरन् ये सदिश **r** तथा द्विध्रुव आघूर्ण **p** के बीच के *कोण* पर भी निर्भर करते है।

हम उसके बारे में सोच सकते हैं- जब द्विध्रुव आमाप $2a$ शून्य की ओर अग्रसर होता जाता है, तब आवेश q अनंत की ओर अग्रसर इस प्रकार होता जाता है कि गुणनफल $p = q \times 2a$ एक नियत परिमित संख्या होती है। इस प्रकार के द्विध्रुव को *बिंदु द्विध्रुव* कहते हैं। किसी बिंदु द्विध्रुव के लिए समीकरण (1.20) तथा (1.21) r के सभी मानों के लिए सत्य तथा यथार्थ हैं।

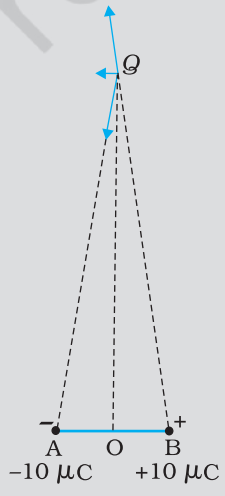
1.11.2 द्विध्रुवों की भौतिक सार्थकता

अधिकांश अणुओं में धनावेशों तथा ऋणावेशों* के केंद्र एक ही स्थान पर होते हैं। इसीलिए इनके द्विध्रुव आघूर्ण शून्य होते हैं। CO_2 तथा CH_4 अणु इसी प्रकार के हैं। विद्युत क्षेत्र आरोपित किए जाने पर ये द्विध्रुव आघूर्ण विकसित कर लेते हैं परंतु कुछ अणुओं में धनावेशों तथा ऋणावेशों के केंद्र संपाती नहीं होते। अत: विद्युत क्षेत्र की अनुपस्थिति में भी इनका अपना स्थायी द्विध्रुव आघूर्ण होता है। इस प्रकार के अणुओं को *ध्रुवित अणु* कहते हैं। जल का अणु, H_2O, इस प्रकार के अणुओं का एक उदाहरण है। विविध पदार्थ विद्युत क्षेत्र की उपस्थिति अथवा अनुपस्थिति में रोचक गुण तथा महत्वपूर्ण अनुप्रयोग प्रस्तुत करते हैं।

उदाहरण 1.10 $\pm 10\,\mu C$ के दो आवेश एक-दूसरे से 5.0 mm दूरी पर स्थित हैं। (a) इस द्विध्रुव के अक्ष पर द्विध्रुव के केंद्र O से चित्र 1.21(a) में दर्शाए अनुसार, धनावेश की ओर 15 cm दूरी पर स्थित किसी बिंदु P पर तथा (b) द्विध्रुव के अक्ष के अभिलंबवत O से, चित्र 1.21(b) में दर्शाए अनुसार गुजरने वाली रेखा से 15 cm दूरी पर स्थित किसी बिंदु Q पर विद्युत क्षेत्र ज्ञात कीजिए।



(a)



(b)

चित्र 1.21

हल : (a) बिंदु P पर आवेश $+10\,\mu C$ के कारण क्षेत्र

उदाहरण 1.10

* धनात्मक बिंदु आवेशों के संग्रह को केंद्र की परिभाषा संहति केंद्र की ही भाँति की जाती है जिसके अनुसार

$$\mathbf{r}_{cm} = \frac{\sum_i q_i \mathbf{r}_i}{\sum_i q_i}.$$

© NCERT not to be republished

$$= \frac{10^{-5}\,C}{4\pi(8.854\times10^{-12}\,C^2\,N^{-1}\,m^{-2})} \times \frac{1}{(15-0.25)^2\times10^{-4}\,m^2}$$

$= 4.13 \times 10^6$ N C^{-1} BP के अनुदिश

बिंदु P पर आवेश $-10\ \mu C$ के कारण क्षेत्र

$$= \frac{10^{-5}\,C}{4\pi(8.854\times10^{-12}\,C^2\,N^{-1}\,m^{-2})} \times \frac{1}{(15+0.25)^2\times10^{-4}\,m^2}$$

$= 3.86 \times 10^6$ N C^{-1} PA के अनुदिश

A तथा B पर स्थित दो आवेशों के कारण P पर परिणामी विद्युत क्षेत्र $= 2.7 \times 10^5$ N C^{-1} BP के अनुदिश है।

इस उदाहरण में अनुपात OP/OB काफी अधिक (=60) है। अत:, किसी द्विध्रुव के अक्ष पर अत्यधिक दूरी पर स्थित किसी बिंदु पर विद्युत क्षेत्र ज्ञात करने के लिए सीधे ही सूत्र के उपयोग द्वारा हम इसी के सन्निकट परिणाम की आशा कर सकते हैं। $2a$ पृथकन के $\pm q$ आवेशों से बने द्विध्रुव के लिए द्विध्रुव के अक्ष के केंद्र से r दूरी पर विद्युत क्षेत्र का परिमाण

$$E = \frac{2p}{4\pi\varepsilon_0 r^3} \qquad (r/a >> 1)$$

यहाँ $p = 2a\,q$ द्विध्रुव आघूर्ण का परिमाण है।

द्विध्रुव अक्ष पर विद्युत क्षेत्र की दिशा सदैव द्विध्रुव आघूर्ण सदिश के अनुदिश (अर्थात $-q$ से q की ओर) होती है। यहाँ, $p = 10^{-5}\ C \times 5 \times 10^{-3}\ m = 5 \times 10^{-8}\ C\ m$

अत:

$$E = \frac{2\times5\times10^{-8}\,C\,m}{4\pi(8.854\times10^{-12}\,C^2\,N^{-1}\,m^{-2})} \times \frac{1}{(15)^3\times10^{-6}\,m^3} = 2.6 \times 10^5 \text{ N } C^{-1}$$

द्विध्रुव आघूर्ण की दिशा AB के अनुदिश है, तथा यह परिणाम पूर्व परिणाम के काफी निकट है।

(b) बिंदु B पर स्थित + 10 μC आवेश के कारण बिंदु Q पर विद्युत क्षेत्र

$$= \frac{10^{-5}\ C}{4\ \pi\ (8.854\times10^{-12}\ C^2\ N^{-1}\ m^{-2}\ )} \times \frac{1}{[15^2 + (0.25)^2]\times10^{-4}\ m^2}$$

$= 3.99 \times 10^6$ N C^{-1} BQ के अनुदिश

बिंदु A पर स्थित $-10\ \mu C$ आवेश के कारण Q पर विद्युत क्षेत्र

$$= \frac{10^{-5}\,C}{4\pi(8.854\times10^{-12}\,C^2\,N^{-1}\,m^{-2})} \times \frac{1}{[15^2+(0.25)^2]\times10^{-4}\,m^2}$$

$= 3.99 \times 10^6$ N C^{-1} QA के अनुदिश

स्पष्ट है कि इन दो समान परिमाण के बलों के OQ दिशा के अनुदिश घटक एक-दूसरे को निरस्त करते हैं परंतु BA के समांतर दिशा के अनुदिश घटक संयोजित हो जाते हैं। अत: A तथा B पर स्थित दो आवेशों के कारण Q पर परिणामी विद्युत क्षेत्र

$$= 2 \times \frac{0.25}{\sqrt{15^2 + (0.25)^2}} \times 3.99 \times 10^6 \text{ N } C^{-1} \text{ BA के अनुदिश}$$

$= 1.33 \times 10^5$ N C^{-1} BA के अनुदिश

(a) की ही भाँति द्विध्रुव के अक्ष के अभिलंबवत किसी बिंदु पर द्विध्रुव विद्युत क्षेत्र के लिए सीधे ही सूत्र के उपयोग द्वारा हम इसी परिणाम की अपेक्षा कर सकते हैं–

उदाहरण 1.10

© NCERT not to be republished

उदाहरण 1.10

$$E = \frac{p}{4\pi\varepsilon_0 r^3} \qquad (r/a >> 1)$$

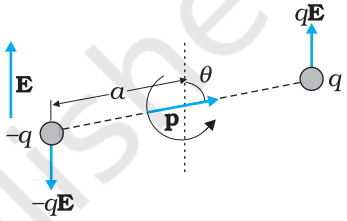
$$= \frac{5\times10^{-8}\ \text{C m}}{4\pi(8.854\times10^{-12}\ \text{C}^2\ \text{N}^{-1}\ \text{m}^{-2})} \times \frac{1}{(15)^3\times10^{-6}\ \text{m}^3}$$

$$= 1.33 \times 10^5\ \text{N C}^{-1}.$$

इस प्रकरण में विद्युत क्षेत्र की दिशा आघूर्ण सदिश की दिशा के विपरीत है। तथापि प्राप्त परिणाम पहले प्राप्त हुए परिणाम के अनुरूप हैं।

1.12 एकसमान बाह्य क्षेत्र में द्विध्रुव

चित्र 1.22 में दर्शाए अनुसार एकसमान विद्युत क्षेत्र **E** में रखे द्विध्रुव आघूर्ण **p** के स्थायी द्विध्रुव (स्थायी द्विध्रुव से हमारा तात्पर्य यह है कि **p** का **E** से स्वतंत्र अस्तित्व है; यह **E** द्वारा प्रेरित नहीं हुआ है।) पर विचार कीजिए।



चित्र 1.22 एकसमान विद्युत क्षेत्र में द्विध्रुव।

यहाँ आवेश q पर $q\mathbf{E}$ तथा $-q$ पर $-q\mathbf{E}$ बल लग रहे हैं। चूँकि **E** एकसमान है अत: द्विध्रुव पर नेट बल शून्य है। परंतु आवेशों में पृथकन है, अत: बल भिन्न बिंदु पर लगे हैं, जिसके परिणामस्वरूप द्विध्रुव पर बल आघूर्ण कार्य करता है। जब नेट बल शून्य है तो बल आघूर्ण (बल युग्म) मूल बिंदु पर निर्भर नहीं होता। इसका परिमाण प्रत्येक बल के परिमाण तथा बलयुग्म की भुजा (दो प्रतिसमांतर बलों के बीच लंबवत दूरी) के गुणनफल के बराबर होता है।

बल आघूर्ण का परिमाण $= qE \times 2a\sin\theta$

$$= 2qaE\sin\theta$$

इसकी दिशा कागज़ के तल के अभिलंबवत इससे बाहर की ओर है।

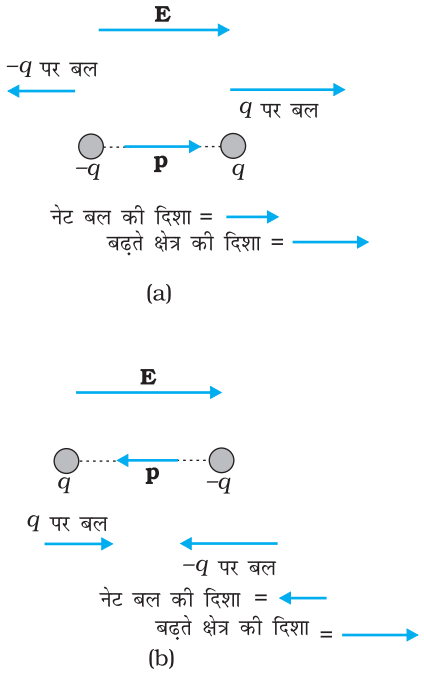
$\mathbf{p}\times\mathbf{E}$ का परिमाण भी $pE\sin\theta$ है तथा इसकी दिशा कागज़ के पृष्ठ के अभिलंबवत बाहर की ओर है। अत:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{p}\times\mathbf{E} \qquad (1.22)$$

यह बल आघूर्ण द्विध्रुव को क्षेत्र **E** के साथ सरेखित करने की प्रवृत्ति रखेगा। जब **p** क्षेत्र **E** के साथ सरेखित हो जाता है तो बल आघूर्ण शून्य होता है।

जब क्षेत्र एकसमान नहीं होता तब क्या होता है? स्पष्ट है, उस प्रकरण में नेट बल शून्येतर हो सकता है। इसके अतिरिक्त, व्यापक रूप से निकाय पर पहले की ही भाँति एक बल आघूर्ण कार्य करेगा। यहाँ व्यापक प्रकरण अंतर्ग्रस्त है, अत: आइए ऐसी सरल स्थिति पर विचार करते हैं जिसमें **p** क्षेत्र **E** के समांतर अथवा प्रतिसमांतर है। दोनों ही प्रकरणों में नेट बल आघूर्ण तो शून्य होता है परंतु यदि **E** एकसमान नहीं है तो द्विध्रुव पर एक नेट बल लगता है।

चित्र 1.23 स्वत: स्पष्टीकरण करता है। इसे आसानी से देखा जा सकता है कि जब **p** क्षेत्र **E** के समांतर है तो द्विध्रुव पर बढ़ते क्षेत्र की दिशा में एक नेट बल कार्य करता है। जब **p** क्षेत्र के **E** प्रतिसमांतर होता है तो द्विध्रुव पर घटते क्षेत्र की दिशा में एक नेट बल कार्य करता है। व्यापक रूप में, बल **E** के सापेक्ष **p** के दिक्विन्यास पर निर्भर करता है।



चित्र 1.23 द्विध्रुव पर वैद्युत बल (a) **p** क्षेत्र **E** के समांतर (b) **p** क्षेत्र **E** के प्रतिसमांतर।

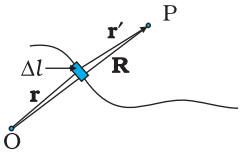
इससे हमारा ध्यान घर्षण विद्युत के सामान्य प्रेक्षणों पर जाता है। शुष्क बालों में फेरी गई कंघी कागज़ के छोटे टुकड़ों को आकर्षित करती है। जैसाकि हम जानते हैं कि कंघी घर्षण द्वारा आवेश अर्जित करती है। परंतु कागज़ आवेशित नहीं है तो फिर इस आकर्षक बल का स्पष्टीकरण कैसे करें? पिछली चर्चा से संकेत

© NCERT not to be republished

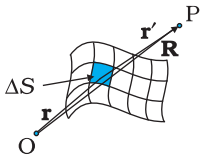
पाकर हम कह सकते हैं कि आवेशित कंघी कागज़ के टुकड़ों को ध्रुवित कर देती है, अर्थात कागज़ के टुकड़ों में क्षेत्र की दिशा में नेट द्विध्रुव आघूर्ण प्रेरित कर देती है। इसके अतिरिक्त कंघी के कारण विद्युत क्षेत्र एकसमान नहीं है। इस असमान क्षेत्र के कारण द्विध्रुव पर एक नेट बल कार्यरत हो जाता है। इस स्थिति में यह आसानी से देखा जा सकता है कि कागज़ के टुकड़े कंघी की दिशा में गति करते हैं।

1.13 संतत आवेश वितरण

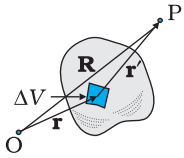
अब तक हमने विविक्त आवेशों $q_1, q_2, ..., q_n$ के आवेश विन्यास के विषय में चर्चा की है। इसका कारण यह है कि ऐसे विन्यासों के लिए गणितीय परिकलन सरल होते हैं जिनमें कलन (कैलकुलस) की आवश्यकता नहीं होती। साथ ही, बहुत से कार्यों के लिए विविक्त आवेशों के पदों में कार्य करना व्यावहारिक नहीं होता और हमें संतत आवेश वितरण की आवश्यकता होती है। उदाहरणार्थ, किसी आवेशित चालक के पृष्ठ पर सूक्ष्म आवेशित अवयवों की अवस्थितियों के पदों में आवेश वितरण का विशेष रूप से उल्लेख करना व्यावहारिक नहीं है। चालक के पृष्ठ पर किसी क्षेत्रफल अवयव ΔS (जो स्थूल स्तर पर बहुत छोटा परंतु इलेक्ट्रॉनों की विशाल संख्या को सम्मिलित करने के लिए पर्याप्त है, देखिए चित्र 1.24) के विषय में विचार करके उस अवयव पर आवेश ΔQ का पृथक-पृथक उल्लेख करना अधिक उपयुक्त है। इसके बाद हम क्षेत्रफल अवयव पर *पृष्ठीय आवेश घनत्व* σ की परिभाषा इस प्रकार करते हैं–



रैखिक आवेश $\Delta Q = \lambda \Delta l$



पृष्ठीय आवेश $\Delta Q = \sigma \Delta S$



आयतनी आवेश $\Delta Q = \rho \Delta V$

चित्र 1.24 रैखिक, पृष्ठीय, आयतनी घनत्वों की परिभाषा। प्रत्येक प्रकरण में चुने गए अवयव (Δl, ΔS, ΔV) स्थूलदर्शीय स्तर पर छोटे हैं परंतु इनमें सूक्ष्मदर्शीय स्तर के अवयवों की एक विशाल संख्या समाहित होती है।

$$\sigma = \frac{\Delta Q}{\Delta S} \tag{1.23}$$

ऐसा हम चालक के पृष्ठ के विभिन्न बिंदुओं पर कर सकते हैं और इस प्रकार एक संतत फलन σ (जिसे पृष्ठीय आवेश घनत्व कहते हैं) पर पहुँचते हैं। इस रूप में वर्णित पृष्ठीय आवेश घनत्व σ आवेश की क्वांटमता तथा सूक्ष्मदर्शीय स्तर* पर आवेश की असंतता वितरण की उपेक्षा करता है। σ स्थूलदर्शीय रूप में पृष्ठीय आवेश घनत्व है जो एक प्रकार से, सूक्ष्मदर्शीय रूप में बड़े परंतु स्थूलदर्शीय रूप में छोटे क्षेत्र अवयव ΔS पर सूक्ष्मदर्शीय आवेश घनत्व है। σ का मात्रक C/m^2 है।

इसी प्रकार के दृष्टिकोण रैखिक आवेश वितरणों तथा आयतनी आवेश वितरणों पर भी लागू होते हैं। किसी तार का *रैखिक आवेश घनत्व* λ की परिभाषा

$$\lambda = \frac{\Delta Q}{\Delta l} \tag{1.24}$$

द्वारा की जाती है। यहाँ Δl सूक्ष्म स्तर पर तार का रैखिक अवयव है। तथापि सूक्ष्म आवेशित अवयवों की एक विशाल संख्या इसमें सम्मिलित है तथा ΔQ इस रैखिक अवयव में समाए आवेश हैं। λ का मात्रक C/m है। इसी प्रकार से आयतनी आवेश घनत्व (सरल शब्दों में जिसे आवेश घनत्व भी कहा जाता है) की परिभाषा भी

$$\rho = \frac{\Delta Q}{\Delta V} \tag{1.25}$$

द्वारा की जाती है। यहाँ ΔQ स्थूल रूप में छोटे आयतन अवयव ΔV में समाए वे आवेश हैं जो सूक्ष्म आवेशित अवयवों की विशाल संख्या को सम्मिलित करते हैं। ρ का मात्रक C/m^3 है।

यहाँ संतत आवेश वितरण की हमारी धारणा यांत्रिकी में हमारे द्वारा अपनाई गई संतत संहति वितरण की धारणा के ही समान है। जब हम किसी द्रव के घनत्व का उल्लेख करते हैं तो उस

* सूक्ष्मदर्शीय स्तर पर, आवेश वितरण असंतत होता है। पृथक आवेश एक आवेशरहित मध्यवर्ती स्थान से पृथकृत होते हैं।

© NCERT not to be republished

समय वास्तव में हम उसके स्थूल घनत्व का ही उल्लेख कर रहे होते हैं। हम द्रव को एक संतत तरल मान लेते हैं तथा उसकी विविक्त आणविक रचना की उपेक्षा कर देते हैं।

विविक्त आवेशों के निकाय के कारण विद्युत क्षेत्र प्राप्त करने [समीकरण (1.10)] की ही भाँति लगभग इसी ढंग से संतत आवेश वितरण के कारण विद्युत क्षेत्र प्राप्त किया जा सकता है। मान लीजिए किसी दिक्स्थान में संतत आवेश वितरण का आवेश घनत्व ρ है। कोई सुविधाजनक मूल बिंदु O चुनिए तथा मान लीजिए आवेश वितरण में किसी बिंदु का स्थिति सदिश $\mathbf{r}$ है। आवेश घनत्व ρ एक बिंदु से दूसरे बिंदु पर भिन्न हो सकता है, अर्थात यह $\mathbf{r}$ का फलन है। आवेश वितरण को ΔV आमाप के छोटे आयतन अवयवों में विभाजित कीजिए। आयतन अवयव ΔV में आवेश का परिमाण $\rho \Delta V$ है।

अब स्थिति सदिश $\mathbf{R}$ के साथ किसी भी व्यापक बिंदु P (आवेश वितरण के भीतर अथवा बाहर) पर विचार कीजिए (चित्र 1.24)। कूलॉम नियम द्वारा आवेश $\rho \Delta V$ के कारण विद्युत क्षेत्र

$$\Delta \mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{\rho \, \Delta V}{r'^2} \hat{\mathbf{r}}' \tag{1.26}$$

यहाँ r' आवेश अवयव तथा P के बीच की दूरी है, तथा $\hat{\mathbf{r}}'$ आवेश अवयव से P की दिशा में एकांक सदिश है। अध्यारोपण सिद्धांत द्वारा आवेश वितरण के कारण कुल विद्युत क्षेत्र विभिन्न आयतन-अवयवों के कारण विद्युत क्षेत्रों का योग करने पर प्राप्त होता है।

$$\mathbf{E} \cong \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \sum_{\text{सभी } \Delta V} \frac{\rho \, \Delta V}{r'^2} \hat{\mathbf{r}}' \tag{1.27}$$

ध्यान दीजिए ρ, r', $\hat{\mathbf{r}}'$ सभी के मान एक बिंदु से दूसरे पर परिवर्तित हो सकते हैं। यथार्थ गणितीय विधि में हमें $\Delta V \to 0$ लेना चाहिए और फिर यह योग एक समाकल बन जाता है। परंतु सरलता की दृष्टि से इस चर्चा को हम यही छोड़ रहे हैं। संक्षेप में कूलॉम नियम तथा अध्यारोपण सिद्धांत के उपयोग द्वारा किसी भी आवेश वितरण के लिए चाहे वह विविक्त हो अथवा संतत, अथवा अंशत: विविक्त और अंशत: संतत हो, विद्युत क्षेत्र ज्ञात किया जा सकता है।

1.14 गाउस नियम

वैद्युत फ्लक्स की अवधारणा के सरल अनुप्रयोग के रूप में आइए किसी r त्रिज्या के ऐसे गोले जिसके केंद्र पर कोई बिंदु आवेश q परिबद्ध है, से गुजरने वाले कुल फ्लक्स पर विचार करें। चित्र 1.25 में दर्शाए अनुसार इस गोले को छोटे क्षेत्रफल अवयवों में विभाजित करते हैं।

क्षेत्रफल अवयव $\Delta \mathbf{S}$ से गुजरने वाला फ्लक्स

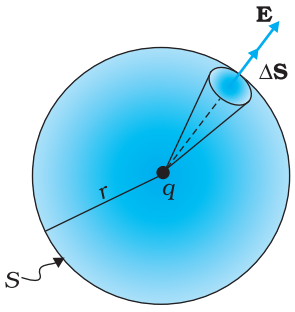
$$\Delta\phi = \mathbf{E} \cdot \Delta \mathbf{S} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \hat{\mathbf{r}} \cdot \Delta \mathbf{S} \tag{1.28}$$

यहाँ हमने एकल आवेश q के कारण विद्युत क्षेत्र के लिए कूलॉम नियम का उपयोग किया है। एकांक सदिश $\hat{\mathbf{r}}$ केंद्र से क्षेत्र अवयव की ओर ध्रुवांतर रेखा के अनुदिश है। अब, चूँकि गोले के पृष्ठ के किसी भी बिंदु पर अभिलंब उस बिंदु पर ध्रुवांतर रेखा के अनुदिश होता है, क्षेत्र अवयव $\Delta \mathbf{S}$ तथा $\hat{\mathbf{r}}$ दोनों एक ही दिशा में होते हैं। इसीलिए,

$$\Delta\phi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \Delta S \tag{1.29}$$

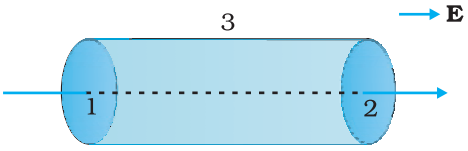
चूँकि एकांक सदिश $\mathbf{r}$ का परिमाण 1 है।

गोले से गुजरने वाला कुल फ्लस्क सभी क्षेत्र-अवयवों से गुजरने वाले फ्लक्सों का योग करने पर प्राप्त होता है



चित्र 1.25 उस गोले से गुजरने वाला फ्लक्स जिसके केंद्र पर बिंदु आवेश q परिबद्ध है।

© NCERT not to be republished



चित्र 1.26 सिलिंडर के पृष्ठ से गुजरने वाले एकसमान विद्युत क्षेत्र के फ्लक्स का परिकलन।

$$\phi = \sum_{\text{सभी } \Delta S} \frac{q}{4\pi\varepsilon_o r^2} \Delta S$$

चूँकि गोले का प्रत्येक क्षेत्र अवयव आवेश से समान दूरी r पर है, अत:

$$\phi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_o r^2} \sum_{\text{सभी } \Delta S} \Delta S = \frac{q}{4\pi\varepsilon_o r^2} S$$

अब, चूँकि गोले का कुल पृष्ठीय क्षेत्र $S = 4\pi r^2$ है, अत:

$$\phi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_o r^2} \times 4\pi r^2 = \frac{q}{\varepsilon_o} \quad (1.30)$$

समीकरण (1.30) स्थिरवैद्युतिकी के व्यापक परिणाम, जिसे *गाउस नियम* कहते हैं, का एक सरल दृष्टांत है। हम बिना उपपत्ति के *गाउस नियम* का इस प्रकार उल्लेख करते हैं–

किसी बंद पृष्ठ S से गुजरने वाला वैद्युत फ्लक्स

$$= q/\varepsilon_0 \quad (1.31)$$

यहाँ q पृष्ठ S द्वारा परिबद्ध कुल आवेश है।

इस नियम से यह उपलक्षित होता है कि यदि किसी बंद पृष्ठ द्वारा कोई आवेश परिबद्ध नहीं किया गया है तो उस पृष्ठ से गुजरने वाला कुल फ्लक्स शून्य होता है। इसे हम चित्र 1.26 की सरल अवस्थिति में सुस्पष्ट देख सकते हैं।

यहाँ विद्युत क्षेत्र एकसमान है तथा हम एक ऐसे बंद बेलनाकार पृष्ठ के विषय में विचार कर रहे हैं जिसमें बेलन का अक्ष एकसमान क्षेत्र **E** के समांतर है। इसके पृष्ठ से गुजरने वाला कुल फ्लक्स ϕ है। $\phi = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3$ यहाँ ϕ_1 तथा ϕ_2 सिलिंडर के पृष्ठ 1 तथा 2 (वृत्ताकार अनुप्रस्थ परिच्छेद के) से गुजरने वाले फ्लक्स को निरूपित करते हैं तथा ϕ_3 बंद पृष्ठ के वक्रित सिलिंडरी भाग से गुजरने वाले फ्लक्स को निरूपित करता है। चूँकि पृष्ठ 3 के प्रत्येक बिंदु पर अभिलंब **E** के लंबवत है, अत: फ्लक्स की परिभाषा के अनुसार $\phi_3 = 0$ । इसके अतिरिक्त पृष्ठ 2 पर बहिर्मुखी अभिलंब **E** के अनुदिश है तथा पृष्ठ 1 पर बहिर्मुखी अभिलंब **E** की दिशा के विपरीत है। अत:

$$\phi_1 = -E S_1, \quad \phi_2 = +E S_2$$

$$S_1 = S_2 = S$$

यहाँ S वृत्ताकार अनुप्रस्थ काट का क्षेत्रफल है। इस प्रकार कुल फ्लक्स शून्य है, जैसा कि गाउस नियम से संभावित था। इस प्रकार जब आप पाएँ कि एक बंद पृष्ठ के अंदर नेट वैद्युत फ्लक्स शून्य है तो हम इस परिणाम पर पहुँचते हैं कि बंद पृष्ठ के अंतर्विष्ट कुल आवेश शून्य है।

गाउस नियम समीकरण (1.31) का अत्यधिक महत्व इस कारण से भी है कि यह व्यापक रूप से सत्य है, तथा केवल उन्हीं सरल प्रकरणों जिन पर हमने ऊपर विचार किया था, लागू नहीं होता है, वरन् सभी प्रकरणों में इसका प्रयोग किया जा सकता है। इस नियम के बारे में, आइए कुछ महत्वपूर्ण तथ्यों पर ध्यान दें–

(i) गाउस नियम प्रत्येक बंद पृष्ठ, चाहे उसकी आकृति तथा आमाप कुछ भी हो, के लिए सत्य है।

(ii) गाउस नियम समीकरण (1.31) के दक्षिण पक्ष के पद q में पृष्ठ द्वारा परिबद्ध सभी आवेशों का योग सम्मिलित है। ये आवेश पृष्ठ के भीतर कहीं भी अवस्थित हो सकते हैं।

(iii) उन परिस्थितियों जिनमें ऐसे पृष्ठ का चयन किया जाता है कि कुछ आवेश पृष्ठ के भीतर तथा कुछ पृष्ठ के बाहर होते हैं, विद्युत क्षेत्र [जिसका फ्लक्स समीकरण (1.31) के वाम पक्ष में दृष्टिगोचर होता है] S के भीतर तथा बाहर स्थित सभी आवेशों के कारण है। तथापि, गाउस

© NCERT not to be republished

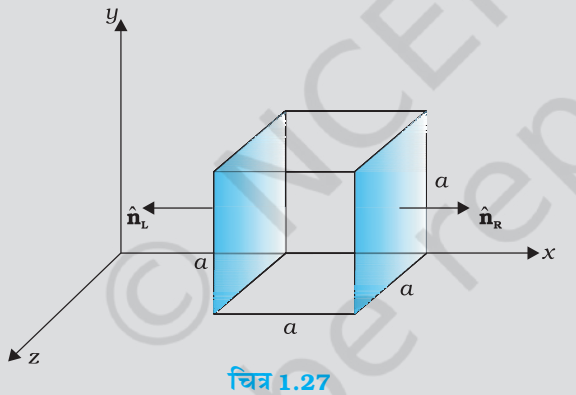
नियम के समीकरण के दक्षिण पक्ष में पद q केवल S के भीतर के कुल आवेशों को निरूपित करता है।

(iv) गाउस नियम के अनुप्रयोग के लिए चयन किए जाने वाले पृष्ठ को गाउसीय पृष्ठ कहते हैं। आप किसी भी गाउसीय पृष्ठ का चयन करके गाउस नियम लागू कर सकते हैं। तथापि, सावधान रहिए गाउसीय पृष्ठ को किसी भी विविक्त आवेश से नहीं गुजरना चाहिए। इसका कारण यह है कि विविक्त आवेशों के निकाय के कारण विद्युत क्षेत्र को किसी भी आवेश की अवस्थिति पर भलीभाँति परिभाषित नहीं किया गया है। (जैसे ही आप किसी आवेश के निकट जाते हैं, विद्युत क्षेत्र सभी मर्यादाओं से बाहर विकसित होता जाता है) परंतु गाउसीय पृष्ठ संतत आवेश वितरण से गुजर सकता है।

(v) *जब निकाय में कुछ सममिति होती है* तो विद्युत क्षेत्र के परिकलन को अधिक आसान बनाने के लिए गाउस नियम प्रायः उपयोगी होता है। उचित गाउसीय पृष्ठ का चयन इसे सुविधाजनक बना देता है।

(vi) अंत में, गाउस नियम कूलॉम नियम में अंतर्निहित दूरी पर व्युत्क्रम वर्ग निर्भरता पर आधारित है। गाउस नियम का कोई उल्लंघन व्युत्क्रम वर्ग नियम से विचलन को संकेत करेगा।

उदाहरण 1.11 चित्र 1.27 में विद्युत क्षेत्र अवयव $E_x = \alpha x^{1/2}$, $E_y = E_z = 0$ है, जिसमें $\alpha = 800$ N/C m$^{1/2}$ है। (a) घन से गुजरने वाला फ्लक्स, तथा (b) घन के भीतर आवेश परिकलित कीजिए। $a = 0.1$ m मानिए।



चित्र 1.27

हल

(a) चूँकि विद्युत क्षेत्र का केवल x अवयव ही है, x दिशा के लंबवत फलकों के लिए, $\mathbf{E}$ तथा $\Delta\mathbf{S}$ के बीच के कोण $\pm\pi/2$ हैं। अतः फ्लक्स $\phi = \mathbf{E}.\Delta\mathbf{S}$ घन के केवल दो छायांकित फलकों को छोड़कर शेष सभी फलकों के लिए पृथक-पृथक रूप से शून्य है। अब, बाएँ फलक पर विद्युत क्षेत्र का परिमाण

$E_L = \alpha x^{1/2} = \alpha a^{1/2}$

(चूँकि बाएँ फलक पर $x = a$)

दाएँ फलक पर विद्युत क्षेत्र का परिमाण

$E_R = \alpha\, x^{1/2} = \alpha\,(2a)^{1/2}$

(चूँकि दाएँ फलक पर $x = 2a$)

इनके तद्नुरूपी फ्लक्स हैं

$\phi_L = \mathbf{E}_L \cdot \Delta\mathbf{S} = \Delta S \mathbf{E}_L \cdot \hat{\mathbf{n}}_L = E_L\, \Delta S \cos\theta = -E_L\, \Delta S$, चूँकि $\theta = 180°$

$= -E_L a^2$

$\phi_R = \mathbf{E}_R \cdot \Delta\mathbf{S} = E_R\, \Delta S \cos\theta = E_R\, \Delta S$, चूँकि $\theta = 0°$

$= E_R a^2$

घन से गुजरने वाला नेट फ्लक्स

उदाहरण 1.11

© NCERT not to be republished

उदाहरण 1.11

$= \phi_R + \phi_L = E_R a^2 - E_L a^2 = a^2 (E_R - E_L) = \alpha a^2 [(2a)^{1/2} - a^{1/2}]$

$= \alpha a^{5/2} \left(\sqrt{2} - 1\right)$

$= 800\ (0.1)^{5/2} \left(\sqrt{2} - 1\right)$

$= 1.05\ \text{N m}^2\ \text{C}^{-1}$

(b) हम घन के भीतर कुल आवेश q को ज्ञात करने के लिए गाउस नियम का उपयोग कर सकते हैं। हम जानते हैं कि $\phi = q/\varepsilon_0$ अथवा $q = \phi\varepsilon_0$ इसलिए

$q = 1.05 \times 8.854 \times 10^{-12}\ \text{C} = 9.27 \times 10^{-12}\ \text{C}$

उदाहरण 1.12

उदाहरण 1.12 कोई विद्युत क्षेत्र धनात्मक x के लिए, धनात्मक x दिशा में एकसमान है तथा उसी परिमाण के साथ परंतु ऋणात्मक x के लिए, ऋणात्मक x दिशा में एकसमान है। यह दिया गया है कि $\mathbf{E} = 200\ \hat{\mathbf{i}}$ N/C जबकि $x > 0$ तथा $\mathbf{E} = -200\ \hat{\mathbf{i}}$ N/C, जबकि $x < 0$ है। 20 cm लंबे 5 cm त्रिज्या के किसी लंबवृत्तीय सिलिंडर का केंद्र मूल बिंदु पर तथा इस अक्ष x के इस प्रकार अनुदिश है कि इसका एक फलक चित्र 1.28 में दर्शाए अनुसार $x = +10$ cm तथा दूसरा फलक $x = -10$ cm पर है। (a) प्रत्येक चपटे फलक से गुजरने वाला नेट बहिर्मुखी फ्लक्स कितना है? (b) सिलिंडर के पार्श्व से गुजरने वाला फ्लक्स कितना है? (c) सिलिंडर से गुजरने वाला नेट बहिर्मुखी फ्लक्स कितना है? (d) सिलिंडर के भीतर नेट आवेश कितना है?

हल

(a) चित्र में हम यह देखते हैं कि बाएँ फलक पर $\mathbf{E}$ तथा $\Delta\mathbf{S}$ समांतर हैं। इसलिए बहिर्मुखी फ्लक्स है

$\phi_L = \mathbf{E}\cdot\Delta\mathbf{S} = -200\ \hat{\mathbf{i}}\cdot\Delta\mathbf{S}$

$= +200\ \Delta S$, चूँकि $\hat{\mathbf{i}}\cdot\Delta\mathbf{S} = -\Delta S$

$= +200 \times \pi\ (0.05)^2 = +1.57\ \text{N m}^2\ \text{C}^{-1}$

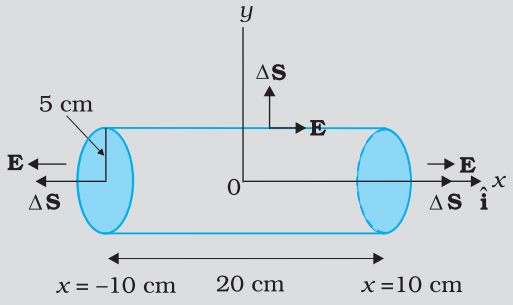
दाएँ फलक पर $\mathbf{E}$ तथा $\Delta\mathbf{S}$ समांतर हैं, इसलिए

$\phi_R = \mathbf{E}\cdot\Delta\mathbf{S} = +1.57\ \text{N m}^2\ \text{C}^{-1}$

(b) सिलिंडर के पार्श्व के किसी भी बिंदु पर $\mathbf{E}$ क्षेत्र अवयव $\Delta\mathbf{S}$ के लंबवत है, इसलिए $\mathbf{E}\cdot\Delta\mathbf{S} = 0$ इसलिए सिलिंडर के पार्श्व के बाहर फ्लक्स शून्य है।

(c) सिलिंडर से होकर नेट बहिर्मुखी फ्लक्स

$\phi = (1.57 + 1.57 + 0) = 3.14\ \text{N m}^2\ \text{C}^{-1}$



चित्र 1.28

(d) सिलिंडर के भीतर नेट आवेश का मान गाउस नियम द्वारा ज्ञात किया जा सकता है जिससे हमें प्राप्त होता है

$q = \varepsilon_0\phi$

$= 3.14 \times 8.854 \times 10^{-12}\ \text{C}$

$= 2.78 \times 10^{-11}\ \text{C}$

© NCERT not to be republished

1.15 गाउस नियम के अनुप्रयोग

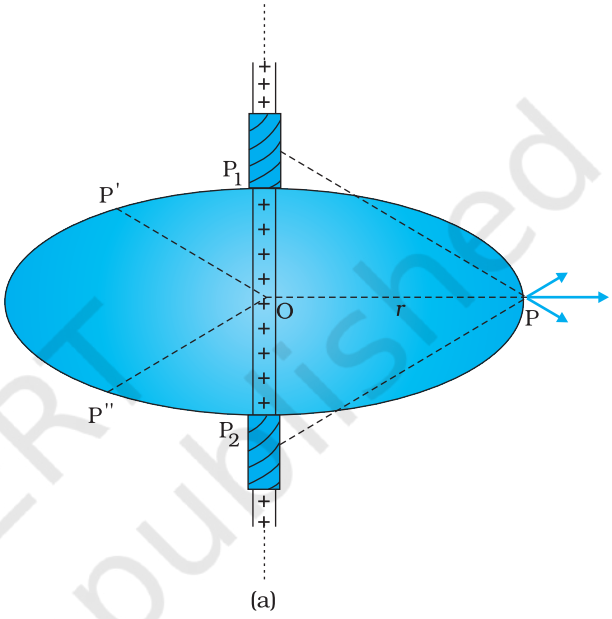
जैसी कि हम ऊपर चर्चा कर चुके हैं कि किसी व्यापक आवेश वितरण के कारण विद्युत क्षेत्र समीकरण (1.27) द्वारा व्यक्त किया जाता है। कुछ विशिष्ट प्रकरणों को छोड़कर, व्यवहार में, इस समीकरण में सम्मिलित संकलन (अथवा समाकलन) की प्रक्रिया दिक्स्थान के सभी बिंदुओं पर विद्युत क्षेत्र प्राप्त करने के लिए कार्यान्वित नहीं की जा सकती। तथापि, कुछ सममित आवेश विन्यासों के लिए गाउस नियम का उपयोग करके विद्युत क्षेत्र को सरल ढंग से प्राप्त करना संभव है। कुछ उदाहरणों से इसे आसानी से समझा जा सकता है।

1.15.1 अनंत लंबाई के एकसमान आवेशित सीधे तार के कारण विद्युत क्षेत्र

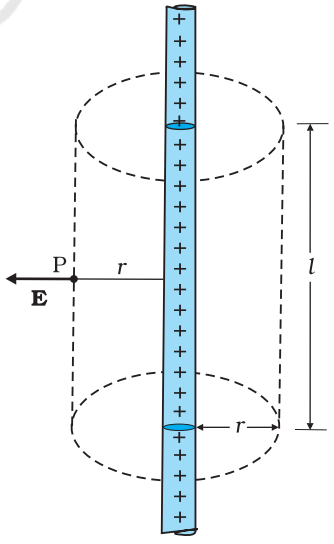
किसी अनंत लंबाई के एकसमान रैखिक आवेश घनत्व λ के सीधे पतले तार पर विचार कीजिए। स्पष्ट रूप से यह तार एक सममित अक्ष है। मान लीजिए हम O से P की दिशा में ध्रुवांतर (त्रिज्य सदिश) लेकर इसे तार के चारों ओर घूर्णन कराते हैं। इस प्रकार प्राप्त बिंदु P, P′, P″ आवेशित तार के संदर्भ में संपूर्ण रूप से तुल्य हैं। इससे यह उपलक्षित होता है कि इन बिंदुओं पर विद्युत क्षेत्र का परिमाण समान होना चाहिए। प्रत्येक बिंदु पर विद्युत क्षेत्र की दिशा अरीय (त्रिज्यीय) होनी चाहिए (यदि $\lambda > 0$, तो बहिर्मुखी तथा यदि $\lambda < 0$, तो अंतर्मुखी)। यह चित्र 1.29 से स्पष्ट है।

दर्शाए अनुसार तार के रैखिक अवयवों P_1 तथा P_2 के युगल पर विचार करें। इस युगल के दो अवयवों द्वारा उत्पन्न विद्युत क्षेत्रों को संकलित करने पर प्राप्त परिणामी विद्युत क्षेत्र अरीय होता है [ध्रुवांतर के अभिलंबवत अवयव एक-दूसरे को निरस्त कर देते हैं]। यह इस प्रकार के सभी युगलों के लिए सत्य है। अतः किसी भी बिंदु P पर कुल विद्युत क्षेत्र अरीय है। अंत में, चूँकि तार अनंत है, तार की लंबाई के अनुदिश विद्युत क्षेत्र बिंदु P की स्थिति पर निर्भर नहीं करता। संक्षेप में, तार को अभिलंबवत काटने वाले तल में विद्युत क्षेत्र हर स्थान पर अरीय है तथा इसका परिमाण केवल त्रिज्य दूरी r पर निर्भर करता है।

विद्युत क्षेत्र परिकलित करने के लिए चित्र 1.29(b) में दर्शाए अनुसार किसी बेलनाकार गाउसीय पृष्ठ की कल्पना कीजिए। चूँकि विद्युत क्षेत्र हर स्थान पर अरीय है, बेलनाकार गाउसीय पृष्ठ के दो सिरों से गुजरने वाला फ्लक्स शून्य है। पृष्ठ के बेलनाकार भाग पर विद्युत क्षेत्र **E** पृष्ठ के हर बिंदु पर अभिलंबवत है तथा केवल r पर निर्भर होने के कारण इसका परिमाण नियत है। वक्रित भाग का पृष्ठीय क्षेत्रफल $2\pi rl$ है, यहाँ l सिलिंडर की लंबाई है।



(a)



(b)

चित्र 1.29 (a) अनंत लंबाई के एकसमान आवेशित पतले सीधे तार के कारण विद्युत क्षेत्र अरीय (त्रिज्यीय) होता है। (b) एकसमान रैखिक आवेश घनत्व के लंबे पतले तार के लिए गाउसीय पृष्ठ।

© NCERT not to be republished

गाउसीय पृष्ठ से गुज़रने वाला फ्लक्स

= पृष्ठ के वक्रित बेलनाकार भाग से गुज़रने वाला फ्लक्स

= $E \times 2\pi rl$

पृष्ठ में λl के बराबर आवेश सम्मिलित है। तब गाउस नियम से प्राप्त होता है

$E \times 2\pi rl = \lambda l/\varepsilon_0$

अर्थात $E = \dfrac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r}$

सदिश रूप में किसी भी बिंदु पर विद्युत क्षेत्र **E** इस प्रकार व्यक्त किया जाता है

$$\mathbf{E} = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r}\ \hat{\mathbf{n}} \qquad (1.32)$$

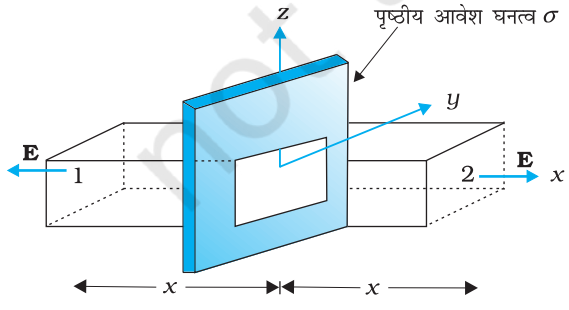
यहाँ $\hat{\mathbf{n}}$ तार के किसी बिंदु के अभिलंबवत गुजरने वाले तल में त्रिज्य एकांक सदिश है। जब λ धनात्मक होता है तो **E** बहिर्मुखी होता है और जब λ ऋणात्मक होता है, यह अंतर्मुखी होता है।

ध्यान दीजिए, जब हम सदिश **A** को एकांक सदिश से गुणित अदिश के रूप में, अर्थात $\mathbf{A} = A\,\hat{\mathbf{a}}$ के रूप में लिखते हैं तो अदिश A एक बीजगणितीय संख्या होती है। यह धनात्मक भी हो सकती है और ऋणात्मक भी। यदि $A > 0$ है तो **A** की दिशा एकांक सदिश $\hat{\mathbf{a}}$ के समान होगी तथा यदि $A < 0$ है तो **A** की दिशा $\hat{\mathbf{a}}$ की दिशा के विपरीत होगी। जब हम ऋणेतर मानों तक सीमित रखना चाहते हैं तो हम प्रतीक $|\mathbf{A}|$ का उपयोग करते हैं तथा इसे **A** का माड्यूल्स (मापांक) कहते हैं। इस प्रकार $|\mathbf{A}| \geq 0$ होता है।

यह भी ध्यान दीजिए कि उपरोक्त चर्चा में यद्यपि पृष्ठ (λl) द्वारा परिबद्ध आवेश को ही केवल सम्मिलित किया गया था, परंतु विद्युत क्षेत्र **E** समस्त तार पर आवेश के कारण है। साथ ही यह कल्पना कर लेना कि तार की लंबाई अनंत है इस कल्पना के बिना हम विद्युत क्षेत्र **E** को बेलनाकार गाउसीय पृष्ठ के अभिलंबवत नहीं ले सकते। तथापि, लंबे तार के बेलनाकार भागों के चारों ओर जहाँ अंत्य प्रभाव (end effects) की उपेक्षा की जा सकती है, विद्युत क्षेत्र के लिए समीकरण (1.32) सन्निकटतः सही है।

1.15.2 एकसमान आवेशित अनंत समतल चादर के कारण विद्युत क्षेत्र

मान लीजिए किसी अनंत समतल चादर (चित्र 1.30) का एकसमान पृष्ठीय आवेश घनत्व σ है। हम x-अक्ष को दिए गए तल के अभिलंबवत मानते हैं। सममिति के अनुसार विद्युत क्षेत्र y तथा z निर्देशांकों पर निर्भर नहीं करेगा तथा इसकी प्रत्येक बिंदु पर दिशा x-दिशा के समांतर होनी चाहिए।



चित्र 1.30 एकसमान आवेशित अनंत आवेश चादर के लिए गाउसीय पृष्ठ।

हम गाउसीय पृष्ठ को चित्र में दर्शाए अनुसार A अनुप्रस्थकाट क्षेत्रफल के आयताकार समांतर षट्फलक जैसा ले सकते हैं (वैसे तो बेलनाकार पृष्ठ से भी यह कार्य हो सकता है)। जैसा चित्र से दृष्टिगोचर होता है, केवल दो फलक 1 तथा 2 ही फ्लक्स में योगदान देंगे; विद्युत क्षेत्र रेखाएँ अन्य फलकों के समांतर हैं और वे इसीलिए कुल फ्लक्स में योगदान नहीं देतीं।

पृष्ठ 1 के अभिलंबवत एकांक सदिश $-x$ दिशा में है जबकि पृष्ठ 2 के अभिलंबवत एकांक सदिश $+x$ दिशा में है। अतः, दोनों पृष्ठों से गुजरने वाले फ्लक्स $\mathbf{E}.\Delta\mathbf{S}$ बराबर हैं और संयोजित हो जाते हैं। इसीलिए गाउसीय पृष्ठ से गुजरने वाला नेट फ्लक्स $2\,EA$ है। पृष्ठ द्वारा परिबद्ध आवेश σA है। इसीलिए गाउस नियम द्वारा हमें यह संबंध प्राप्त होता है

© NCERT not to be republished

$2\,EA = \sigma A/\varepsilon_0$

अथवा $E = \sigma/2\varepsilon_0$

सदिश रूप में

$$\mathbf{E} = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}\hat{\mathbf{n}} \qquad (1.33)$$

यहाँ $\hat{\mathbf{n}}$ तल के अभिलंबवत इससे दूर जाता हुआ एकांक सदिश है।

यदि σ धनात्मक है तो $\mathbf{E}$ तल से बहिर्मुखी तथा यदि σ ऋणात्मक है तो $\mathbf{E}$ तल से अंतर्मुखी होता है। ध्यान दीजिए गाउस नियम के अनुप्रयोग से हमें एक अतिरिक्त तथ्य यह प्राप्त होता है कि E, x पर भी निर्भर नहीं है।

किसी परिमित बड़ी समतलीय चादर के लिए समीकरण (1.33), सिरों से दूर समतलीय चादर के मध्यवर्ती क्षेत्रों में सन्निकटतः सत्य है।

1.15.3 एकसमान आवेशित पतले गोलीय खोल के कारण विद्युत क्षेत्र

मान लीजिए R त्रिज्या के पतले गोलीय खोल का एकसमान पृष्ठीय आवेश घनत्व σ है (चित्र 1.31)। स्पष्ट रूप से इस स्थिति में गोलीय सममिति है। किसी बिंदु P पर चाहे वह भीतर है अथवा बाहर, विद्युत क्षेत्र केवल r पर निर्भर कर सकता है (यहाँ r खोल के केंद्र से उस बिंदु तक की त्रिज्य दूरी है।)तथा इस क्षेत्र को अरीय (अर्थात ध्रुवांतर के अनुदिश) होना चाहिए।

(i) ***खोल के बाहर विद्युत क्षेत्र***–खोल के बाहर ध्रुवांतर r के किसी बिंदु P पर विचार कीजिए। बिंदु P पर $\mathbf{E}$ का परिकलन करने के लिए हम केंद्र O तथा त्रिज्या r के बिंदु P से गुजरने वाले गोले को गाउसीय पृष्ठ मानते हैं। दिए गए आवेश विन्यास के सापेक्ष इस गोले पर स्थित प्रत्येक बिंदु समतुल्य है। (गोलीय सममिति से हमारा यही अभिप्राय है।) इसीलिए गाउसीय पृष्ठ के प्रत्येक बिंदु पर विद्युत क्षेत्र का समान परिमाण $\mathbf{E}$ है तथा प्रत्येक बिंदु पर ध्रुवांतर के अनुदिश है। इस प्रकार प्रत्येक बिंदु पर $\mathbf{E}$ तथा $\Delta\mathbf{S}$ समांतर हैं तथा प्रत्येक अवयव से गुज़रने वाला फ्लक्स $E\,\Delta S$ है। सभी ΔS का संकलन करने पर गाउसीय पृष्ठ से गुज़रने वाला फ्लक्स $E \times 4\,\pi\,r^2$ है। परिबद्ध आवेश $\sigma \times 4\,\pi\,R^2$ है। गाउस नियम से

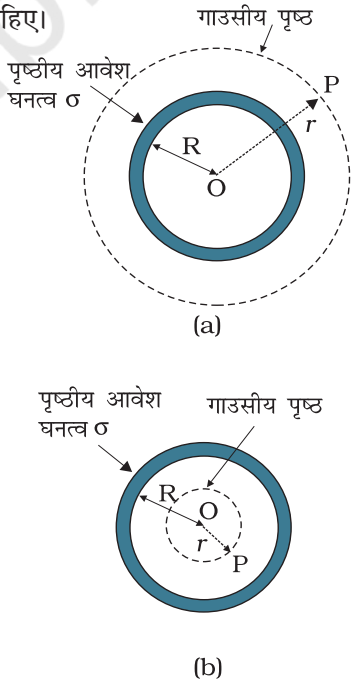
$$E \times 4\,\pi\,r^2 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\,4\,\pi\,R^2$$

अथवा $E = \dfrac{\sigma R^2}{\varepsilon_0 r^2} = \dfrac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$

यहाँ $q = 4\,\pi R^2\,\sigma$ गोलीय खोल पर कुल आवेश है।

सदिश रूप में, $$\mathbf{E} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\hat{\mathbf{r}} \qquad (1.34)$$

यदि $q > 0$ है तो विद्युत क्षेत्र बहिर्मुखी होता है तथा यदि $q < 0$ है तो विद्युत क्षेत्र अंतर्मुखी होता है। तथापि, यह खोल के केंद्र O पर स्थित आवेश q द्वारा उत्पन्न विद्युत क्षेत्र है। अतः खोल के बाहर स्थित बिंदुओं पर एकसमान आवेशित गोलीय खोल के कारण विद्युत क्षेत्र इस प्रकार का होता है, जैसे कि खोल का समस्त आवेश उसके केंद्र पर स्थित है।



चित्र 1.31 किसी बिंदु के लिए जो (a) $r > R$, (b) $r < R$ पर है, गाउसीय पृष्ठ।

(ii) ***खोल के भीतर विद्युत क्षेत्र***–चित्र 1.31(b) में बिंदु P खोल के भीतर है। इस प्रकरण में भी गाउसीय पृष्ठ P से गुज़रने वाला वह गोला है जिसका केंद्र O है। पहले किए गए

© NCERT not to be republished

परिकलनों की ही भाँति गाउसीय पृष्ठ से गुजरने वाला फ्लक्स $E \times 4\pi r^2$ है। तथापि इस प्रकरण में, गाउसीय पृष्ठ में कोई आवेश परिबद्ध नहीं है। तब गाउस नियम के अनुसार

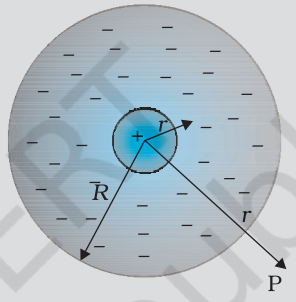
$E \times 4\pi r^2 = 0$

अर्थात $E = 0 \qquad (r < R)$ (1.35)

अर्थात एकसमान आवेशित पतले गोलीय खोल* के कारण उसके भीतर स्थित सभी बिंदुओं पर विद्युत क्षेत्र शून्य है। यह महत्वपूर्ण परिणाम गाउस नियम का प्रत्यक्ष निष्कर्ष है जो कूलॉम नियम से प्राप्त हुआ है। इस नियम का प्रायोगिक सत्यापन कूलॉम नियम में $1/r^2$ की निर्भरता की पुष्टि करता है।

उदाहरण 1.13

उदाहरण 1.13 परमाणु के प्रारंभिक प्रतिरूप में यह माना गया था कि आवेश Ze का बिंदु आमाप का धनात्मक नाभिक होता है जो त्रिज्या R तक एकसमान घनत्व के ऋणावेश से घिरा हुआ है। परमाणु पूर्ण रूप में विद्युत उदासीन है। इस प्रतिरूप के लिए नाभिक से r दूरी पर विद्युत क्षेत्र कितना है?



चित्र 1.32 परमाणु का प्रारंभिक प्रतिरूप।

हल: चित्र 1.32 में इस प्रतिरूप का आवेश वितरण दर्शाया गया है। चूँकि परमाणु उदासीन (नाभिक में आवेश Ze + ऋणावेश) है, अत: R त्रिज्या के एकसमान गोलीय आवेश वितरण में कुल ऋणात्मक आवेश $-Ze$ होना चाहिए। इससे हमें तुरंत ही ऋणात्मक आवेश घनत्व ρ प्राप्त हो जाता है। चूँकि हमारे पास कुल शून्य आवेश होना चाहिए, अत:

$$\frac{4\pi R^3}{3}\rho = 0 - Ze$$

अथवा $$\rho = -\frac{3Ze}{4\pi R^3}$$

नाभिक से r दूरी पर स्थित बिंदु P पर विद्युत क्षेत्र **E(r)** ज्ञात करने के लिए हम गाउस नियम का उपयोग करते हैं। आवेश वितरण की गोलीय सममिति के कारण विद्युत क्षेत्र **E(r)** का परिणाम केवल त्रिज्य दूरी पर निर्भर करता है, यहाँ **r** की दिशा का कोई अर्थ नहीं होता। इसकी दिशा मूल बिंदु से P की ओर ध्रुवांतर **r** के अनुदिश (अथवा विपरीत) है। स्पष्ट रूप से इस प्रकरण में गाउसीय पृष्ठ एक गोलीय पृष्ठ है जिसका केंद्र नाभिक है। यहाँ हम दो स्थितियों $r < R$ तथा $r > R$ पर विचार करते हैं।

(i) $r < R$: गोलीय पृष्ठ द्वारा परिबद्ध वैद्युत फ्लक्स

$\phi = E(r) \times 4\pi r^2$

यहाँ $E(r)$, r पर विद्युत क्षेत्र का परिमाण है। इसका कारण यह है गोलीय गाउसीय पृष्ठ के किसी भी बिंदु पर विद्युत क्षेत्र की दिशा पृष्ठ के उस बिंदु पर अभिलंबवत होती है तथा इसका परिमाण पृष्ठ के सभी बिंदुओं पर समान होता है।

* इसकी तुलना भौतिकी पाठ्यपुस्तक कक्षा 11 के अनुभाग 8.5 में वर्णित एकसमान द्रव्यमान खोल से कीजिए।

© NCERT not to be republished

उदाहरण 1.13

यहाँ गाउसीय पृष्ठ द्वारा परिबद्ध आवेश q धनात्मक नाभिकीय आवेश तथा r त्रिज्या के गोले में विद्यमान ऋणात्मक आवेश है

अर्थात $q = Ze + \frac{4\pi r^3}{3}\rho$

पहले प्राप्त आवेश घनत्व ρ का मान प्रतिस्थापित करने पर हमें प्राप्त होता है।

$$q = Ze - Ze\frac{r^3}{R^3}$$

तब गाउस नियम से हमें प्राप्त होता है।

$$E(r) = \frac{Ze}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r^2} - \frac{r}{R^3}\right); \quad r < R$$

यहाँ विद्युत क्षेत्र त्रिज्यत: बहिर्मुखी निदर्शित है।

(ii) $r > R$: इस प्रकरण में, चूँकि परमाणु उदासीन है, गोलीय गाउसीय पृष्ठ द्वारा परिबद्ध आवेश शून्य है। इस प्रकार, गाउस नियम से

$E(r) \times 4\pi r^2 = 0$ अथवा $(r) = 0; \quad r > R$

$r = R$, पर दोनों प्रकरणों से समान परिणाम, $E = 0$ प्राप्त होता है।

सममिति संक्रियाओं के विषय में

भौतिकी में हमारा प्राय: विभिन्न सममिति के निकायों से सामना होता है। इन सममितियों पर विचार करना सीधे-सीधे परिकलनों की तुलना में कहीं अधिक शीघ्रता से परिणाम तक पहुँचने में सहायक होता है। उदाहरण के लिए, y-z तल के अनुदिश अनंत लंबाई की आवेश की एकसमान चादर (पृष्ठीय आवेश घनत्व σ) पर विचार कीजिए। यह निकाय अपरिवर्तित रहता है यदि (a) y-z तल के समांतर किसी भी दिशा में स्थानांतरित किया जाता है, (b) x-अक्ष के परित: किसी भी कोण पर घूर्णन कराया जाता है। जिस प्रकार यह निकाय इस प्रकार की सममिति संक्रियाओं के अधीन अपरिवर्तित रहता है, इसी प्रकार इसके गुणधर्म भी अपरिवर्तित रहने चाहिए। विशेष रूप से, इस उदाहरण में, विद्युत क्षेत्र **E** अपरिवर्तितत होना चाहिए।

y-अक्ष के अनुदिश स्थानांतरीय सममिति यह दर्शाती है कि किसी बिंदु $(0, y_1, 0)$ पर विद्युत क्षेत्र $(0, y_2, 0)$ पर विद्युत क्षेत्र के समान होना चाहिए। इसी प्रकार z-अक्ष के अनुदिश स्थानांतरीय सममिति यह दर्शाती है कि दो बिंदुओं $(0, 0, z_1)$ तथा $(0, 0, z_2)$ पर विद्युत क्षेत्र समान होना चाहिए। x- अक्ष के चारों ओर घूर्णन सममिति का उपयोग करके हम यह निष्कर्ष निकाल सकते हैं कि **E** y-z तल के लंबवत होना चाहिए, अर्थात यह x- दिशा के समांतर होना चाहिए।

अब किसी ऐसी सममिति को सोचने का प्रयास कीजिए जो आपको यह बताए कि विद्युत क्षेत्र का परिमाण एक नियतांक है, जो x- निर्देशांक पर निर्भर नहीं करता। इस प्रकार यह कहा जा सकता है कि किसी अनंत लंबाई की एकसमान चालक चादर के कारण उत्पन्न विद्युत क्षेत्र का परिमाण दिक्स्थान में हर बिंदु पर समान होता है। तथापि चादर के दोनों ओर विद्युत क्षेत्र की दिशा एक-दूसरे के विपरीत होती है।

इसकी तुलना उन परिणामों से कीजिए जो कूलॉम नियम के उपयोग द्वारा सीधे परिकलन कर परिणाम पर पहुँचने के लिए आवश्यक हों।

© NCERT not to be republished

सारांश

1. विद्युत तथा चुंबकीय बल परमाणुओं, अणुओं तथा स्थूल द्रव्य के गुणधर्मों का निर्धारण करते हैं।
2. घर्षण विद्युत के सरल प्रयोगों के आधार पर यह निष्कर्ष निकाला जा सकता है कि प्रकृति में दो प्रकार के आवेश होते हैं। सजातीय आवेशों में प्रतिकर्षण तथा विजातीय आवेशों में आकर्षण होता है। परिपाटी के अनुसार, रेशम से रगड़ने पर काँच की छड़ पर धनावेश होता है; तथा फर से रगड़ने पर प्लास्टिक की छड़ पर ऋणावेश होता है।
3. चालक अपने में से होकर सरलता से वैद्युत आवेश की गति होने देते हैं जबकि विद्युतरोधी ऐसा नहीं करते। धातुओं में गतिशील आवेश इलेक्ट्रॉन होते हैं; वैद्युत अपघट्यों में धनायन तथा ऋणायन दोनों ही गति करते हैं।
4. वैद्युत आवेशों के तीन गुणधर्म होते हैं : क्वांटमीकरण, योज्यता तथा संरक्षण।
   वैद्युत आवेश के क्वांटमीकरण से तात्पर्य है कि किसी वस्तु का कुल आवेश (q) सदैव ही आवेश के एक मूल क्वांटम (e) के पूर्णांकी गुणज अर्थात $q = n e$ होता है, जहाँ $n = 0, \pm1, \pm2, \pm3, \ldots$ है। प्रोटॉन तथा इलेक्ट्रॉन पर क्रमशः $+e$ तथा $-e$ आवेश होते हैं। स्थूल आवेशों जिनके लिए n एक अत्यधिक बड़ी संख्या होती है, में आवेश के क्वांटमीकरण की उपेक्षा की जा सकती है।
   वैद्युत आवेशों की योज्यता से हमारा तात्पर्य यह है कि किसी निकाय का कुल आवेश उस निकाय के सभी एकाकी आवेशों का बीजगणितीय योग (अर्थात योग करते समय उनके चिह्नों को ध्यान में रखकर) होता है।
   वैद्युत आवेशों के संरक्षण से हमारा तात्पर्य यह है कि किसी वियुक्त निकाय (isolated system) का कुल आवेश समय के साथ अपरिवर्तित रहता है। इसका अर्थ यह है कि जब घर्षण द्वारा वस्तुएँ आवेशित की जाती हैं तो आवेशों का एक वस्तु से दूसरी वस्तु में स्थानांतरण होता है, परंतु इस प्रक्रिया में न तो कोई आवेश उत्पन्न होता है और न ही नष्ट होता है।
5. *कूलॉम नियम* : दो बिंदु आवेशों q_1 तथा q_2 के बीच पारस्परिक स्थिर वैद्युत बल, आवेशों के गुणनफल $q_1 q_2$ के अनुक्रमानुपाती तथा उनके बीच की दूरी r_{21} के वर्ग के व्युत्क्रमानुपाती होता है। गणितीय रूप में

$$\mathbf{F}_{21} = q_2 \text{ पर } q_1 \text{ के कारण लगने वाला बल } = \frac{k(q_1 q_2)}{r_{21}^2}\hat{\mathbf{r}}_{21}$$

   यहाँ $\hat{\mathbf{r}}_{21}$ आवेश q_1 से q_2 की दिशा में एकांक सदिश है तथा $k = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ आनुपातिकता स्थिरांक है। SI मात्रकों में, आवेश का मात्रक कूलॉम है। नियतांक ε_0 का प्रायोगिक मान है

$$\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}\ \mathrm{C^2\ N^{-1}\ m^{-2}}$$

   k का सन्निकट मान $k = 9 \times 10^9\ \mathrm{N\ m^2\ C^{-2}}$ होता है।
6. किसी प्रोटॉन तथा किसी इलेक्ट्रॉन के बीच वैद्युत बल तथा गुरुत्वाकर्षण बल का अनुपात है,

$$\frac{ke^2}{Gm_e m_p} \cong 2.4 \times 10^{39}$$

7. *अध्यारोपण सिद्धांत* : यह सिद्धांत इस गुणधर्म पर आधारित है कि दो आवेशों के बीच लगने वाले आकर्षी अथवा प्रतिकर्षी बल किसी तीसरे (अथवा अधिक) अतिरिक्त आवेश की उपस्थिति से प्रभावित नहीं होते। आवेशों $q_1, q_2, q_3 \ldots$ के किसी समूह के लिए किसी आवेश (जैसे q_1) पर बल, q_1 पर q_2 के कारण बल, q_1 पर q_3 के कारण बल आदि-आदि के

© NCERT not to be republished

सदिश योग के बराबर होता है। प्रत्येक युगल के लिए यह बल पहले वर्णित दो आवेशों के लिए कूलॉम के नियम द्वारा ही व्यक्त किया जाता है।

8. किसी आवेश विन्यास के कारण किसी बिंदु पर विद्युत क्षेत्र **E** किसी छोटे धनात्मक परीक्षण आवेश (test charge) q को उस बिंदु पर रखने पर उसके द्वारा अनुभव किए जाने वाले बल को उस आवेश के परिमाण द्वारा विभाजित करने पर प्राप्त होता है। किसी बिंदु आवेश q के कारण विद्युत क्षेत्र का कोई परिमाण $|q|/4\pi\varepsilon_0 r^2$ होता है; यदि q धनात्मक है तो यह क्षेत्र अरीय (त्रिज्यीय) बहिर्मुखी होता है तथा यदि q ऋणात्मक है तो अरीय (त्रिज्यीय) अंतर्मुखी होता है। कूलॉम बल की भाँति विद्युत क्षेत्र भी अध्यारोपण सिद्धांत को संतुष्ट करता है।
9. विद्युत क्षेत्र रेखा ऐसा वक्र है जिसके किसी भी बिंदु पर खींचा गया स्पर्शी, वक्र के उस बिंदु पर विद्युत क्षेत्र की दिशा बताता है। क्षेत्र रेखाओं की सापेक्षिक संकुलता विभिन्न बिंदुओं पर विद्युत क्षेत्र की सापेक्षिक तीव्रता को इंगित करती है। प्रबल विद्युत क्षेत्र में रेखाएँ पास-पास तथा दुर्बल क्षेत्र में ये एक-दूसरे से काफी दूर होती हैं। एकसमान (अथवा नियत) विद्युत क्षेत्र में क्षेत्र रेखाएँ एक-दूसरे से एकसमान दूरी पर समांतर सरल रेखाएँ होती हैं।
10. क्षेत्र रेखाओं की कुछ महत्वपूर्ण विशेषताएँ इस प्रकार हैं– (a) आवेशमुक्त दिक्स्थान में क्षेत्र रेखाएँ संतत वक्र होती हैं जो कहीं नहीं टूटतीं। (b) दो क्षेत्र रेखाएँ एक-दूसरे को कदापि नहीं काट सकतीं। (c) स्थिरवैद्युत क्षेत्र रेखाएँ धनावेश से आरंभ होकर ऋणावेश पर समाप्त हो जाती हैं– ये संवृत पाश (बंद लूप) नहीं बना सकतीं।
11. वैद्युत द्विध्रुव परिमाण में समान विजातीय दो आवेशों q तथा $-q$, जिनके बीच पृथकन $2a$ हो, का युग्म होता है। इसके द्विध्रुव आघूर्ण सदिश **p** का परिमाण $2qa$ होता है तथा यह द्विध्रुव अक्ष $-q$ से q की दिशा में होता है।
12. किसी वैद्युत द्विध्रुव का इसके निरक्षीय/विषुवतीय समतल (अर्थात इसके अक्ष के लंबवत तथा इसके केंद्र से गुजरने वाले समतल) पर इसके केंद्र से r दूरी पर विद्युत क्षेत्र–

$$\mathbf{E} = \frac{-\mathbf{p}}{4\pi\varepsilon_o}\frac{1}{(a^2+r^2)^{3/2}}$$

$$\cong \frac{-\mathbf{p}}{4\pi\varepsilon_o r^3}, \quad (r >> a \text{ के लिए})$$

द्विध्रुव अक्ष पर केंद्र से r दूरी पर द्विध्रुव विद्युत क्षेत्र

$$\mathbf{E} = \frac{2\mathbf{p}r}{4\pi\varepsilon_0(r^2-a^2)^2}$$

$$\cong \frac{2\mathbf{p}}{4\pi\varepsilon_0 r^3} \quad (r >> a \text{ के लिए})$$

इस तथ्य पर ध्यान देना चाहिए कि किसी द्विध्रुव का विद्युत क्षेत्र $1/r^3$ पर निर्भर होता है, जबकि किसी बिंदु आवेश के कारण विद्युत क्षेत्र $1/r^2$ पर निर्भर होता है।

13. किसी एकसमान विद्युत क्षेत्र **E** में कोई वैद्युत द्विध्रुव एक बल आघूर्ण $\boldsymbol{\tau}$ का अनुभव करता है।
$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{p} \times \mathbf{E}$$
परंतु किसी नेट बल का अनुभव नहीं करता।
14. विद्युत क्षेत्र **E** का किसी लघु क्षेत्रफल-अवयव $\Delta\mathbf{S}$ से गुजरने वाला फ्लक्स $\Delta\phi = \mathbf{E}.\Delta\mathbf{S}$
सदिश क्षेत्रफल-अवयव $\Delta\mathbf{S} = \Delta S\,\hat{\mathbf{n}}$
यहाँ ΔS क्षेत्रफल-अवयव का परिमाण तथा $\hat{\mathbf{n}}$ क्षेत्रफल-अवयव के लंबवत त्रिज्य एकांक सदिश है जिसे काफी छोटे क्षेत्र के लिए समतलीय माना जा सकता है। किसी बंद पृष्ठ के

© NCERT not to be republished

क्षेत्रफल-अवयव के लिए, $\hat{\mathbf{n}}$ को परिपाटी के अनुसार बहिर्मुखी अभिलंब की दिशा माना जा सकता है।

15. *गाउस नियम* : किसी बंद पृष्ठ S से होकर गुज़रने वाले किसी विद्युत क्षेत्र का फ्लक्स उस पृष्ठ S द्वारा परिबद्ध कुल आवेश का $1/\varepsilon_0$ गुना होता है। यह नियम विद्युत क्षेत्र के निर्धारण में विशेष रूप से तब उपयोगी होता है जबकि आवेश वितरण में सरल सममिति हो।

(i) *एकसमान रैखिक आवेश घनत्व λ का पतला अनंत लंबाई का सीधा तार*

$$\mathbf{E} = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r}\hat{\mathbf{n}}$$

यहाँ r बिंदु की तार से लंबवत दूरी है तथा $\hat{\mathbf{n}}$ उस बिंदु से गुज़रने वाले तार के अभिलंबवत तल में त्रिज्य एकांक सदिश है।

(ii) *एकसमान पृष्ठीय आवेश घनत्व σ की पतली अनंत समतल चादर*

$$\mathbf{E} = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}\hat{\mathbf{n}}$$

यहाँ $\hat{\mathbf{n}}$ समतल के अभिलंबवत पार्श्व के दोनों ओर बहिर्मुखी एकांक सदिश है।

(iii) *एकसमान पृष्ठीय आवेश घनत्व σ के पतले गोलीय खोल* (या कोश)

$$\mathbf{E} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\hat{\mathbf{r}} \qquad (r \geq R)$$

$$\mathbf{E} = 0 \qquad (r < R)$$

यहाँ r गोलीय खोल के केंद्र से बिंदु की दूरी तथा R खोल की त्रिज्या है। खोल का कुल आवेश q है। जहाँ $q = 4\pi R^2\sigma$ है।

खोल के बाहर किसी बिंदु पर आवेशित खोल के कारण विद्युत क्षेत्र इस प्रकार होता है जैसे कि समस्त आवेश खोल के केंद्र पर ही केंद्रित है। यही परिणाम किसी एकसमान आयतन आवेश घनत्व के ठोस गोले के लिए भी सत्य होता है। खोल के अंदर सभी बिंदुओं पर विद्युत क्षेत्र शून्य होता है।

भौतिक राशि	प्रतीक	विमाएँ	मात्रक	टिप्पणी
सदिश क्षेत्रफल-अवयव	$\Delta\mathbf{S}$	$[L^2]$	m^2	$\Delta\mathbf{S} = \Delta S\,\hat{\mathbf{n}}$
विद्युत क्षेत्र	$\mathbf{E}$	$[MLT^{-3}A^{-1}]$	$V\,m^{-1}$	
वैद्युत फ्लक्स	ϕ	$[ML^3T^{-3}A^{-1}]$	$V\,m$	$\Delta\phi = \mathbf{E}.\Delta\mathbf{S}$
द्विध्रुव आघूर्ण	$\mathbf{p}$	$[LTA]$	$C\,m$	ऋणावेश से धनावेश की ओर निर्दिष्ट सदिश
आवेश घनत्व:				
रैखिक	λ	$[L^{-1}TA]$	$C\,m^{-1}$	आवेश/लंबाई
पृष्ठीय	σ	$[L^{-2}TA]$	$C\,m^{-2}$	आवेश/क्षेत्रफल
आयतन	ρ	$[L^{-3}TA]$	$C\,m^{-3}$	आवेश/आयतन

© NCERT not to be republished

विचारणीय विषय

1. आपको यह आश्चर्य हो सकता है कि नाभिक में प्रोटॉन जिन पर धनावेश है, सभी एक साथ कसे रहकर कैसे समाए हुए हैं। वे एक-दूसरे से दूर क्यों नहीं उड़ जाते? आप यह सीखेंगे कि एक तीसरे प्रकार का मूल बल भी है जिसे प्रबल बल कहते हैं और यही बल प्रोटॉनों को एक साथ बाँधे रखता है। परंतु दूरी का वह परिसर जिसमें यह बल प्रभावी होता है, बहुत छोटा ~ 10^{-14} m है। यथार्य रूप में यही नाभिक का साइज़ है। साथ ही क्वांटम यांत्रिकी के नियमों के अनुसार इलेक्ट्रॉनों को प्रोटॉनों के शीर्ष पर अर्थात नाभिक के भीतर बैठने की अनुमति भी नहीं है। इसी से परमाणुओं को उनकी रचना प्राप्त है और उनका प्रकृति में अस्तित्व है।
2. कूलॉम बल तथा गुरुत्वाकर्षण बल समान व्युत्क्रम वर्ग नियम का पालन करते हैं। परंतु गुरुत्वाकर्षण बल का केवल एक ही चिह्न (सदैव आकर्षी) होता है, जबकि कूलॉम बल के दोनों चिह्न (आकर्षी तथा प्रतिकर्षी) हो सकते हैं, जिससे विद्युत बलों का निरसन हो सकता है। यही कारण है कि अत्यंत दुर्बल बल होने पर भी गुरुत्व बल प्रकृति में एक प्रबल तथा अधिक व्यापक बल हो सकता है।
3. यदि आवेश के मात्रक को कूलॉम के नियम द्वारा परिभाषित करना है तो कूलॉम के नियम में आनुपातिकता स्थिरांक k एक चयन का विषय है। परंतु SI मात्रकों में विद्युत धारा के मात्रक ऐम्पियर (A) को उसी के चुंबकीय प्रभाव (ऐम्पियर नियम) द्वारा परिभाषित किया जाता है तथा आवेश के मात्रक (कूलॉम) को केवल (1C = 1A s) द्वारा परिभाषित किया जाता है। इस प्रकरण में k का मान स्वैच्छिक नहीं है; यह लगभग 9×10^9 N m^2 C^{-2} है।
4. स्थिरांक k का अत्यधिक बड़ा मान, अर्थात विद्युत प्रभाव की दृष्टि से आवेश के मात्रक (1C) का बड़ा आकार (मान) इस कारण से है क्योंकि (जैसा कि बिंदु 3 में उल्लेख किया जा चुका है) आवेश के मात्रक को चुंबकीय बलों (विद्युतवाही तारों पर लगे बलों) के पदों में परिभाषित किया गया है जो कि व्यापक रूप से वैद्युत बलों की तुलना में बहुत दुर्बल होते हैं। यही कारण है कि, 1 ऐम्पियर चुंबकीय प्रभावों के लिए युक्तिसंगत मात्रक है, 1 C = 1 A s वैद्युत प्रभावों के लिए एक अत्यधिक बड़ा मात्रक है।
5. आवेश का योज्यता गुणधर्म कोई सुस्पष्ट गुणधर्म नहीं है। यह इस तथ्य से संबंधित है कि वैद्युत आवेश से कोई दिशा संबद्ध नहीं होती, आवेश एक अदिश राशि है।
6. आवेश केवल घूर्णन के अंतर्गत ही अदिश (अथवा अचर/अपरिवर्तनीय) नहीं है; यह आपेक्षिक गति में भी निर्देश फ्रेमों के लिए अचर है। यह कथन प्रत्येक अदिश के लिए सदैव सत्य नहीं है। उदाहरणार्थ, गतिज ऊर्जा घूर्णन के अंतर्गत अदिश है, परंतु यह आपेक्षिक गतियों में निर्देश फ्रेमों के लिए अचर नहीं है, अथवा इस दृष्टि से तो द्रव्यमान भी अचर नहीं है।
7. किसी वियुक्त निकाय के कुल आवेश का संरक्षण एक ऐसा गुणधर्म है जो बिंदु 6 के अंतर्गत आवेश की अदिश प्रकृति पर निर्भर नहीं करता। संरक्षण किसी दिए गए निर्देश फ्रेम में समय की अपरिवर्तनीयता की ओर संकेत करता है। कोई राशि अदिश होते हुए भी संरक्षित नहीं हो सकती (किसी अप्रत्यास्थ संघट्ट में गतिज ऊर्जा की भाँति)। इसके विपरीत, सदिश राशि का संरक्षण भी हो सकता है (उदाहरण के लिए किसी वियुक्त निकाय का कोणीय संवेग संरक्षण)।
8. वैद्युत आवेश का क्वांटमीकरण प्रकृति का मूल नियम है जिसकी अभी तक व्याख्या नहीं की जा सकी है। रोचक तथ्य यह है कि संहति के क्वांटमीकरण का कोई सदृश (अनुरूप) नियम नहीं है।
9. अध्यारोपण सिद्धांत को सुस्पष्ट नहीं मानना चाहिए अथवा इसे सदिशों के योग के नियम के समान नहीं मानना चाहिए। यह सिद्धांत दो बातें बताता है: किसी आवेश पर दूसरे आवेश के कारण बल किन्हीं अन्य आवेशों की उपस्थिति के कारण प्रभावित नहीं होता तथा यहाँ

© NCERT not to be republished

कोई अतिरिक्त त्रि-पिंड, चतु:-पिंड आदि बल नहीं होते जो केवल तभी उत्पन्न होते हैं जब दो से अधिक आवेश हों।

10. किसी विविक्त आवेश विन्यास के कारण विविक्त आवेशों की अवस्थिति पर विद्युत क्षेत्र परिभाषित नहीं है। संतत आयतन आवेश वितरण के लिए यह वितरण में किसी भी बिंदु पर परिभाषित होता है। किसी पृष्ठीय आवेश वितरण के लिए विद्युत क्षेत्र पृष्ठ के आर-पार विच्छिन्न होता है।
11. किसी आवेश विन्यास जिसमें कुल आवेश शून्य है, के कारण सभी बिंदुओं पर विद्युत क्षेत्र शून्य नहीं होता; उन दूरियों के लिए जो आवेश विन्यास के आकार की तुलना में बड़ी हैं, इसके क्षेत्र में कमी $1/r^2$ से भी अधिक तीव्र गति से होती है, जो कि किसी एकल आवेश के विद्युत क्षेत्र की विशेषता है। एक वैद्युत द्विध्रुव इस तथ्य का एक सरलतम उदाहरण है।

अभ्यास

1.1 वायु में एक-दूसरे से 30 cm दूरी पर रखे दो छोटे आवेशित गोलों पर क्रमश: 2×10^{-7}C तथा 3×10^{-7} C आवेश हैं। उनके बीच कितना बल है?

1.2 0.4 μC आवेश के किसी छोटे गोले पर किसी अन्य छोटे आवेशित गोले के कारण वायु में 0.2 N बल लगता है। यदि दूसरे गोले पर 0.8 μC आवेश हो तो (a) दोनों गोलों के बीच कितनी दूरी है? (b) दूसरे गोले पर पहले गोले के कारण कितना बल लगता है?

1.3 जाँच द्वारा सुनिश्चित कीजिए कि ke^2/Gm_em_p विमाहीन है। भौतिक नियतांकों की सारणी देखकर इस अनुपात का मान ज्ञात कीजिए। यह अनुपात क्या बताता है?

1.4 (a) "किसी वस्तु का वैद्युत आवेश क्वांटीकृत है," इस प्रकथन से क्या तात्पर्य है? (b) स्थूल अथवा बड़े पैमाने पर वैद्युत आवेशों से व्यवहार करते समय हम वैद्युत आवेश के क्वांटमीकरण की उपेक्षा कैसे कर सकते हैं?

1.5 जब काँच की छड़ को रेशम के टुकड़े से रगड़ते हैं तो दोनों पर आवेश आ जाता है। इसी प्रकार की परिघटना का वस्तुओं के अन्य युग्मों में भी प्रेक्षण किया जाता है। स्पष्ट कीजिए कि यह प्रेक्षण आवेश संरक्षण नियम से किस प्रकार सामंजस्य रखता है।

1.6 चार बिंदु आवेश $q_A = 2\ \mu$C, $q_B = -5\ \mu$C, $q_C = 2\ \mu$C तथा $q_D = -5\ \mu$C, 10 cm भुजा के किसी वर्ग ABCD के शीर्षों पर अवस्थित हैं। वर्ग के केंद्र पर रखे 1 μC आवेश पर लगने वाला बल कितना है?

1.7 (a) स्थिरवैद्युत क्षेत्र रेखा एक संतत वक्र होती है अर्थात कोई क्षेत्र रेखा एकाएक नहीं टूट सकती। क्यों?
(b) स्पष्ट कीजिए कि दो क्षेत्र रेखाएँ कभी भी एक-दूसरे का प्रतिच्छेदन क्यों नहीं करतीं?

1.8 दो बिंदु आवेश $q_A = 3\ \mu$C तथा $q_B = -3\ \mu$C निर्वात में एक-दूसरे से 20 cm दूरी पर स्थित हैं।
(a) दोनों आवेशों को मिलाने वाली रेखा AB के मध्य बिंदु O पर विद्युत क्षेत्र कितना है?
(b) यदि 1.5×10^{-9} C परिमाण का कोई ऋणात्मक परीक्षण आवेश इस बिंदु पर रखा जाए तो यह परीक्षण आवेश कितने बल का अनुभव करेगा?

1.9 किसी निकाय में दो आवेश $q_A = 2.5 \times 10^{-7}$ C तथा $q_B = -2.5 \times 10^{-7}$ C क्रमश: दो बिंदुओं A : (0, 0, –15 cm) तथा B : (0, 0, +15 cm) पर अवस्थित हैं। निकाय का कुल आवेश तथा वैद्युत द्विध्रुव आघूर्ण क्या है?

1.10 4×10^{-9} C m द्विध्रुव आघूर्ण का कोई वैद्युत द्विध्रुव 5×10^4 N C^{-1} परिमाण के किसी एकसमान विद्युत क्षेत्र की दिशा से 30° पर संरेखित है। द्विध्रुव पर कार्यरत बल आघूर्ण का परिमाण परिकलित कीजिए।

1.11 ऊन से रगड़े जाने पर कोई पॉलीथीन का टुकड़ा 3×10^{-7} C के ऋणावेश से आवेशित पाया गया।
(a) स्थानांतरित (किस पदार्थ से किस पदार्थ में) इलेक्ट्रॉनों की संख्या आकलित कीजिए।
(b) क्या ऊन से पॉलीथीन में संहति का स्थानांतरण भी होता है?

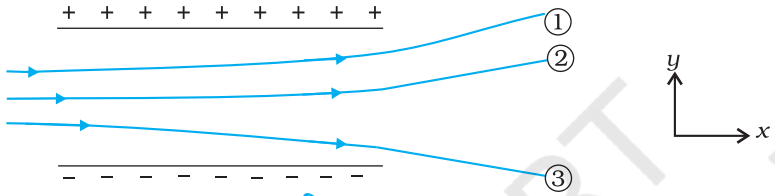
© NCERT not to be republished

1.12 (a) दो विद्युतरोधी आवेशित ताँबे के गोलों A तथा B के केंद्रों के बीच की दूरी 50 cm है। यदि दोनों गोलों पर पृथक-पृथक आवेश 6.5×10^{-7} C हैं, तो इनमें पारस्परिक स्थिरवैद्युत प्रतिकर्षण बल कितना है? गोलों के बीच की दूरी की तुलना में गोलों A तथा B की त्रिज्याएँ नगण्य हैं।

(b) यदि प्रत्येक गोले पर आवेश की मात्रा दो गुनी तथा गोलों के बीच की दूरी आधी कर दी जाए तो प्रत्येक गोले पर कितना बल लगेगा?

1.13 मान लीजिए अभ्यास 1.12 में गोले A तथा B साइज़ में सर्वसम हैं तथा इसी साइज़ का कोई तीसरा अनावेशित गोला पहले तो पहले गोले के संपर्क, तत्पश्चात दूसरे गोले के संपर्क में लाकर, अंत में दोनों से ही हटा लिया जाता है। अब A तथा B के बीच नया प्रतिकर्षण बल कितना है?

1.14 चित्र 1.33 में किसी एकसमान स्थिरवैद्युत क्षेत्र में तीन आवेशित कणों के पथचिह्न (tracks) दर्शाए गए हैं। तीनों आवेशों के चिह्न लिखिए। इनमें से किस कण का आवेश-संहति अनुपात (q/m) अधिकतम है?



चित्र 1.33

1.15 एकसमान विद्युत क्षेत्र $\mathbf{E} = 3 \times 10^3 \hat{\mathbf{i}}$ N/C पर विचार कीजिए।

(a) इस क्षेत्र का 10 cm भुजा के वर्ग के उस पार्श्व से जिसका तल yz तल के समांतर है, गुजरने वाला फ्लक्स क्या है?

(b) इसी वर्ग से गुजरने वाला फ्लक्स कितना है यदि इसके तल का अभिलंब x-अक्ष से 60° का कोण बनाता है?

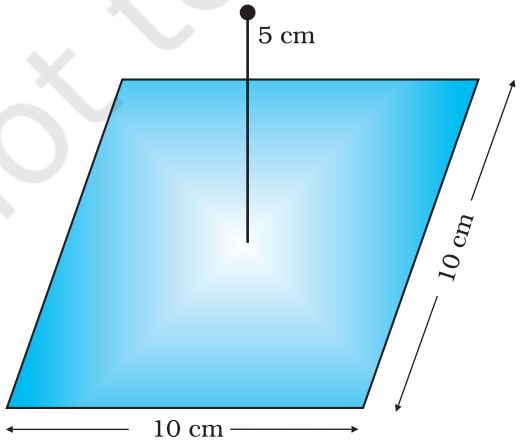
1.16 अभ्यास 1.15 के एकसमान विद्युत क्षेत्र का 20 cm भुजा के किसी घन से (जो इस प्रकार अभिविन्यासित है कि उसके फलक निर्देशांक तलों के समांतर हैं) कितना नेट फ्लक्स गुजरेगा?

1.17 किसी काले बॉक्स के पृष्ठ पर विद्युत क्षेत्र की सावधानीपूर्वक ली गई माप यह संकेत देती है कि बॉक्स के पृष्ठ से गुजरने वाला नेट फ्लक्स 8.0×10^3 N m^2/C है।

(a) बॉक्स के भीतर नेट आवेश कितना है?

(b) यदि बॉक्स के पृष्ठ से नेट बहिर्मुखी फ्लक्स शून्य है तो क्या आप यह निष्कर्ष निकालेंगे कि बॉक्स के भीतर कोई आवेश नहीं है? क्यों, अथवा क्यों नहीं?

1.18 चित्र 1.34 में दर्शाए अनुसार 10 cm भुजा के किसी वर्ग के केंद्र से ठीक 5 cm ऊँचाई पर कोई +10 μC आवेश रखा है। इस वर्ग से गुजरने वाले वैद्युत फ्लक्स का परिमाण क्या है? (*संकेत* : वर्ग को 10 cm किनारे के किसी घन का एक फलक मानिए।)



चित्र 1.34

© NCERT not to be republished

1.19 2.0 μC का कोई बिंदु आवेश किसी किनारे पर 9.0 cm किनारे वाले किसी घनीय गाउसीय पृष्ठ के केंद्र पर स्थित है। पृष्ठ से गुजरने वाला नेट फ्लक्स क्या है?

1.20 किसी बिंदु आवेश के कारण उस बिंदु को केंद्र मानकर खींचे गए 10 cm त्रिज्या के गोलीय गाउसीय पृष्ठ पर वैद्युत फ्लक्स $-1.0 \times 10^3 \text{ N m}^2/\text{C}$। (a) यदि गाउसीय पृष्ठ की त्रिज्या दो गुनी कर दी जाए तो पृष्ठ से कितना फ्लक्स गुजरेगा? (b) बिंदु आवेश का मान क्या है?

1.21 10 cm त्रिज्या के चालक गोले पर अज्ञात परिणाम का आवेश है। यदि गोले के केंद्र से 20 cm दूरी पर विद्युत क्षेत्र $1.5 \times 10^3 \text{ N/C}$ त्रिज्यत: अंतर्मुखी (radially inward) है तो गोले पर नेट आवेश कितना है?

1.22 2.4 m व्यास के किसी एकसमान आवेशित चालक गोले का पृष्ठीय आवेश घनत्व 80.0 $\mu\text{C/m}^2$ है।

(a) गोले पर आवेश ज्ञात कीजिए।

(b) गोले के पृष्ठ से निर्गत कुल वैद्युत फ्लक्स क्या है?

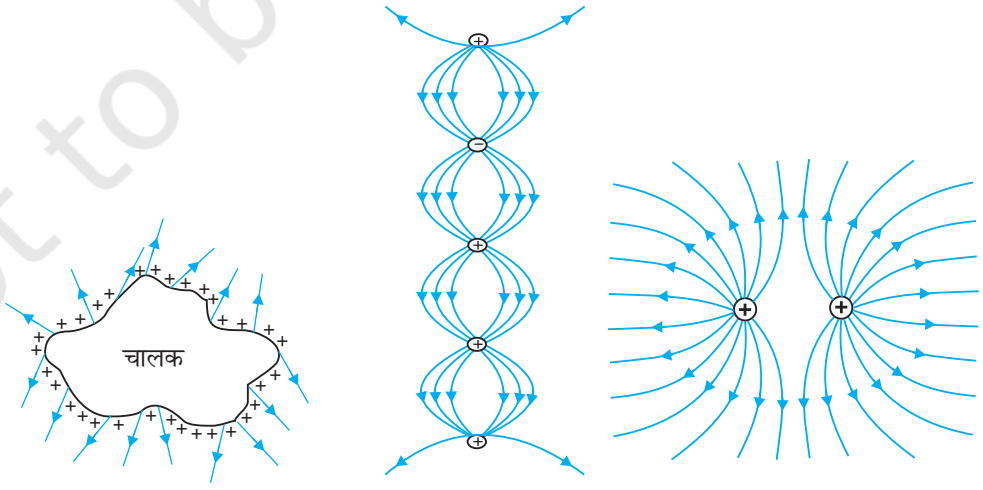
1.23 कोई अनंत रैखिक आवेश 2 cm दूरी पर $9 \times 10^4 \text{ N C}^{-1}$ विद्युत क्षेत्र उत्पन्न करता है। रैखिक आवेश घनत्व ज्ञात कीजिए।

1.24 दो बड़ी, पतली धातु की प्लेटें एक-दूसरे के समानांतर एवं निकट हैं। इनके भीतरी फलकों पर, प्लेटों के पृष्ठीय आवेश घनत्वों के चिह्न विपरीत हैं तथा इनका परिमाण $17.0 \times 10^{-22} \text{ C/m}^2$ है। (a) पहली प्लेट के बाह्य क्षेत्र में, (b) दूसरी प्लेट के बाह्य क्षेत्र में, तथा (c) प्लेटों के बीच में विद्युत क्षेत्र **E** का परिमाण परिकलित कीजिए।

अतिरिक्त प्रश्न

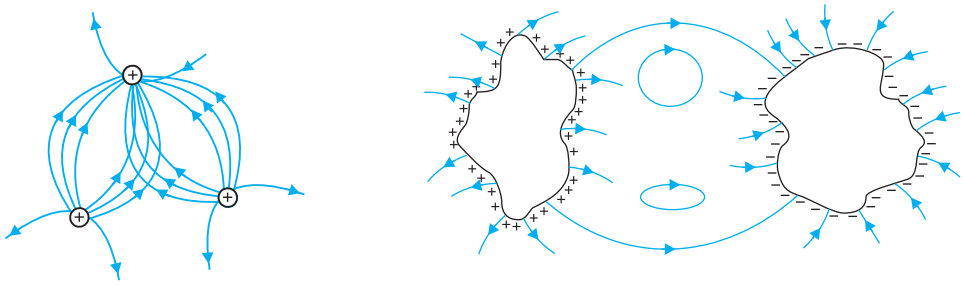
1.25 $2.55 \times 10^4 \text{ N C}^{-1}$ के नियत विद्युत क्षेत्र के प्रभाव में 12 इलेक्ट्रॉन आधिक्य की कोई तेल बूँद स्थिर रखी जाती है (मिलिकन तेल बूँद प्रयोग)। तेल का घनत्व 1.26 g cm^{-3} है। बूँद की त्रिज्या का आकलन कीजिए ($g = 9.81 \text{ m s}^{-2}$; $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$)।

1.26 चित्र 1.35 में दर्शाए गए वक्रों में से कौन संभावित स्थिरवैद्युत क्षेत्र रेखाएँ निरूपित नहीं करते?



(a) (b) (c)

© NCERT not to be republished



(d) (e)

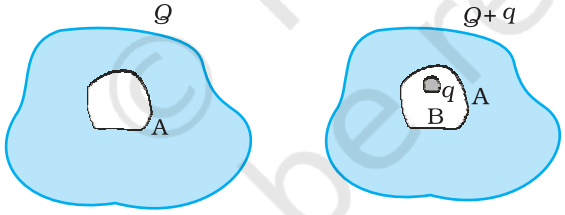
चित्र 1.35

1.27 दिक्स्थान के किसी क्षेत्र में, विद्युत क्षेत्र सभी जगह z-दिशा के अनुदिश है। परंतु विद्युत क्षेत्र का परिमाण नियत नहीं है, इसमें एकसमान रूप से z-दिशा के अनुदिश 10^5 N C^{-1} प्रति मीटर की दर से वृद्धि होती है। वह निकाय जिसका ऋणात्मक z-दिशा में कुल द्विध्रुव आघूर्ण 10^{-7} C m के बराबर है, कितना बल तथा बल आघूर्ण अनुभव करता है?

1.28 (a) किसी चालक A जिसमें चित्र 1.36 (a) में दर्शाए अनुसार कोई कोटर/गुहा (Cavity) है, को Q आवेश दिया गया है। यह दर्शाइए कि समस्त आवेश चालक के बाह्य पृष्ठ पर प्रतीत होना चाहिए।

(b) कोई अन्य चालक B जिस पर आवेश q है, को कोटर/गुहा (Cavity) में इस प्रकार धँसा दिया जाता है कि चालक B चालक A से विद्युतरोधी रहे। यह दर्शाइए कि चालक A के बाह्य पृष्ठ पर कुल आवेश $Q + q$ है [चित्र 1.36 (b)]।

(c) किसी सुग्राही उपकरण को उसके पर्यावरण के प्रबल स्थिरवैद्युत क्षेत्रों से परिरक्षित किया जाना है। संभावित उपाय लिखिए।



(a) (b)

चित्र 1.36

1.29 किसी खोखले आवेशित चालक में उसके पृष्ठ पर कोई छिद्र बनाया गया है। यह दर्शाइए कि छिद्र में विद्युत क्षेत्र $(\sigma/2\varepsilon_0)\,\hat{\mathbf{n}}$ है, जहाँ $\hat{\mathbf{n}}$ अभिलंबवत दिशा में बहिर्मुखी एकांक सदिश है तथा σ छिद्र के निकट पृष्ठीय आवेश घनत्व है।

1.30 गाउस नियम का उपयोग किए बिना किसी एकसमान रैखिक आवेश घनत्व λ के लंबे पतले तार के कारण विद्युत क्षेत्र के लिए सूत्र प्राप्त कीजिए [*संकेत* : सीधे ही कूलॉम नियम का उपयोग करके आवश्यक समाकलन का मान निकालिए]।

1.31 अब ऐसा सिद्ध हो चुका है कि स्वयं प्रोटॉन एवं न्यूट्रॉन (जो सामान्य द्रव्य के नाभिकों का निर्माण करते हैं) और अधिक मूल इकाइयों जिन्हें क्वार्क कहते हैं, के बने हैं। प्रत्येक प्रोटॉन तथा न्यूट्रॉन तीन क्वार्कों से मिलकर बनता है। दो प्रकार के क्वार्क होते हैं : 'अप' क्वार्क (u द्वारा निर्दिष्ट) जिन पर $+(2/3)\,e$ आवेश तथा 'डाउन' क्वार्क (d द्वारा निर्दिष्ट) जिन पर $(-1/3)\,e$ आवेश होता है, इलेक्ट्रॉन से मिलकर सामान्य द्रव्य बनाते हैं। (कुछ अन्य प्रकार के क्वार्क भी पाए गए हैं जो भिन्न असामान्य प्रकार का द्रव्य बनाते हैं।) प्रोटॉन तथा न्यूट्रॉन के संभावित क्वार्क संघटन सुझाइए।

© NCERT not to be republished

1.32 (a) किसी यादृच्छिक स्थिरवैद्युत क्षेत्र विन्यास पर विचार कीजिए। इस विन्यास की किसी शून्य-विक्षेप स्थिति (null-point, अर्थात् जहाँ $\mathbf{E} = 0$) पर कोई छोटा परीक्षण आवेश रखा गया है। यह दर्शाइए कि परीक्षण आवेश का संतुलन आवश्यक रूप से अस्थायी है।
(b) इस परिणाम का समान परिमाण तथा चिह्नों के दो आवेशों (जो एक-दूसरे से किसी दूरी पर रखे हैं) के सरल विन्यास के लिए सत्यापन कीजिए।

1.33 प्रारंभ में x-अक्ष के अनुदिश v_x चाल से गति करती हुई दो आवेशित प्लेटों के मध्य क्षेत्र में m द्रव्यमान तथा $-q$ आवेश का एक कण प्रवेश करता है (चित्र 1.33 में कण 1 के समान)। प्लेटों की लंबाई L है। इन दोनों प्लेटों के बीच एकसमान विद्युत क्षेत्र E बनाए रखा जाता है। दर्शाइए कि प्लेट के अंतिम किनारे पर कण का ऊर्ध्वाधर विक्षेप $qEL^2/(2\text{m}\, v_x^2)$ है।
(कक्षा 11 की पाठ्यपुस्तक के अनुभाग 4.10 में वर्णित गुरुत्वीय क्षेत्र में प्रक्षेप्य की गति के साथ इस कण की गति की तुलना कीजिए)।

1.34 अभ्यास 1.33 में वर्णित कण की इलेक्ट्रॉन के रूप में कल्पना कीजिए जिसको $v_x = 2.0 \times 10^6$ m s^{-1} के साथ प्रक्षेपित किया गया है। यदि 0.5 cm की दूरी पर रखी प्लेटों के बीच विद्युत क्षेत्र E का मान 9.1×10^2 N/C हो तो ऊपरी प्लेट पर इलेक्ट्रॉन कहाँ टकराएगा? ($|e| = 1.6 \times 10^{-19}$ C, $m_e = 9.1 \times 10^{-31}$ kg.)

© NCERT not to be republished

12091CH02

अध्याय 2

स्थिरवैद्युत विभव तथा धारिता

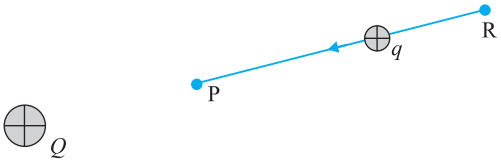
© NCERT not to be republished

2.1 भूमिका

अध्याय 6 तथा 8 (कक्षा 11) में स्थितिज ऊर्जा की धारणा से आपको परिचित कराया गया था। जब कोई बाह्य बल किसी वस्तु को एक बिंदु से दूसरे बिंदु तक, किसी अन्य बल; जैसे–स्प्रिंग बल, गुरुत्वीय बल आदि के विरुद्ध, ले जाता है, तो उस बाह्य बल द्वारा किया गया कार्य उस वस्तु में स्थितिज ऊर्जा के रूप में संचित हो जाता है। जब बाह्य बल हटा लिया जाता है तो वस्तु गति करने लगती है और कुछ गतिज ऊर्जा अर्जित कर लेती है, तथा उस वस्तु की उतनी ही स्थितिज ऊर्जा कम हो जाती है। इस प्रकार वस्तु की स्थितिज ऊर्जा तथा गतिज ऊर्जा का योग संरक्षित रहता है। इस प्रकार के बलों को *संरक्षी बल* कहते हैं। स्प्रिंग बल तथा गुरुत्वाकर्षण बल संरक्षी बल के उदाहरण हैं।

गुरुत्वाकर्षण बल की भाँति दो स्थिर आवेशों के बीच लगने वाला कूलॉम बल भी संरक्षी बल होता है। यह कोई आश्चर्य की बात नहीं है, क्योंकि गणितीय रूप में यह बल गुरुत्वाकर्षण बल के समान है; दोनों में दूरी की व्युत्क्रम वर्ग निर्भरता है और प्रमुख रूप से आनुपातिकता स्थिरांक में भिन्नता है। गुरुत्वाकर्षण नियम की संहतियाँ कूलॉम नियम में आवेशों द्वारा प्रतिस्थापित हो जाती हैं। इस प्रकार, गुरुत्वीय क्षेत्र में संहतियों की स्थितिज ऊर्जा की ही भाँति हम किसी स्थिरवैद्युत क्षेत्र में आवेश की स्थिरवैद्युत स्थितिज ऊर्जा को परिभाषित कर सकते हैं।

आवेश विन्यास के कारण किसी स्थिरवैद्युत क्षेत्र **E** पर विचार कीजिए। सरलता की दृष्टि से पहले मूल बिंदु पर स्थित किसी आवेश Q के कारण क्षेत्र **E** पर विचार करते हैं। कल्पना कीजिए कि हम कोई परीक्षण आवेश q को आवेश Q के कारण आवेश q पर लगे प्रतिकर्षी बल के विरुद्ध, बिंदु R से बिंदु P तक लाते हैं। चित्र 2.1 के संदर्भ में ऐसा तभी होगा जब Q तथा q दोनों धनात्मक हों अथवा दोनों ऋणात्मक हों। सुनिश्चित करने के लिए, हम $Q, q > 0$ मानते हैं।



चित्र 2.1 एक परीक्षण आवेश q (>0) मूल बिंदु पर स्थित आवेश Q (>0) के कारण उस पर लगे प्रतिकर्षी बल के विरुद्ध बिंदु R से बिंदु P तक ले जाया जाता है।

यहाँ दो टिप्पणियाँ की जा सकती हैं। पहली, हम यह मानते हैं कि परीक्षण आवेश q इतना छोटा है कि यह मूल विन्यास को विक्षुब्ध नहीं करता, यानी मूल बिंदु पर स्थित आवेश Q को विक्षुब्ध नहीं करता (अन्यथा हम किसी अनिर्दिष्ट बल द्वारा आवेश Q को मूल बिंदु पर दृढ़ करें)। दूसरी, आवेश q को R से P तक लाने के लिए हम एक बाह्य बल $\mathbf{F}_{ext}$ आरोपित करते हैं जो प्रतिकर्षी वैद्युत बल $\mathbf{F}_E$ (अर्थात $\mathbf{F}_{ext} = -\mathbf{F}_E$) को यथातथ्य प्रभावहीन कर देता है। इसका अर्थ यह हुआ कि जब आवेश q को R से P तक लाते हैं तो उस पर कोई नेट बल अथवा त्वरण कार्य नहीं करता–इसे अत्यंत धीमी नियत चाल से लाया जाता है। इस स्थिति में, बाह्य बल द्वारा आवेश पर किया गया कार्य वैद्युत बल द्वारा किए गए कार्य का ऋणात्मक होता है, तथा पूर्णत: आवेश q की स्थितिज ऊर्जा के रूप में संचित हो जाता है। यदि P पर पहुँच कर बाह्य बल को हटा दिया जाए तो वैद्युत बल आवेश q को Q से दूर भेज देगा – P पर संचित ऊर्जा (स्थितिज ऊर्जा) आवेश q को गतिज ऊर्जा प्रदान करने में खर्च हो जाती है तथा यह इस ढंग से होता है कि गतिज ऊर्जा तथा स्थितिज ऊर्जा का योग संरक्षित रहता है।

इस प्रकार बाह्य बल द्वारा किसी आवेश q को बिंदु R से P तक ले जाने में किया गया कार्य

$$W_{RP} = \int_R^P \mathbf{F}_{ext} \cdot d\mathbf{r}$$

$$= -\int_R^P \mathbf{F}_E \cdot d\mathbf{r} \qquad (2.1)$$

यह कार्य स्थिरवैद्युत प्रतिकर्षी बल के विरुद्ध किया गया है, तथा यह स्थितिज ऊर्जा के रूप में संचित हो जाता है।

विद्युत क्षेत्र के प्रत्येक बिंदु पर q आवेश के, किसी कण में एक निश्चित स्थिरवैद्युत स्थितिज ऊर्जा होती है तथा कण पर किया गया यह कार्य इसकी स्थितिज ऊर्जा में इतनी वृद्धि कर देता है जो R तथा P बिंदुओं के बीच स्थितिज ऊर्जा के अंतर के बराबर है।

इस प्रकार, स्थितिज ऊर्जा अंतर

$$\Delta U = U_P - U_R = W_{RP} \qquad (2.2)$$

(ध्यान दीजिए, यहाँ पर यह विस्थापन विद्युत बल के विपरीत है, इसलिए विद्युत क्षेत्र द्वारा किया गया कार्य ऋणात्मक है, अर्थात $-W_{RP}$)

अत:, दो बिंदुओं के बीच स्थिरवैद्युत स्थितिज ऊर्जा अंतर को हम इस प्रकार परिभाषित करते हैं – किसी यादृच्छिक आवेश विन्यास के विद्युत बल क्षेत्र में यह अंतर आवेश q को एक बिंदु से दूसरे बिंदु तक (बिना त्वरित किए) ले जाने के लिए आवश्यक बाह्य बल द्वारा किए जाने वाले न्यूनतम कार्य के बराबर होता है।

इस घटनाक्रम में दो महत्वपूर्ण टिप्पणियाँ की जा सकती हैं–

(i) समीकरण (2.2) का दायाँ पक्ष केवल आवेश की आरंभिक तथा अंतिम स्थितियों पर निर्भर करता है। इसका अर्थ यह है कि किसी स्थिरवैद्युत क्षेत्र द्वारा किसी आवेश को एक बिंदु से दूसरे बिंदु तक ले जाने में किया गया कार्य केवल आरंभिक तथा अंतिम स्थितियों (बिंदुओं) पर निर्भर करता है, उस पथ पर निर्भर नहीं करता जिससे होकर वह आवेश एक बिंदु से दूसरे बिंदु तक जाता है (चित्र 2.2)। यह किसी संरक्षी बल का मूल अभिलक्षण है। स्थितिज ऊर्जा की धारणा अर्थपूर्ण नहीं रहेगी, यदि किया गया कार्य पथ पर निर्भर हो जाएगा। किसी स्थिरवैद्युत क्षेत्र द्वारा किए गए कार्य का पथ पर निर्भर न होना कूलॉम के नियम द्वारा सिद्ध किया जा सकता है। इसकी उपपत्ति हम यहाँ छोड़ रहे हैं।

© NCERT not to be republished

(ii) समीकरण (2.2) *स्थितिज ऊर्जा अंतर* की परिभाषा भौतिकी के नियमों के अनुसार अर्थपूर्ण राशि *कार्य* के पदों में करती है। स्पष्टत:, इस प्रकार परिभाषित स्थितिज ऊर्जा किसी योज्यता स्थिरांक के अंतर्गत अनिश्चित होती है। इसका यह अर्थ है कि स्थितिज ऊर्जा का वास्तविक मान भौतिक रूप से महत्वपूर्ण नहीं होता; केवल स्थितिज ऊर्जा के अंतर का ही महत्त्व होता है। हम सदैव ही कोई यादृच्छिक स्थिरांक α हर बिंदु पर स्थितिज ऊर्जा के साथ जोड़ सकते हैं, क्योंकि इससे स्थितिज ऊर्जा अंतर के मान में कोई परिवर्तन नहीं होगा :

$$(U_P + \alpha) - (U_R + \alpha) = U_P - U_R$$

इसे इस प्रकार से भी व्यक्त कर सकते हैं : स्थितिज ऊर्जा को किस बिंदु पर शून्य मानें, इस बिंदु के चयन की स्वतंत्रता होती है। एक सुविधाजनक चयन यह है कि हम अनंत पर स्थिरवैद्युत स्थितिज ऊर्जा को शून्य मानें। इस चयन के अनुसार यदि हम बिंदु R को अनंत पर लें, तब समीकरण (2.2) से हमें प्राप्त होता है :

$$W_{\infty P} = U_P - U_\infty = U_P \qquad (2.3)$$

चूँकि यहाँ पर बिंदु P यादृच्छिक है, समीकरण (2.3) से हमें किसी बिंदु पर आवेश q की स्थितिज ऊर्जा की परिभाषा प्राप्त होती है – *किसी बिंदु पर आवेश q की स्थितिज ऊर्जा (किसी आवेश विन्यास के कारण क्षेत्र की उपस्थिति में) बाह्य बल (वैद्युत बल के समान तथा विपरीत) द्वारा आवेश q को अनंत से उस बिंदु तक ले जाने में किए गए कार्य के बराबर होती है।*

2.2 स्थिरवैद्युत विभव

किसी व्यापक स्थिर आवेश विन्यास पर विचार कीजिए। हमने किसी परीक्षण आवेश q पर स्थितिज ऊर्जा को किए गए कार्य के पदों में परिभाषित किया था। यह कार्य स्पष्ट रूप से q के अनुक्रमानुपाती है, चूँकि आवेश q पर किसी भी बिंदु पर $q\mathbf{E}$ बल कार्य करता है, यहाँ $\mathbf{E}$ आवेश विन्यास के कारण उस बिंदु पर विद्युत क्षेत्र है। अत: किए गए कार्य को आवेश q से विभाजित करना सुविधाजनक होता है, क्योंकि परिणामस्वरूप जो राशि प्राप्त होती है वह q पर निर्भर नहीं करती। दूसरे शब्दों में, प्रति एकांक आवेश पर किया गया कार्य आवेश विन्यास से संबद्ध विद्युत क्षेत्र का अभिलाक्षणिक गुण होता है। इससे हमें दिए गए आवेश विन्यास के कारण स्थिरवैद्युत विभव V की धारणा प्राप्त होती है। समीकरण (2.1) से हमें प्राप्त होता है–

बाह्य बल द्वारा किसी एकांक धनावेश को बिंदु R से P तक लाने में किया गया कार्य

$$= V_P - V_R \left(= \frac{U_P - U_R}{q} \right) \qquad (2.4)$$

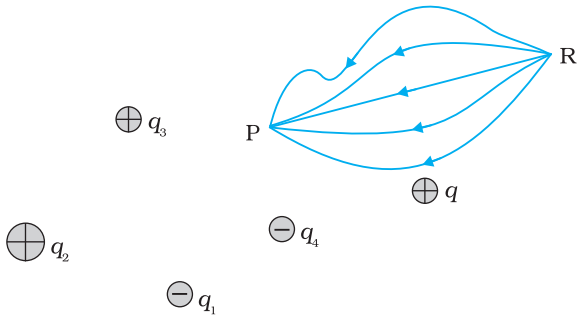
यहाँ V_P तथा V_R क्रमश: बिंदु P तथा R के स्थिरवैद्युत विभव हैं। ध्यान दीजिए, यहाँ भी पहले की भाँति विभव का वास्तविक मान उतना महत्वपूर्ण नहीं होता जितना कि भौतिक नियमों के अनुसार विभवांतर महत्वपूर्ण होता है। यदि पहले की भाँति, हम अनंत पर विभव को शून्य चुनें (मानें), तब समीकरण (2.4) से यह उपलक्षित होता है कि–

बाह्य बल द्वारा किसी एकांक धनावेश को अनंत से किसी बिंदु तक लाने में किया गया कार्य = उस बिंदु पर स्थिरवैद्युत विभव (V)



कॉन्ते एलेस्सैंद्रो वोल्टा (1745 – 1827) इटालियन भौतिकीविद, पविया में प्रोफ़ेसर थे। वोल्टा ने यह स्थापित किया कि लुइगी गैल्वनी 1737–1798, द्वारा, दो असमान धातुओं के संपर्क में लटके मेंढक के मांसपेशीय ऊतकों में देखी गई 'जैव विद्युत' जैव ऊतकों का कोई विशिष्ट गुण नहीं है, बल्कि, तब भी उत्पन्न हो जाती है जब कोई गीली वस्तु दो असमान धातुओं के बीच रखी जाती है। इससे उन्होंने प्रथम, *वोल्टीय पुंज* या बैटरी का विकास किया जिसमें धातु की चकतियों (विद्युदाग्रों) के बीच गत्ते की नम चकतियाँ (विद्युत अपघट्य) रखकर एक बड़ा पुंज बनाया था।

© NCERT not to be republished



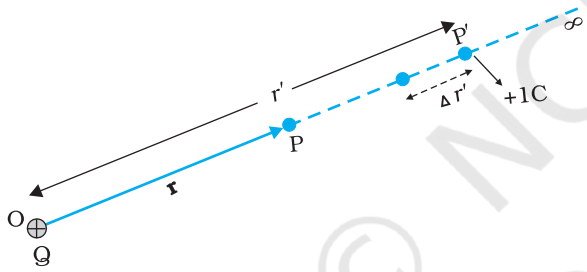
चित्र 2.2 किसी आवेश विन्यास के कारण स्थिरवैद्युत क्षेत्र द्वारा परीक्षण आवेश q पर किया गया कार्य पथ पर निर्भर नहीं करता, यह केवल अंतिम तथा आरंभिक स्थितियों पर निर्भर करता है।

दूसरे शब्दों में, स्थिरवैद्युत क्षेत्र के प्रदेश के किसी बिंदु पर स्थिरवैद्युत विभव (V) वह न्यूनतम कार्य है जो किसी एकांक धनावेश को अनंत से उस बिंदु तक लाने में किया जाता है।

स्थितिज ऊर्जा के विषय में पहले की गई विशेष टिप्पणी विभव की परिभाषा पर भी लागू होती है। प्रति एकांक परीक्षण आवेश पर किया गया कार्य ज्ञात करने के लिए हमें अत्यल्प परीक्षण आवेश δq लेना होता है, इसे अनंत से उस बिंदु तक लाने में किया गया कार्य δW ज्ञात करके $\delta W / \delta q$ अनुपात का मान निर्धारित करना होता है। साथ ही पथ के प्रत्येक बिंदु पर बाह्य बल उस बिंदु पर परीक्षण आवेश पर लगने वाले स्थिरवैद्युत बल के बराबर तथा विपरीत होना चाहिए।

2.3 बिंदु आवेश के कारण विभव

मूल बिंदु पर स्थित किसी बिंदु आवेश Q पर विचार कीजिए (चित्र 2.3)। सुस्पष्टता की दृष्टि से Q को धनात्मक लीजिए। हम बिंदु P पर मूल बिंदु से स्थिति सदिश $\mathbf{r}$ के साथ विभव निर्धारित करना चाहते हैं। इसके लिए हमें एकांक धनावेश को अनंत से उस बिंदु तक लाने में किया गया कार्य परिकलित करना चाहिए। $Q > 0$ के लिए, परीक्षण आवेश पर प्रतिकर्षण बल के विरुद्ध किया गया कार्य धनात्मक होता है। चूँकि किया गया कार्य पथ पर निर्भर नहीं करता, हम अनंत से बिंदु P तक अरीय दिशा के अनुदिश कोई सुगम पथ का चयन करते हैं।



चित्र 2.3 आवेश Q के कारण बिंदु P पर विभव, किसी एकांक धनात्मक परीक्षण आवेश को, आवेश Q $(Q > 0)$ के कारण प्रतिकर्षण बल के विरुद्ध, अनंत से बिंदु P तक लाने में किए गए कार्य के बराबर होता है।

पथ के किसी मध्यवर्ती बिंदु P′ पर, किसी एकांक धनावेश पर स्थिरवैद्युत बल

$$\frac{Q \times 1}{4\pi\varepsilon_o r'^2}\hat{\mathbf{r}}' \qquad (2.5)$$

यहाँ $\hat{\mathbf{r}}'$, OP′ के अनुदिश कोई एकांक सदिश है। इस बल के विरुद्ध r' से $r' + \Delta r'$ तक एकांक धनावेश को ले जाने में किया गया कार्य–

$$\Delta W = -\frac{Q}{4\pi\varepsilon_o r'^2}\Delta r' \qquad (2.6)$$

यहाँ ऋणात्मक चिह्न यह दर्शाता है कि $\Delta r' < 0$, तथा ΔW धनात्मक है। समीकरण (2.6) को $r' = \infty$ से $r' = r$ तक समाकलित करने पर बाह्य बल द्वारा किया गया कुल कार्य (W) प्राप्त होगा।

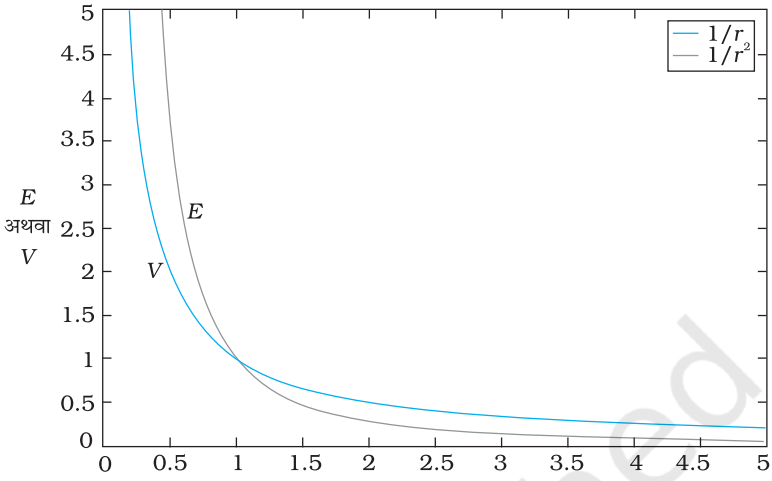
$$W = -\int_{\infty}^{r} \frac{Q}{4\pi\varepsilon_o r'^2} dr' = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_o r'}\Big|_{\infty}^{r} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_o r} \qquad (2.7)$$

परिभाषा के अनुसार यह आवेश Q के कारण P पर विभव है अत:

$$V(r) = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_o r} \qquad (2.8)$$

© NCERT not to be republished

समीकरण (2.8) आवेश Q के किसी भी चिह्न के लिए सत्य है यद्यपि हमने इस संबंध की व्युत्पत्ति के समय $Q > 0$ माना था। $Q < 0$, $V < 0$ के लिए, अर्थात् अनंत से उस बिंदु तक एकांक परीक्षण धनावेश को लाने के लिए किया गया कार्य (बाह्य बल द्वारा) ऋणात्मक है। यह इस कथन के तुल्य है कि एकांक धनावेश को अनंत से बिंदु P तक लाने में स्थिरवैद्युत बल द्वारा किया गया कार्य धनात्मक है [यह ऐसा ही है जैसा कि होना चाहिए, चूँकि $Q < 0$ के लिए, एकांक धनावेश पर बल आकर्षी है, अतः स्थिरवैद्युत बल तथा विस्थापन (अनंत से P तक) दोनों एक ही दिशा में हैं]। अंत में यदि हम समीकरण (2.8) पर ध्यान दें, तो पाते हैं कि यह समीकरण हमारे उस चयन से मेल खाता है जिसमें हमने अनंत पर विभव को शून्य माना था।



चित्र 2.4 किसी बिंदु आवेश Q के लिए दूरी r में परिवर्तन के साथ विभव में परिवर्तन $(Q/4\pi\varepsilon_0)$ m^{-1} के मात्रकों में (नीला वक्र) तथा दूरी r में परिवर्तन के साथ विद्युत क्षेत्र में परिवर्तन $(Q/4\pi\varepsilon_0)$ m^{-2} काला वक्र।

चित्र (2.4) में यह दर्शाया गया है कि किस प्रकार स्थिरवैद्युत विभव ($\propto 1/r$) तथा स्थिरवैद्युत क्षेत्र ($\propto 1/r^2$) दूरी r के साथ परिवर्तित होते हैं।

उदाहरण 2.1

(a) आवेश 4×10^{-7}C के कारण इससे 9 cm दूरी पर स्थित किसी बिंदु P पर विभव परिकलित कीजिए।

(b) अब, आवेश 2×10^{-9} C को अनंत से बिंदु P तक लाने में किया गया कार्य ज्ञात कीजिए। क्या उत्तर जिस पथ के अनुदिश आवेश को लाया गया है उस पर निर्भर करता है?

हल

(a) $$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{Q}{r} = 9\times10^9\ \text{Nm}^2\ \text{C}^{-2} \times \frac{4\times10^{-7}\text{C}}{0.09\,\text{m}}$$
$$= 4 \times 10^4\,\text{V}$$

(b) $$W = qV = 2\times10^{-9}\text{C}\times4\times10^4\,\text{V}$$
$$= 8 \times 10^{-5}\,\text{J}$$

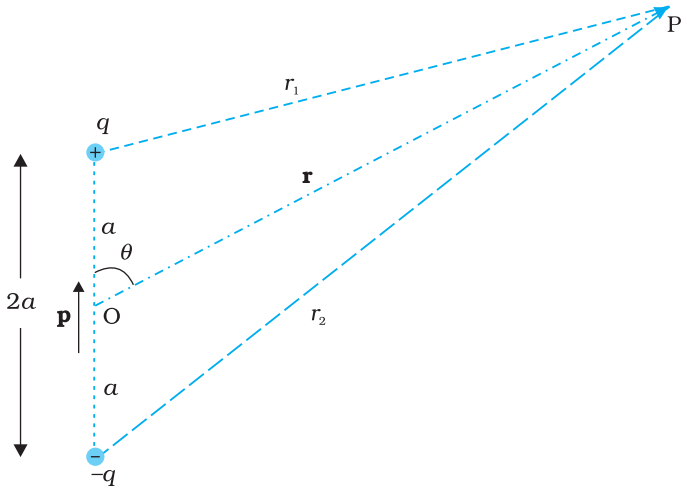
नहीं, कार्य पथ पर निर्भर नहीं होगा। कोई भी यादृच्छिक अत्यल्प पथ दो लंबवत विस्थापनों में वियोजित किया जा सकता है : एक **r** के अनुदिश तथा दूसरा **r** के लंबवत। बाद के प्रकरण के तदनुरूपी किया गया कार्य शून्य होगा।

उदाहरण 2.1

2.4 वैद्युत द्विध्रुव के कारण विभव

जैसा कि हम पिछले अध्याय में जान ही चुके हैं कि वैद्युत द्विध्रुव दो बिंदु आवेशों q तथा $-q$ से मिलकर बनता है तथा इन आवेशों के बीच (लघु) पृथकन $2a$ होता है। इसका कुल आवेश शून्य होता है तथा यह द्विध्रुव सदिश **p** जिसका परिमाण $q \times 2a$ तथा दिशा $-q$ से q के अनुदिश होती है, के अभिलाक्षणिक गुण द्वारा प्रकट किया जाता है (चित्र 2.5)। हमने यह भी देखा कि किसी बिंदु पर वैद्युत द्विध्रुव का स्थिति सदिश **r** सहित विद्युत क्षेत्र मात्र r के परिमाण पर ही निर्भर नहीं

© NCERT not to be republished



चित्र 2.5 द्विध्रुव के कारण विभव के परिकलन में सम्मिलित राशियाँ।

करता वरन् **r** तथा **p** के बीच के कोण पर भी निर्भर करता है। साथ ही, वैद्युत क्षेत्र की तीव्रता, अधिक दूरियों पर, $1/r^2$ के अनुसार नहीं घटती (जो एकल आवेश के कारण विद्युत क्षेत्र के लिए प्ररूपी है) वरन् $1/r^3$ के अनुसार घटती है। यहाँ हम किसी द्विध्रुव के कारण वैद्युत विभव का निर्धारण करेंगे तथा इसकी तुलना एक आवेश के कारण विभव से करेंगे।

पहले की ही भांति, हम द्विध्रुव के केंद्र को मूल बिंदु पर रखते हैं। अब हम यह जानते हैं कि विद्युत क्षेत्र अध्यारोपण सिद्धांत का पालन करते हैं। चूँकि विभव विद्युत क्षेत्र द्वारा किए गए कार्य से संबंधित है, स्थिरवैद्युत विभव भी अध्यारोपण सिद्धांत का पालन करता है। इस प्रकार किसी वैद्युत द्विध्रुव के कारण विभव आवेशों q तथा $-q$ के कारण विभवों का योग होता है।

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\left(\frac{q}{r_1} - \frac{q}{r_2}\right) \tag{2.9}$$

यहाँ r_1 तथा r_2 बिंदु P की क्रमशः q तथा $-q$ से दूरियाँ हैं। अब, ज्यामिति द्वारा

$$r_1^2 = r^2 + a^2 - 2ar\cos\theta$$

$$r_2^2 = r^2 + a^2 + 2ar\cos\theta \tag{2.10}$$

हम r को a की तुलना में अत्यधिक बड़ा ($r >> a$) मानते हैं तथा केवल a/r के प्रथम कोटि के पदों को ही सम्मिलित करते हैं :

$$r_1^2 = r^2\left(1 - \frac{2a\cos\theta}{r} + \frac{a^2}{r^2}\right)$$

$$\cong r^2\left(1 - \frac{2a\cos\theta}{r}\right) \tag{2.11}$$

इसी प्रकार,

$$r_2^2 \cong r^2\left(1 + \frac{2a\cos\theta}{r}\right) \tag{2.12}$$

द्विपद समीकरण का उपयोग करके a/r के प्रथम कोटि के पदों को सम्मिलित करने पर

$$\frac{1}{r_1} \cong \frac{1}{r}\left(1 - \frac{2a\cos\theta}{r}\right)^{-1/2} \cong \frac{1}{r}\left(1 + \frac{a}{r}\cos\theta\right) \tag{2.13(a)}$$

$$\frac{1}{r_2} \cong \frac{1}{r}\left(1 + \frac{2a\cos\theta}{r}\right)^{-1/2} \cong \frac{1}{r}\left(1 - \frac{a}{r}\cos\theta\right) \tag{2.13(b)}$$

समीकरणों (2.9) तथा (2.13) तथा $p = 2qa$ का उपयोग करने पर,

$$V = \frac{q}{4\pi\varepsilon_o}\frac{2a\cos\theta}{r^2} = \frac{p\cos\theta}{4\pi\varepsilon_o r^2} \tag{2.14}$$

अब, $P\cos\theta = \mathbf{p}\cdot\hat{\mathbf{r}}$

© NCERT not to be republished

यहाँ $\hat{\mathbf{r}}$ स्थिति सदिश **OP** के अनुदिश एकांक सदिश है।

तब किसी द्विध्रुव का वैद्युत विभव

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{\mathbf{p}\cdot\hat{\mathbf{r}}}{r^2}; \qquad (r >> a) \qquad (2.15)$$

जैसा कि संकेत दिया गया है, समीकरण (2.15) केवल उन दूरियों के लिए जो द्विध्रुव के आकार की तुलना में अत्यधिक बड़ी हैं, जिसके कारण a/r के उच्च कोटि के पदों की नगण्य मानकर उपेक्षा कर दी गई है, ही सन्निकटतः सत्य है। परंतु, किसी बिंदु द्विध्रुव **p** के लिए मूल बिंदु पर समीकरण (2.15) यथार्थ है।

समीकरण (2.15) से, द्विध्रुव अक्ष ($\theta = 0, \pi$) पर विभव

$$V = \pm\frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{p}{r^2} \qquad (2.16)$$

(धनात्मक चिह्न $\theta = 0$ के लिए तथा ऋणात्मक चिह्न $\theta = \pi$ के लिए है)। निरक्षीय (विषुवत) समतल ($\theta = \pi/2$) में विभव शून्य है।

किसी द्विध्रुव के वैद्युत विभव तथा एकल आवेश के वैद्युत विभव के तुलनात्मक महत्वपूर्ण लक्षण समीकरणों (2.8) तथा (2.15) से स्पष्ट हैं :

(i) किसी वैद्युत द्विध्रुव के कारण विभव केवल दूरी r पर ही निर्भर नहीं करता, वरन् स्थिति सदिश **r** तथा द्विध्रुव आघूर्ण **p** के बीच के कोण पर भी निर्भर करता है। (तथापि यह **p** के परितः अक्षतः सममित होता है। अतः यदि आप **p** के परितः स्थिति सदिश **r** को, कोण θ को नियत रखते हुए, घूर्णन कराएँ, तो बिंदु P के सदृश घूर्णन के फलस्वरूप बने शंकु पर बिंदुओं पर वही विभव होगा जो बिंदु P पर है।)

(ii) अधिक दूरियों पर वैद्युत द्विध्रुव के कारण विभव $1/r^2$ के अनुपात में घटता है, न कि $1/r$ के अनुपात में, जो कि एकल आवेश के कारण विभव का एक अभिलाक्षणिक गुण है। (इसके लिए आप चित्र 2.4 में दर्शाए r व $1/r^2$ तथा $1/r$ व r के बीच वक्रों का उल्लेख कर सकते हैं जिन्हें किसी अन्य संदर्भ में खींचा गया है)।

2.5 आवेशों के निकाय के कारण विभव

किसी आवेशों $q_1, q_2, \ldots, q_n$ के ऐसे निकाय पर विचार कीजिए जिनके किसी मूल बिंदु के सापेक्ष स्थिति सदिश क्रमशः $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \ldots, \mathbf{r}_n$ हैं (चित्र 2.6)। बिंदु P पर आवेश q_1 के कारण विभव

$$V_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q_1}{r_{1P}}$$

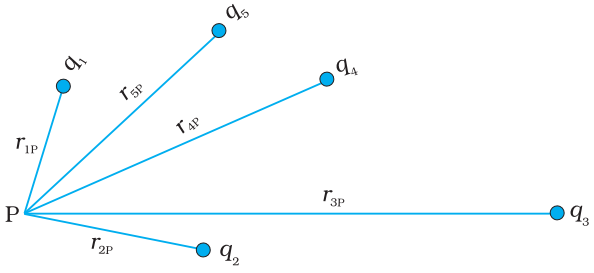
यहाँ r_{1P} बिंदु P तथा आवेश q_1 के बीच की दूरी है।

इसी प्रकार बिंदु P पर आवेश q_2 के कारण विभव V_2 तथा आवेश q_3 के कारण विभव V_3 को भी व्यक्त कर सकते हैं

$$V_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q_2}{r_{2P}}, \quad V_3 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q_3}{r_{3P}}$$

यहाँ r_{2P} तथा r_{3P} बिंदु P की क्रमशः q_2 तथा q_3 से दूरियाँ हैं। इसी प्रकार हम अन्य आवेशों के कारण बिंदु P पर विभव व्यक्त कर सकते हैं। अध्यारोपण सिद्धांत के अनुसार, समस्त आवेश विन्यास के कारण बिंदु P पर विभव V, विन्यास के व्यष्टिगत आवेशों के विभवों के बीजगणितीय योग के बराबर होता है :

$$V = V_1 + V_2 + \ldots + V_n \qquad (2.17)$$



चित्र 2.6 किसी बिंदु पर आवेशों के निकाय के कारण विभव उस बिंदु पर व्यष्टिगत आवेशों के कारण विभवों के योग के बराबर होता है।

© NCERT not to be republished

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\left(\frac{q_1}{r_{1P}} + \frac{q_2}{r_{2P}} + ... + \frac{q_n}{r_{nP}}\right) \qquad (2.18)$$

यदि हमारे पास आवेश घनत्व ρ के अभिलाक्षणिक गुण का कोई संतत आवेश वितरण है तो पहले की भाँति उसे हम Δv साइज़ के $\rho\Delta v$ आवेशयुक्त लघु आयतन अवयवों में विभाजित कर सकते हैं। तब हम प्रत्येक आयतन अवयव के कारण विभव निर्धारित करके और समस्त योगदानों का योग करके (सही शब्दों में, समाकलित करके) समस्त आवेश वितरण के कारण विभव ज्ञात कर सकते हैं।

अध्याय 1 में हम अध्ययन कर चुके हैं कि किसी एकसमान आवेशित गोलीय खोल के कारण किसी बाहर स्थित बिंदु के लिए विद्युत क्षेत्र इस प्रकार होता है, मानो खोल का समस्त आवेश उसके केंद्र पर संकेंद्रित हो। अत: खोल के बाहर स्थित किसी बिंदु पर आवेशित कोश के कारण विभव

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q}{r} \quad (r \geq R) \qquad [2.19(a)]$$

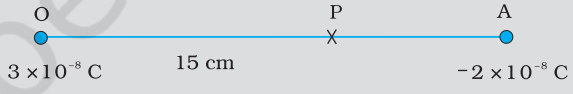
यहाँ q गोलीय खोल पर समस्त आवेश तथा R गोलीय कोश की त्रिज्या है। कोश के भीतर विद्युत क्षेत्र शून्य होता है। इससे यह ध्वनित होता है (देखिए अनुभाग 2.6) कि खोल के भीतर विभव नियत रहता है (क्योंकि खोल के भीतर आवेश को गति कराने से कोई कार्य नहीं होता), और, इसीलिए यह खोल के पृष्ठ के विभव के समान होता है।

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q}{R} \qquad [2.19(b)]$$

उदाहरण 2.2

उदाहरण 2.2 3×10^{-8}C तथा -2×10^{-8}C के दो आवेश एक-दूसरे से 15 cm दूरी पर रखे हैं। इन दोनों आवेशों को मिलाने वाली रेखा के किस बिंदु पर वैद्युत विभव शून्य है? अनंत पर वैद्युत विभव शून्य लीजिए।

हल मान लीजिए धनावेश मूल बिंदु O पर रखा है। दोनों आवेशों को मिलाने वाली रेखा x-अक्ष है; तथा ऋणावेश मूल बिंदु के दाईं ओर रखा है (चित्र 2.7 देखिए)।



चित्र 2.7

मान लीजिए x-अक्ष पर वह वांछित बिंदु P है जहाँ वैद्युत विभव शून्य है। यदि बिंदु P का x-निर्देशांक x है, तो स्पष्ट रूप से x धनात्मक होना चाहिए। ($x < 0$ के लिए यह संभव नहीं हो सकता कि दो आवेशों के कारण वैद्युत विभव जुड़कर शून्य हो जाए।) यदि x मूल बिंदु O तथा A के बीच कहीं स्थित है, तो

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{3\times10^{-8}}{x\times10^{-2}} - \frac{2\times10^{-8}}{(15-x)\times10^{-2}}\right] = 0$$

यहाँ x को cm में लिया गया है। अर्थात

$$\frac{3}{x} - \frac{2}{15-x} = 0$$

अथवा x = 9 cm

यदि बिंदु x विस्तारित रेखा OA पर है, तो वांछित शर्त के अनुसार

$$\frac{3}{x} - \frac{2}{x-15} = 0$$

© NCERT not to be republished

उदाहरण 2.2

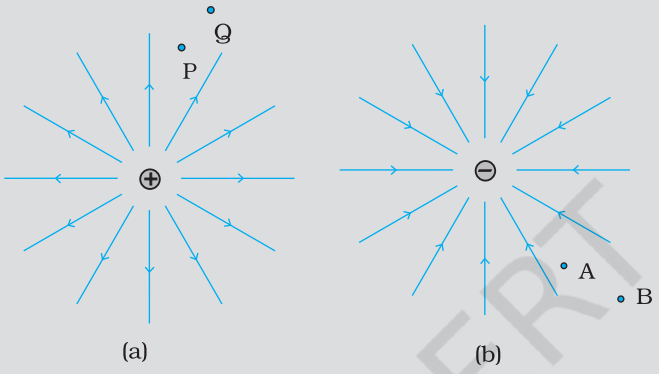
अथवा

$x = 45$ cm

इस प्रकार, धनावेश से 9 cm तथा 45 cm दूर ऋणावेश की ओर वैद्युत विभव शून्य है। ध्यान दीजिए, यहाँ परिकलनों के लिए वांछित सूत्र को अनंत पर वैद्युत विभव शून्य मानकर ही व्युत्पन्न किया गया था।

उदाहरण 2.3

उदाहरण 2.3 (a) तथा (b) में क्रमशः एकल धन तथा ऋण आवेशों की क्षेत्र रेखाएँ दर्शायी गई हैं



चित्र 2.8

(a) विभवांतर $V_P - V_Q$; $V_B - V_A$ के चिह्न बताइए।

(b) बिंदु Q और P; A और B के बीच एक छोटे से ऋण आवेश की स्थितिज ऊर्जा के अंतर का चिह्न बताइए।

(c) Q से P तक एक छोटे धनावेश को ले जाने में क्षेत्र द्वारा किए गए कार्य का चिह्न बताइए।

(d) B से A तक एक छोटे से ऋण आवेश को ले जाने के लिए बाह्य साधन द्वारा किए गए कार्य का चिह्न बताइए।

(e) B से A तक जाने में क्या एक छोटे से ऋणावेश की गतिज ऊर्जा बढ़ेगी या घटेगी?

हल

(a) चूँकि $V \propto \frac{1}{r}$, $V_P > V_Q$; इस प्रकार, $(V_P - V_Q)$ धनात्मक है। तथा V_A से V_B कम ऋणात्मक है। इसलिए, $V_B > V_A$ अथवा $(V_B - V_A)$ धनात्मक है।

(b) कोई लघु ऋणावेश धनावेश की ओर आकर्षित होगा। ऋणावेश स्थितिज उच्च ऊर्जा से निम्न स्थितिज ऊर्जा की ओर गति करते हैं। अतः Q और P के बीच किसी लघु ऋणावेश की स्थितिज ऊर्जा के अंतर का चिह्न धनात्मक है।

इसी प्रकार, (स्थितिज ऊर्जा)$_A$ > (स्थितिज ऊर्जा)$_B$ है। अतः स्थितिज ऊर्जा अंतर का चिह्न धनात्मक है।

(c) किसी लघु धनावेश को Q से P तक ले जाने में बाह्य एजेंसी को विद्युत क्षेत्र के विरुद्ध कार्य करना होता है। अतः, विद्युत क्षेत्र द्वारा किया गया कार्य ऋणात्मक है।

(d) किसी लघु ऋणावेश को B से A तक ले जाने में बाह्य एजेंसी को कार्य करना होता है जो धनात्मक है।

(e) ऋणावेश पर प्रतिकर्षी बल लगने के कारण वेग घटता है अतः B से A तक जाने में गतिज ऊर्जा घट जाती है।

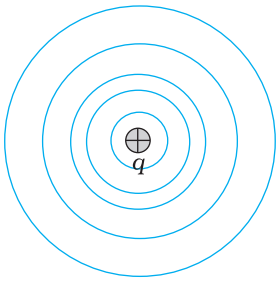
उदाहरण 2.3

भौतिकी

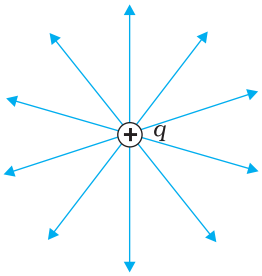
वैद्युत विभव, समविभव पृष्ठ

http://video.mit.edu/watch/4-electrostatic-potential-electric-energy-ev-conservative-field-equipotential-surfaces-12584/

© NCERT not to be republished



(a)



(b)

चित्र 2.9 किसी एकल आवेश q के लिए (a) समविभव पृष्ठ संकेंद्री गोलीय पृष्ठ होते हैं जिनके केंद्र पर आवेश स्थित होता है, तथा (b) यदि $q > 0$ है, तो क्षेत्र रेखाएँ आवेश से आरंभ होने वाली अरीय रेखाएँ होती हैं।

2.6 समविभव पृष्ठ

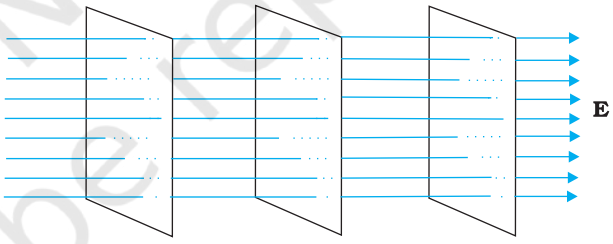
कोई समविभव पृष्ठ ऐसा पृष्ठ होता है जिसके पृष्ठ के हर बिंदु पर विभव नियत रहता है। किसी एकल आवेश q के लिए, समीकरण (2.8) द्वारा वैद्युत विभव–

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q}{r}$$

इससे यह प्रकट होता है कि यदि r नियत है तो V नियत रहता है। इस प्रकार किसी एकल आवेश के लिए समविभव पृष्ठ संकेंद्री गोले होते हैं जिनके केंद्र पर वह आवेश स्थित होता है।

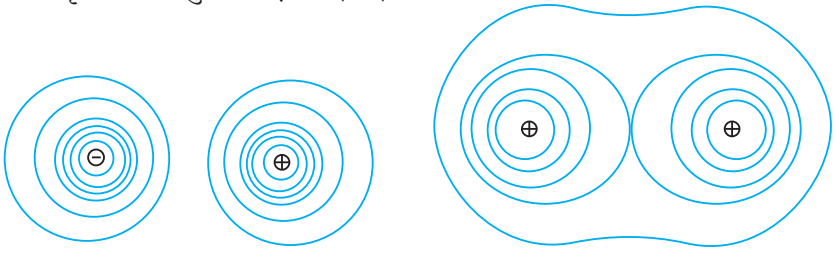
अब किसी एकल आवेश q के लिए विद्युत क्षेत्र रेखाएँ आवेश से आरंभ होने वाली अथवा उस आवेश पर समाप्त होने वाली (यह निर्भर करता है कि आवेश q धनात्मक है अथवा ऋणात्मक) अरीय रेखाएँ होती हैं। स्पष्ट है, किसी समविभव पृष्ठ के किसी भी बिंदु पर विद्युत क्षेत्र सदैव ही उस बिंदु पर अभिलंबवत होता है। यह व्यापक रूप से सत्य है : *किसी भी आवेश विन्यास के लिए किसी भी बिंदु से गुजरने वाला समविभव पृष्ठ उस बिंदु पर विद्युत क्षेत्र के अभिलंबवत होता है।* इस प्रकथन की व्युत्पत्ति सरल है।

यदि विद्युत क्षेत्र समविभव पृष्ठ के अभिलंबवत नहीं है; तो इस क्षेत्र का पृष्ठ के अनुदिश कोई शून्येतर घटक होगा। किसी एकांक परीक्षण आवेश का क्षेत्र के इस घटक की विरुद्ध दिशा में गति कराने के लिए कुछ कार्य करना आवश्यक होगा। परंतु यह किसी समविभव पृष्ठ की परिभाषा के विरुद्ध है : समविभव पृष्ठ के किन्हीं भी दो बिंदुओं के बीच कोई विभवांतर नहीं होता, तथा इस पृष्ठ पर किसी परीक्षण आवेश को गति कराने के लिए कोई कार्य करना आवश्यक नहीं होता। अतः किसी समविभव पृष्ठ के सभी बिंदुओं पर विद्युत क्षेत्र पृष्ठ के अभिलंबवत होता है। समविभव पृष्ठ किसी आवेश विन्यास के चारों ओर की विद्युत क्षेत्र रेखाओं के दृश्यों के वैकल्पिक दृश्य प्रस्तुत करते हैं।



चित्र 2.10 किसी एकसमान विद्युत क्षेत्र के लिए समविभव पृष्ठ।

किसी अक्ष के अनुदिश, मान लीजिए x-अक्ष के अनुदिश किसी एकसमान विद्युत क्षेत्र **E** के लिए, समविभव पृष्ठ x-अक्ष के अभिलंबवत, अर्थात y-z तल के समांतर तल होते हैं (चित्र 2.10)। चित्र 2.11 में (a) किसी वैद्युत द्विध्रुव तथा (b) में दो सर्वसम धनावेशों के कारण समविभव पृष्ठ तथा वैद्युत रेखाएँ दर्शाई गई हैं।



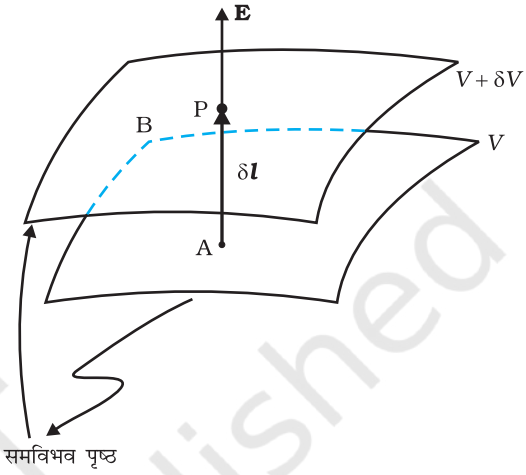
(a) (b)

चित्र 2.11(a) किसी वैद्युत द्विध्रुव तथा **(b)** दो सर्वसम धनावेशों के क्षेत्र के लिए कुछ समविभव पृष्ठ।

© NCERT not to be republished

2.6.1 विद्युत क्षेत्र तथा वैद्युत विभव में संबंध

एक-दूसरे के पास रखे दो समविभव पृष्ठों A तथा B (चित्र 2.12) जिनके विभवों के मान क्रमशः V तथा $V+\delta V$ हैं, यहाँ δV विद्युत क्षेत्र $\mathbf{E}$ की दिशा में V में परिवर्तन है। मान लीजिए पृष्ठ B पर कोई बिंदु P है। मान लीजिए पृष्ठ A की बिंदु P से लंबवत दूरी δl है। यह भी मानिए कि विद्युत क्षेत्र के विरुद्ध कोई एकांक धनावेश इस लंब के अनुदिश पृष्ठ B से पृष्ठ A पर ले जाया जाता है। इस प्रक्रिया में किया गया कार्य $|\mathbf{E}|\,\delta l$ है।



चित्र 2.12 विभव से क्षेत्र पर।

यह कार्य विभवांतर $V_A - V_B$ के बराबर है।

इस प्रकार

$$|\mathbf{E}|\,\delta l = V-(V+\delta V)= -\delta V$$

अर्थात $$|\mathbf{E}| = -\frac{\delta V}{\delta l} \qquad (2.20)$$

स्पष्ट है कि δV ऋणात्मक है, $\delta V = -|\delta V|$। हम समीकरण (2.20) को दुबारा इस प्रकार लिख सकते हैं :

$$|\mathbf{E}| = -\frac{\delta V}{\delta l} = +\frac{|\delta V|}{\delta l} \qquad (2.21)$$

इस प्रकार हम विद्युत क्षेत्र तथा वैद्युत विभव से संबंधित दो महत्वपूर्ण निष्कर्षों पर पहुँचते हैं –

(i) *विद्युत क्षेत्र उस दिशा में होता है जहाँ विभव में सर्वाधिक ह्रास होता है।*

(ii) *किसी बिंदु पर विद्युत क्षेत्र का परिमाण, उस बिंदु पर समविभव पृष्ठ के अभिलंबवत विभव के परिमाण में प्रति एकांक विस्थापन परिवर्तन द्वारा व्यक्त किया जाता है।*

2.7 आवेशों के निकाय की स्थितिज ऊर्जा

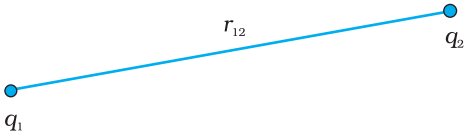
पहले हम एक सरल प्रकरण पर विचार करते हैं जिसमें किसी मूल बिंदु के सापेक्ष $\mathbf{r}_1$ तथा $\mathbf{r}_2$ स्थिति सदिशों वाले दो आवेश q_1 तथा q_2 हैं। आइए इस विन्यास के निर्माण में किए गए कार्य (बाह्य) का परिकलन करें। इसका अर्थ यह है कि पहले आरंभ में हम दोनों आवेशों q_1 तथा q_2 को अनंत पर मानें तथा बाद में बाह्य एजेंसी द्वारा उन्हें इनकी वर्तमान स्थितियों तक लाने में किए गए कार्य का परिकलन करें। मान लीजिए, हम पहले आवेश q_1 को अनंत से बिंदु $\mathbf{r}_1$ तक लाते हैं। चूँकि इस स्थिति में कोई बाह्य क्षेत्र नहीं है, जिसके विरुद्ध कार्य करने की आवश्यकता पड़े, अतः q_1 को अनंत से $\mathbf{r}_1$ तक लाने में किया गया कार्य शून्य है। यह आवेश दिक्स्थान में एक विभव V_1 उत्पन्न करता है

$$V_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q_1}{r_{1P}}$$

यहाँ r_{1P} दिक्स्थान के किसी बिंदु P की q_1 की स्थिति से दूरी है। विभव की परिभाषा से, आवेश q_2 को अनंत से बिंदु $\mathbf{r}_2$ तक लाने में किया गया कार्य $\mathbf{r}_2$ पर q_1 द्वारा विभव का q_2 गुना होता है–

$$q_2 \text{ पर किया गया कार्य } = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q_1 q_2}{r_{12}}$$

© NCERT not to be republished



चित्र 2.13 आवेशों q_1 तथा q_2 के निकाय की स्थितिज ऊर्जा आवेशों के गुणनफल के अनुक्रमानुपाती तथा उनके बीच की दूरी के व्युत्क्रमानुपाती होती है।

यहाँ r_{12} बिंदु 1 तथा 2 के बीच की दूरी है।

चूँकि स्थिरवैद्युत बल संरक्षी है, यह कार्य निकाय की स्थितिज ऊर्जा के रूप में संचित हो जाता है। अत: दो आवेशों q_1 तथा q_2 के निकाय की स्थितिज ऊर्जा

$$U = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q_1 q_2}{r_{12}} \tag{2.22}$$

स्पष्ट है, कि यदि पहले q_2 को उसकी वर्तमान स्थिति पर लाया जाता और तत्पश्चात q_1 को लाया जाता, तो भी स्थितिज ऊर्जा U इतनी ही होती। अधिक व्यापक रूप में, समीकरण (2.22) में दर्शाया गया स्थितिज ऊर्जा के लिए व्यंजक, सदैव ही अपरिवर्तित रहता है, चाहे निर्दिष्ट स्थानों पर आवेशों को किसी भी प्रकार से लाया जाए। यह स्थिरवैद्युत बलों के लिए कार्य की पथ-स्वतंत्रता के कारण होता है।

समीकरण (2.22) q_1 तथा q_2 के किसी भी चिह्न के लिए सत्य है। यदि $q_1 q_2 > 0$ है, तो स्थितिज ऊर्जा धनात्मक होती है। यह अपेक्षित भी है, क्योंकि सजातीय आवेशों ($q_1 q_2 > 0$) के लिए, स्थिरवैद्युत बल प्रतिकर्षी होता है तथा आवेशों को अनंत से किसी परिमित दूरी तक इस प्रतिकर्षी बल के विरुद्ध लाने में धनात्मक कार्य करना पड़ता है। इसके विपरीत, विजातीय आवेशों ($q_1 q_2 < 0$) के लिए स्थिरवैद्युत बल आकर्षी होता है। इस प्रकरण में, आवेशों को उनकी दी गई स्थितियों से अनंत तक इस आकर्षी बल के विरुद्ध ले जाने में धनात्मक कार्य करना पड़ता है। दूसरे शब्दों में, उत्क्रमित पथ (अनंत से वर्तमान स्थितियों तक) के लिए कार्य के ऋणात्मक परिमाण की आवश्यकता होती है जिसके कारण स्थितिज ऊर्जा ऋणात्मक होती है।

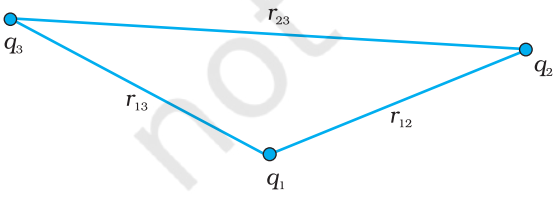
समीकरण (2.22) को आसानी से आवेशों के कितनी भी संख्या के निकाय के लिए व्यापक बनाया जा सकता है। आइए, अब हम तीन आवेशों q_1, q_2 तथा q_3 जो क्रमश: $\mathbf{r}_1$, $\mathbf{r}_2$ तथा $\mathbf{r}_3$ पर स्थित हैं, के निकाय की स्थितिज ऊर्जा परिकलित करें। पहले q_1 को अनंत से $\mathbf{r}_1$ तक लाने में कोई कार्य नहीं होता। तत्पश्चात हम q_2 को अनंत से $\mathbf{r}_2$ तक लाते हैं। पहले की ही भाँति इस चरण में किया गया कार्य

$$q_2 V_1(\mathbf{r}_2) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q_1 q_2}{r_{12}} \tag{2.23}$$

आवेश q_1 तथा q_2 अपने चारों ओर विभव उत्पन्न करते हैं, किसी बिंदु P पर यह विभव

$$V_{1,2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\left(\frac{q_1}{r_{1P}} + \frac{q_2}{r_{2P}}\right) \tag{2.24}$$

आवेश q_3 को अनंत से बिंदु $\mathbf{r}_3$ तक लाने में किया गया कार्य $\mathbf{r}_3$ पर $V_{1,2}$ का q_3 गुना होता है।



चित्र 2.14 चित्र में दिए गए संकेतों सहित समीकरण (2.26) में तीन आवेशों के निकाय की स्थितिज ऊर्जा दी गई है।

अत: $$q_3 V_{1,2}(\mathbf{r}_3) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\left(\frac{q_1 q_3}{r_{13}} + \frac{q_2 q_3}{r_{23}}\right) \tag{2.25}$$

आवेशों को उनकी दी गई स्थितियों पर एकत्र करने में किया गया कुल कार्य विभिन्न चरणों [समीकरण (2.23) तथा समीकरण (2.25)] में किए गए कार्यों का योग करने पर प्राप्त होता है।

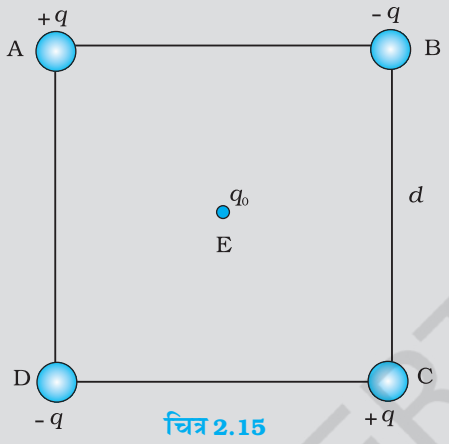
$$U = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\left(\frac{q_1 q_2}{r_{12}} + \frac{q_1 q_3}{r_{13}} + \frac{q_2 q_3}{r_{23}}\right) \tag{2.26}$$

यहाँ फिर, स्थिरवैद्युत बल की संरक्षी प्रकृति के कारण (अथवा तुल्य रूप में, कार्य की पथ-स्वतंत्रता) स्थितिज ऊर्जा U को अंतिम व्यंजक, समीकरण (2.26), विन्यास को किस प्रकार संयोजित किया गया है, उसके क्रम पर निर्भर नहीं करता। *स्थितिज ऊर्जा विन्यास की*

© NCERT not to be republished

वर्तमान अवस्था का अभिलाक्षणिक गुण होता है, यह इस बात पर निर्भर नहीं करता कि इस विन्यास को किस प्रकार प्राप्त किया गया है।

उदाहरण 2.4 चित्र 2.15 में दर्शाए अनुसार चार आवेश भुजा d वाले किसी वर्ग ABCD के शीर्षों पर व्यवस्थित किए गए हैं। (a) इस व्यवस्था को एक साथ बनाने में किया गया कार्य ज्ञात कीजिए। (b) कोई आवेश q_0 वर्ग के केंद्र E पर लाया जाता है तथा चारों आवेश अपने शीर्षों पर दृढ़ रहते हैं। ऐसा करने के लिए कितना अतिरिक्त कार्य करना पड़ता है?



चित्र 2.15

हल

(a) चूँकि किया गया कार्य आवेशों की अंतिम व्यवस्था पर निर्भर करता है, उन्हें किस प्रकार एक साथ लाया गया है, पर निर्भर नहीं करता, हम आवेशों को A, B, C, तथा D पर रखने के एक ढंग के लिए आवश्यक कार्य का परिकलन करेंगे। मान लीजिए पहले आवेश $+q$ को A पर लाया जाता है, तत्पश्चात आवेशों $-q$, $+q$ तथा $-q$ को क्रमशः B, C तथा D पर लाया जाता है। किए गए कुल कार्यों का परिकलन निम्नलिखित चरणों में किया जा सकता है :

(i) आवेश $+q$ को A पर लाने में किया गया कार्य जब कहीं भी कोई आवेश नहीं है: यह शून्य है।

(ii) आवेश $-q$ को B पर लाने में किया गया कार्य जब $+q$ शीर्ष A पर है। यह (B पर आवेश) × (A पर आवेश $+q$ के कारण बिंदु B पर स्थिरवैद्युत विभव)

$$= -q \times \left(\frac{q}{4\pi\varepsilon_o d} \right) = -\frac{q^2}{4\pi\varepsilon_o d}$$

(iii) आवेश $+q$ को C पर लाने में किया गया कार्य जब $+q$ शीर्ष A पर तथा $-q$ शीर्ष B पर है। यह (C पर आवेश) × (A तथा B पर आवेशों के कारण C पर विभव)

$$= +q \left(\frac{+q}{4\pi\varepsilon_o d\sqrt{2}} + \frac{-q}{4\pi\varepsilon_o d} \right)$$

$$= \frac{-q^2}{4\pi\varepsilon_o d} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$$

(iv) आवेश $-q$ को D पर लाने में किया गया कार्य जब $+q$ शीर्ष A पर, $-q$ शीर्ष B पर तथा $+q$ शीर्ष C पर हैं। यह (D पर आवेश) × (A, B तथा C पर आवेशों के कारण D पर विभव)

$$= -q \left(\frac{+q}{4\pi\varepsilon_o d} + \frac{-q}{4\pi\varepsilon_o d\sqrt{2}} + \frac{q}{4\pi\varepsilon_o d} \right)$$

$$= \frac{-q^2}{4\pi\varepsilon_o d} \left(2 - \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$$

© NCERT not to be republished

उदाहरण 2.4

चारों चरणों (i), (ii), (iii) एवं (iv) के कार्यों को जोड़ने पर, आवश्यक कुल कार्य

$$= \frac{-q^2}{4\pi\varepsilon_o d}\left\{(0)+(1)+\left(1-\frac{1}{\sqrt{2}}\right)+\left(2-\frac{1}{\sqrt{2}}\right)\right\}$$

$$= \frac{-q^2}{4\pi\varepsilon_o d}\left(4-\sqrt{2}\right)$$

यह कार्य केवल आवेशों की व्यवस्था पर निर्भर करता है, इस बात पर निर्भर नहीं करता कि इन्हें कैसे व्यवस्थित किया गया है। परिभाषा के अनुसार यह आवेशों की कुल स्थिरवैद्युत ऊर्जा है।

(विद्यार्थी अपनी इच्छानुसार आवेशों को किसी भी अन्य क्रम में लेकर इसी कार्य/ऊर्जा को परिकलित करने का प्रयास कर सकते हैं और यह देखकर अपने को संतुष्ट कर सकते हैं कि हर प्रकरण में ऊर्जा समान रहती है।)

(b) जबकि चारों आवेश A, B, C तथा D पर हैं, आवेश q_0 को बिंदु E पर लाने में किया गया अतिरिक्त कार्य q_0 × (A, B, C तथा D पर हैं आवेशों के कारण E पर स्थिरवैद्युत विभव) के बराबर है। स्पष्ट रूप से बिंदु E पर स्थिरवैद्युत विभव शून्य है, क्योंकि A तथा C पर आवेशों के कारण विभव B तथा D द्वारा निरस्त हो जाते हैं। अत: बिंदु E तक किसी भी आवेश को लाने में कोई कार्य करना नहीं पड़ता है।

2.8 बाह्य क्षेत्र में स्थितिज ऊर्जा

2.8.1 एकल आवेश की स्थितिज ऊर्जा

अनुभाग 2.7 में विद्युत क्षेत्र के स्रोत का विशेष उल्लेख किया गया–आवेश तथा उनकी स्थितियाँ–तथा उन आवेशों के निकाय की स्थितिज ऊर्जा निर्धारित की गई। इस अनुभाग में हम इससे संबंधित परंतु भिन्न प्रश्न पूछते हैं। किसी दिए गए क्षेत्र में किसी आवेश q की स्थितिज ऊर्जा क्या होती है? वास्तव में, यह प्रश्न आरंभ बिंदु था जो हमें स्थिरवैद्युत विभव की धारणा की ओर ले गया था (देखिए अनुभाग 2.1 तथा 2.2)। परंतु यही प्रश्न हम फिर दुबारा यह स्पष्ट करने के लिए पूछ रहे हैं कि किस रूप में यह अनुभाग 2.7 में की गई चर्चा से भिन्न है।

यहाँ प्रमुख अंतर यह है कि अब हम यहाँ पर किसी *बाह्य क्षेत्र* में आवेश (अथवा आवेशों) की स्थितिज ऊर्जा के विषय में चर्चा कर रहे हैं। इसमें बाह्य क्षेत्र **E** उन दिए गए आवेशों द्वारा उत्पन्न नहीं किया जाता जिनकी स्थितिज ऊर्जा का हम परिकलन करना चाहते हैं। विद्युत क्षेत्र **E** उस स्रोत द्वारा उत्पन्न किया जाता है जो दिए गए आवेश (आवेशों) की दृष्टि से बाह्य होता है। बाह्य स्रोत ज्ञात हो सकता है परंतु प्राय: ये स्रोत अज्ञात अथवा अनिर्दिष्ट होते हैं, जो कुछ भी यहाँ निर्दिष्ट होता है वह है विद्युत क्षेत्र **E** अथवा बाह्य स्रोतों के कारण स्थिरवैद्युत विभव V। हम यह मानते हैं कि आवेश q बाह्य क्षेत्र उत्पन्न करने वाले स्रोतों को सार्थक रूप से प्रभावित नहीं करता। यदि q अत्यधिक छोटा है, तो यह सत्य है अथवा कुछ अनिर्दिष्ट बलों के प्रभाव में बाह्य स्रोतों को दृढ़ रखा जा सकता है। यदि q परिमित है तो भी इसके बाह्य स्रोतों पर प्रभाव की उन परिस्थितियों में उपेक्षा की जा सकती है, जिनमें बहुत दूर अनंत पर स्थित अत्यधिक प्रबल स्रोत हमारी रुचि के क्षेत्र में कोई परिमित क्षेत्र **E** उत्पन्न करता है। फिर ध्यान दीजिए, हमारी रुचि किसी बाह्य क्षेत्र में, दिए गए आवेश q (तत्पश्चात आवेशों के किसी निकाय) की स्थितिज ऊर्जा निर्धारित करने में है; हमें बाह्य विद्युत क्षेत्र उत्पन्न करने वाले स्रोत की स्थितिज ऊर्जा में कोई रुचि नहीं है।

बाह्य विद्युत क्षेत्र **E** तथा तदनुरूपी बाह्य विभव V का मान एक बिंदु से दूसरे बिंदु पर जाने में परिवर्तित हो सकता है। परिभाषा के अनुसार, किसी बिंदु P पर विभव V एकांक धनावेश को अनंत से उस बिंदु P तक लाने में किए गए कार्य के बराबर होता है (हम निरंतर ही अनंत पर विभव

2022-23

को शून्य मानते रहेंगे)। अत: किसी आवेश q को अनंत से बाह्य क्षेत्र के किसी बिंदु P तक लाने में किया गया कार्य qV होता है। यह कार्य आवेश q में स्थितिज ऊर्जा के रूप में संचित हो जाता है। यदि बिंदु P का किसी मूल बिंदु के सापेक्ष कोई स्थिति सदिश $\mathbf{r}$ है, तो हम यह लिख सकते हैं कि:

किसी बाह्य क्षेत्र में आवेश q की $\mathbf{r}$ पर स्थितिज ऊर्जा

$$= qV(\mathbf{r}) \qquad (2.27)$$

यहाँ $V(\mathbf{r})$ बिंदु $\mathbf{r}$ पर बाह्य विभव है।

इस प्रकार, यदि आवेश $q = e = 1.6\times10^{-19}$ C का कोई इलेक्ट्रॉन किसी विभवान्तर ΔV=1 वोल्ट द्वारा त्वरित किया जाता है, तो वह ऊर्जा $q\Delta V = 1.6 \times 10^{-19}$J अर्जित करेगा। ऊर्जा के इस मात्रक को 1 *इलेक्ट्रॉन वोल्ट,* अर्थात 1 eV=1.6×10^{-19}J के रूप में परिभाषित करते हैं। eV पर आधारित मात्रकों का सर्वाधिक उपयोग आण्विक, नाभिकीय तथा कण भौतिकी में किया जाता है, (1 keV = 10^3eV = 1.6×10^{-16}J, 1 MeV = 10^6eV = 1.6×10^{-13}J, 1 GeV = 10^9eV = 1.6×10^{-10}J तथा 1 TeV = 10^{12}eV = 1.6×10^{-7}J) [इसे भौतिकी भाग I कक्षा 11 पृष्ठ 119 सारणी 6.1 में पहले ही परिभाषित किया जा चुका है।]

2.8.2 किसी बाह्य क्षेत्र में दो आवेशों के निकाय की स्थितिज ऊर्जा

अब हम यह पूछते हैं : किसी बाह्य क्षेत्र में क्रमश: $\mathbf{r}_1$ तथा $\mathbf{r}_2$ पर स्थित दो आवेशों q_1 तथा q_2 की स्थितिज ऊर्जा क्या होती है? इस विन्यास का निर्माण करने में किए गए कार्य का परिकलन करने के लिए आइए यह कल्पना करें कि पहले हम आवेश q_1 को अनंत से $\mathbf{r}_1$ तक लाते हैं। समीकरण (2.27) के अनुसार, इस चरण में किया गया कार्य $q_1 V(\mathbf{r}_1)$ है। अब हम आवेश q_2 को $\mathbf{r}_2$ तक लाने में किए जाने वाले कार्य पर विचार करते हैं। इस चरण में केवल बाह्य क्षेत्र $\mathbf{E}$ के विरुद्ध ही कार्य नहीं होता, वरन् q_1 के कारण क्षेत्र के विरुद्ध भी कार्य करना होता है। अत:

q_2 पर बाह्य क्षेत्र के विरुद्ध किया गया कार्य

$= q_2 V(\mathbf{r}_2)$

q_2 पर q_1 के कारण क्षेत्र के विरुद्ध किया गया कार्य

$$= \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_o r_{12}}$$

यहाँ r_{12} आवेशों q_1 तथा q_2 के बीच की दूरी है। ऊपर हमने समीकरण (2.27) तथा (2.22) का उपयोग किया है। क्षेत्रों के लिए अध्यारोपण सिद्धांत द्वारा हम q_2 पर दो क्षेत्रों ($\mathbf{E}$ तथा q_1 के कारण क्षेत्र) के विरुद्ध किए गए कार्यों को जोड़ते हैं। अत:

q_2 को $\mathbf{r}_2$ तक लाने में किया गया कार्य

$$= q_2 V(\mathbf{r}_2) + \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_o r_{12}} \qquad (2.28)$$

इस प्रकार,

निकाय की स्थितिज ऊर्जा

= विन्यास के निर्माण में किया गया कार्य

$$= q_1 V(\mathbf{r}_1) + q_2 V(\mathbf{r}_2) + \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 r_{12}} \qquad (2.29)$$

उदाहरण 2.5

(a) दो आवेशों 7 μC तथा –2 μC जो क्रमश: (–9 cm, 0, 0) तथा (9 cm, 0, 0) पर स्थित हैं, के ऐसे निकाय, जिस पर कोई बाह्य क्षेत्र आरोपित नहीं है, की स्थिरवैद्युत स्थितिज की ऊर्जा ज्ञात कीजिए।

(b) दोनों आवेशों को एक-दूसरे से अनंत दूरी तक पृथक करने के लिए कितने कार्य की आवश्यकता होगी?

उदाहरण 2.5

© NCERT not to be republished

उदाहरण 2.5

(c) माना कि अब इस आवेश निकाय को किसी बाह्य विद्युत क्षेत्र $E = A\,(1/r^2)$; $A = 9 \times 10^5\,\text{Ne}^{-1}\,\text{m}^2$ में रखा गया है। इस विन्यास की स्थिरवैद्युत ऊर्जा का परिकलन करें।

हल

(a) $$U = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q_1 q_2}{r} = 9\times10^9 \times \frac{7\times(-2)\times10^{-12}}{0.18} = -0.7\ \text{J}$$

(b) $W = U_2 - U_1 = 0 - U = 0 - (-0.7) = 0.7\ \text{J}$

(c) दो आवेशों की पारस्परिक अन्योन्य ऊर्जा अपरिवर्तित रहती है। साथ ही यहाँ पर दो आवेशों की बाह्य विद्युत क्षेत्र के साथ अन्योन्य क्रिया की ऊर्जा भी है। अत: हम यह पाते हैं कि

$$q_1V(\mathbf{r}_1) + q_2V(\mathbf{r}_2) = A\frac{7\,\mu\text{C}}{0.09\text{m}} + A\frac{-2\,\mu\text{C}}{0.09\text{m}}$$

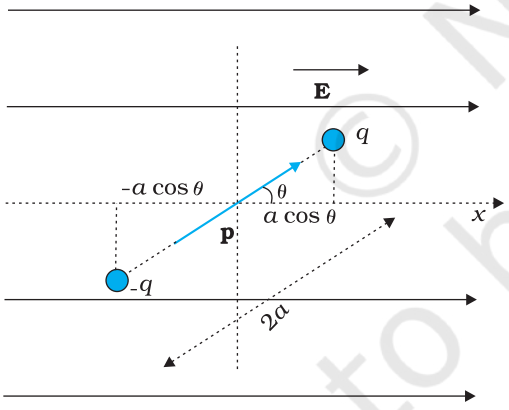
तथा नेट स्थिरवैद्युत ऊर्जा का मान है

$$q_1V(\mathbf{r}_1) + q_2V(\mathbf{r}_2) + \frac{q_1q_2}{4\pi\varepsilon_0 r_{12}} = A\frac{7\,\mu\text{C}}{0.09\,\text{m}} + A\frac{-2\,\mu\text{C}}{0.09\,\text{m}} - 0.7\,\text{J}$$

$$= 70 - 20 - 0.7 = 49.3\,\text{J}$$

2.8.3 बाह्य क्षेत्र में द्विध्रुव की स्थितिज ऊर्जा

चित्र 2.16 में दर्शाए अनुसार किसी एकसमान विद्युत क्षेत्र **E** में रखे आवेशों $q_1 = +q$ तथा $q_2 = -q$ के द्विध्रुव पर विचार कीजिए।



चित्र 2.16 किसी विद्युत द्विध्रुव की एकसमान बाह्य क्षेत्र में स्थितिज ऊर्जा।

जैसाकि हमने पिछले अध्याय में देखा, एकसमान विद्युत क्षेत्र में द्विध्रुव किसी नेट बल का अनुभव नहीं करता; परंतु एक बल आघूर्ण का अनुभव करता है जो इस प्रकार है :

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{p}\times\mathbf{E} \qquad (2.30)$$

यह इसमें घूर्णन की प्रवृत्ति उत्पन्न करेगा (जब तक **p** तथा **E** एक-दूसरे के समांतर अथवा प्रतिसमांतर नहीं हैं)। मान लीजिए कोई बाह्य बल आघूर्ण $\boldsymbol{\tau}_{\text{बाह्य}}$ इस प्रकार लगाया जाता है कि वह इस बल आघूर्ण को ठीक-ठीक उदासीन कर देता है और इसे कागज़ के तल *बिना किसी कोणीय त्वरण* के अत्यंत सूक्ष्म कोणीय चाल से कोण θ_0 से कोण θ_1 पर घूर्णित कर देता है। इस बाह्य बल आघूर्ण द्वारा किया गया कार्य

$$W = \int_{\theta_0}^{\theta_1} \tau_{\text{बाह्य}}(\theta)\,d\theta = \int_{\theta_0}^{\theta_1} pE\sin\theta\,d\theta$$

$$= pE\left(\cos\theta_0 - \cos\theta_1\right) \qquad (2.31)$$

यह कार्य निकाय में स्थितिज ऊर्जा के रूप में संचित हो जाता है। तब हम स्थितिज ऊर्जा $U(\theta)$ को द्विध्रुव के किसी झुकाव θ से संबद्ध कर सकते हैं। अन्य स्थितिज ऊर्जाओं की भाँति यहाँ हमें उस कोण के चयन की स्वतंत्रता है जिस पर विभव स्थितिज ऊर्जा U शून्य माना जाए। प्राकृतिक चयन के अनुसार $\theta_0 = \pi/2$ लिया जाना चाहिए। (इसका स्पष्टीकरण चर्चा के अंत में दिया गया है।) तब हम यह लिख सकते हैं,

$$U(\theta) = pE\left(\cos\frac{\pi}{2} - \cos\theta\right) = -pE\cos\theta = -\mathbf{p}\cdot\mathbf{E} \qquad (2.32)$$

© NCERT not to be republished

वैकल्पिक रूप से इस व्यंजक को समीकरण (2.29) से भी समझा जा सकता है। हम समीकरण (2.29) का प्रयोग दो आवेशों $+q$ तथा $-q$ के वर्तमान निकाय के लिए करते हैं। तब स्थितिज ऊर्जा के व्यंजक को इस प्रकार व्यक्त किया जा सकता है :

$$U'(\theta) = q[V(\mathbf{r}_1) - V(\mathbf{r}_2)] - \frac{q^2}{4\pi\varepsilon_0 \times 2a} \qquad (2.33)$$

यहाँ $\mathbf{r}_1$ तथा $\mathbf{r}_2$ दो आवेशों $+q$ तथा $-q$ के स्थिति सदिशों को दर्शाते हैं। अब $\mathbf{r}_1$ तथा $\mathbf{r}_2$ के बीच विभवांतर एकांक धनावेश को क्षेत्र के विरुद्ध $\mathbf{r}_2$ से $\mathbf{r}_1$ तक लाने में किए गए कार्य के बराबर है। बल के समांतर विस्थापन $2a\cos\theta$ है। इस प्रकार $[V(\mathbf{r}_1) - V(\mathbf{r}_2)] = -E \times 2a\cos\theta$, इस प्रकार, हमें प्राप्त होता है। चूँकि एक नियतांक स्थितिज ऊर्जा के लिए नगण्य है, हम समीकरण (2.34) में दूसरे पद को छोड़ सकते हैं। तब यह समीकरण (2.32) बन जाता है।

$$U'(\theta) = -pE\cos\theta - \frac{q^2}{4\pi\varepsilon_0 \times 2a} = -\mathbf{p}\cdot\mathbf{E} - \frac{q^2}{4\pi\varepsilon_0 \times 2a} \qquad (2.34)$$

ध्यान दीजिए कि $U'(\theta)$ तथा $U(\theta)$ में एक राशि का अंतर है जो किसी दिए गए द्विध्रुव के लिए मात्र एक नियतांक है। स्थितिज ऊर्जा के लिए नियतांक महत्वपूर्ण नहीं है, अतः समीकरण (2.34) से हम द्वितीय पद को छोड़ सकते हैं। इस प्रकार से यह समीकरण (2.32) के रूप में आ जाता है।

अब हम यह समझ सकते हैं कि हमने $\theta_0 = \pi/2$ क्यों लिया था। इस प्रकरण में $+q$ तथा $-q$ को बाह्य क्षेत्र $\mathbf{E}$ के विरुद्ध लाने में किए जाने वाले कार्य समान तथा विपरीत हैं और निरासित हो जाते हैं, अर्थात $q[V(\mathbf{r}_1) - V(\mathbf{r}_2)] = 0$

उदाहरण 2.6 एक पदार्थ के अणु में 10^{-29} cm का स्थायी वैद्युत द्विध्रुव आघूर्ण है। 10^6 V m^{-1} परिमाण के एक शक्तिशाली स्थिरवैद्युत क्षेत्र को लगाकर इस पदार्थ के एक मोल (निम्न ताप पर) को ध्रुवित किया गया है। अचानक क्षेत्र की दिशा 60º कोण से बदल दी जाती है। क्षेत्र की नयी दिशा में द्विध्रुवों को पंक्तिबद्ध करने में उन्मुक्त ऊष्मा ऊर्जा का आकलन कीजिए। सुविधा के लिए नमूने का ध्रुवण 100% माना जा सकता है।

हल यहाँ प्रत्येक अणु का द्विध्रुव आघूर्ण = 10^{-29} C m
चूँकि किसी पदार्थ के एक मोल में 6×10^{23} अणु होते हैं, अतः सारे अणुओं का कुल द्विध्रुव आघूर्ण, $p = 6 \times 10^{23} \times 10^{-29}$ C m $= 6 \times 10^{-6}$ C m
आरंभिक स्थितिज ऊर्जा $U_i = -pE\cos\theta = -6\times10^{-6}\times10^6\cos 0° = -6$ J
अंतिम स्थितिज ऊर्जा (जब $\theta = 60°$), $U_f = -6 \times 10^{-6} \times 10^6 \cos 60° = -3$ J
स्थितिज ऊर्जा में अंतर = -3 J $-$ (-6J) = 3 J
अतः, यहाँ ऊर्जा की हानि होती है। पदार्थ द्वारा द्विध्रुवों को पंक्तिबद्ध करने में ऊष्मा के रूप में यह ऊर्जा मुक्त होनी चाहिए।

उदाहरण 2.6

2.9 चालक-स्थिरवैद्युतिकी

अध्याय 1 में चालकों तथा विद्युतरोधी पदार्थों का संक्षेप में वर्णन किया गया था। चालकों में गतिशील आवेश वाहक होते हैं। धात्विक चालकों में ये वाहक इलेक्ट्रॉन होते हैं। धातुओं में, बाह्य (संयोजी) इलेक्ट्रॉन अपने परमाणु से अलग होकर गति करने के लिए मुक्त होते हैं। ये इलेक्ट्रॉन धातु के अंदर गति करने के लिए मुक्त होते हैं परंतु धातु से मुक्त नहीं हो सकते। ये मुक्त इलेक्ट्रॉन एक प्रकार की 'गैस' की भाँति आपस में परस्पर तथा आयनों से टकराते हैं तथा विभिन्न दिशाओं में यादृच्छिक गति करते हैं। किसी बाह्य विद्युत क्षेत्र में, ये क्षेत्र की दिशा के विपरीत बहते हैं। नाभिकों के इस प्रकार धन आयन तथा परिबद्ध इलेक्ट्रॉन अपनी नियत स्थितियों पर ही दृढ़ रहते हैं। अपघटनी चालकों में धनायन तथा ऋणायन दोनों ही आवेश वाहक होते हैं; परंतु इस प्रकरण में स्थिति अधिक जटिल

© NCERT not to be republished

होती है–आवेश वाहकों की गति बाह्य विद्युत क्षेत्र के साथ-साथ रासायनिक बलों (अध्याय 3 देखिए) द्वारा भी प्रभावित होती है। यहाँ हम अपनी चर्चा ठोस धात्विक चालकों तक ही सीमित रखेंगे। आइए चालक-स्थिरवैद्युतिकी से संबंधित कुछ महत्वपूर्ण परिणामों पर ध्यान दें।

1. चालक के भीतर स्थिरवैद्युत क्षेत्र शून्य होता है

किसी उदासीन अथवा आवेशित चालक पर विचार कीजिए। यहाँ कोई बाह्य स्थिरवैद्युत क्षेत्र भी हो सकता है। स्थैतिक स्थिति में, जब चालक के भीतर अथवा उसके पृष्ठ पर कोई विद्युत धारा नहीं होती, तब चालक के भीतर हर स्थान पर स्थिरवैद्युत क्षेत्र शून्य होता है। इस तथ्य को किसी चालक को परिभाषित करने के गुण के रूप में माना जा सकता है। चालक में मुक्त इलेक्ट्रॉन होते हैं। जब तक विद्युत क्षेत्र शून्य नहीं है, मुक्त आवेश वाहक एक बल का अनुभव करेंगे और उनमें बहाव होगा। स्थैतिक स्थिति में मुक्त इलेक्ट्रॉन स्वयं को इस प्रकार वितरित कर लेते हैं कि चालक के भीतर हर स्थान पर विद्युत क्षेत्र शून्य होता है। *किसी चालक के भीतर स्थिरवैद्युत क्षेत्र शून्य होता है।*

2. आवेशित चालक के पृष्ठ पर, पृष्ठ के प्रत्येक बिंदु पर स्थिरवैद्युत क्षेत्र अभिलंबवत होना चाहिए

यदि **E** पृष्ठ के अभिलंबवत नहीं है तो उसका पृष्ठ के अनुदिश कोई शून्येतर घटक होगा। तब पृष्ठ के मुक्त इलेक्ट्रॉन पृष्ठ पर किसी बल का अनुभव करेंगे और गति करेंगे। अत:, स्थैतिक स्थिति में **E** का कोई स्पर्श रेखीय घटक नहीं होना चाहिए। इस प्रकार, *किसी आवेशित चालक के पृष्ठ पर स्थिरवैद्युत क्षेत्र पृष्ठ के हर बिंदु पर पृष्ठ के अभिलंबवत होना चाहिए।* (किसी चालक के लिए जिस पर कोई पृष्ठीय आवेश घनत्व नहीं है, उसके पृष्ठ तक पर भी क्षेत्र शून्य होता है।) परिणाम 5 देखिए।

3. स्थैतिक स्थिति में किसी चालक के अभ्यंतर में कोई अतिरिक्त आवेश नहीं हो सकता

किसी उदासीन चालक के प्रत्येक लघु आयतन अथवा पृष्ठीय अवयव में धनात्मक तथा ऋणात्मक आवेश समान मात्रा में होते हैं। जब किसी चालक को आवेशित किया जाता है, तो स्थैतिक स्थिति में अतिरिक्त आवेश केवल उसके पृष्ठ पर विद्यमान रहता है। यह गाउस नियम से स्पष्ट है। किसी चालक के भीतर किसी यादृच्छिक आयतन अवयव v पर विचार कीजिए। आयतन अवयव v को परिबद्ध करने वाले किसी बंद पृष्ठ S पर स्थिरवैद्युत क्षेत्र शून्य होता है। इस प्रकार, S से गुजरने वाला कुल फ्लक्स शून्य है। अत: गाउस नियम के अनुसार S पर परिबद्ध कोई नेट आवेश नहीं है। परंतु पृष्ठ S को आप जितना छोटा चाहें, उतना छोटा बना सकते हैं, अर्थात आयतन v को अत्यल्प (लोपी बिंदु तक छोटा) बनाया जा सकता है। इसका अभिप्राय यह हुआ कि *चालक के भीतर कोई नेट आवेश नहीं है तथा यदि कोई अतिरिक्त आवेश है तो उसे पृष्ठ पर विद्यमान होना चाहिए।*

4. चालक के समस्त आयतन में स्थिरवैद्युत विभव नियत रहता है तथा इसका मान इसके पृष्ठ पर भी समान (भीतर के बराबर) होता है

यह उपरोक्त परिणाम 1 तथा 2 का अनुवर्ती है। चूँकि किसी चालक के भीतर $\mathbf{E} = 0$ तथा इसका पृष्ठ पर कोई स्पर्श रेखीय घटक नहीं होता अत: इसके भीतर अथवा पृष्ठ पर किसी छोटे परीक्षण आवेश को गति कराने में कोई कार्य नहीं होता। अर्थात, चालक के भीतर अथवा उसके पृष्ठ पर दो बिंदुओं के बीच कोई विभवांतर नहीं होता। यही वांछित परिणाम है। यदि चालक आवेशित है तो चालक के पृष्ठ के अभिलंबवत विद्युत क्षेत्र होता है; इसका यह अभिप्राय है कि चालक के पृष्ठ के किसी बिंदु का विभव चालक से तुरंत बाहर के बिंदु के विभव से भिन्न होगा।

© NCERT not to be republished

किसी यादृच्छिक आकार, आकृति तथा आवेश विन्यास के चालकों के निकाय में प्रत्येक चालक का अपना एक नियत मान का अभिलाक्षणिक विभव होगा, परंतु यह नियत मान एक चालक से दूसरे चालक का भिन्न हो सकता है।

5. आवेशित चालक के पृष्ठ पर विद्युत क्षेत्र

$$\mathbf{E} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\hat{\mathbf{n}} \qquad (2.35)$$

यहाँ σ पृष्ठीय आवेश घनत्व तथा $\hat{\mathbf{n}}$ पृष्ठ के अभिलंबवत बहिर्मुखी दिशा में एकांक सदिश है।

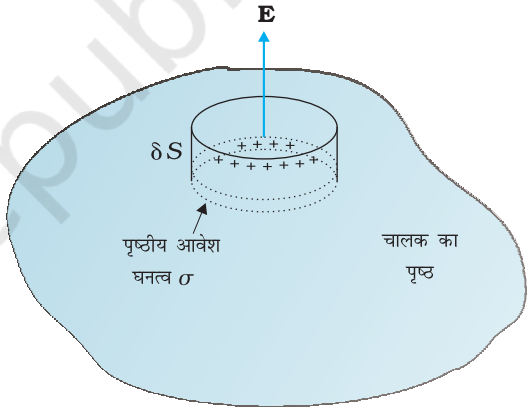
इस परिणाम को व्युत्पन्न करने के लिए, कोई डिबिया (एक छोटा बेलनाकार खोखला बर्तन) चित्र 2.17 में दर्शाए अनुसार, पृष्ठ के किसी बिंदु P के परितः गाउसीय पृष्ठ के रूप में चुनिए। इस डिबिया का कुछ भाग चालक के पृष्ठ के बाहर तथा कुछ भाग चालक के पृष्ठ के भीतर है। इसकी अनुप्रस्थ काट का क्षेत्रफल δS बहुत छोटा तथा इसकी ऊँचाई नगण्य है।

पृष्ठ के तुरंत भीतर स्थिरवैद्युत क्षेत्र शून्य है; पृष्ठ के तुरंत बाहर विद्युत क्षेत्र पृष्ठ के अभिलंबवत है। अतः डिबिया से गुज़रने वाला कुल फ्लक्स केवल डिबिया की बाहरी (वृत्तीय) अनुप्रस्थ काट से आता है। यह $\pm E\,\delta S$ ($\sigma > 0$ के लिए धनात्मक, $\sigma < 0$ के लिए ऋणात्मक) के बराबर है, चूँकि चालक के छोटे क्षेत्र δS पर विद्युत क्षेत्र $\mathbf{E}$ को नियत माना जा सकता है तथा $\mathbf{E}$ और δS समांतर अथवा प्रतिसमांतर हैं। डिबिया द्वारा परिबद्ध, आवेश $\sigma\,\delta S$ है। गाउस नियम के अनुसार

$$E\delta S = \frac{|\sigma|\,\delta S}{\varepsilon_o}$$

$$E = \frac{|\sigma|}{\varepsilon_o} \qquad (2.36)$$

इस तथ्य को सम्मिलित करते हुए कि विद्युत क्षेत्र पृष्ठ के अभिलंबवत है, हम समीकरण (2.35) के रूप में सदिश संबंध पाते हैं। ध्यान दीजिए, समीकरण (2.35) आवेश घनत्व σ के दोनों चिह्नों के लिए सत्य है। $\sigma > 0$ के लिए, विद्युत क्षेत्र पृष्ठ के बहिर्मुखी अभिलंबवत है; तथा $\sigma < 0$ के लिए, विद्युत क्षेत्र पृष्ठ के अंतर्मुखी अभिलंबवत है।

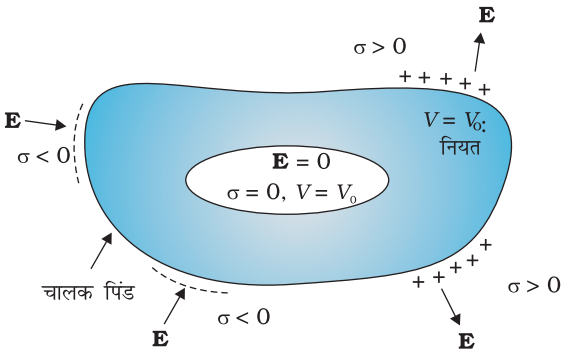


चित्र 2.17 किसी आवेशित चालक के पृष्ठ पर विद्युत क्षेत्र के लिए समीकरण (2.35) व्युत्पन्न करने के लिए, चुना गया गाउसीय पृष्ठ (कोई डिबिया)।

2.9.1 स्थिरवैद्युत परिरक्षण

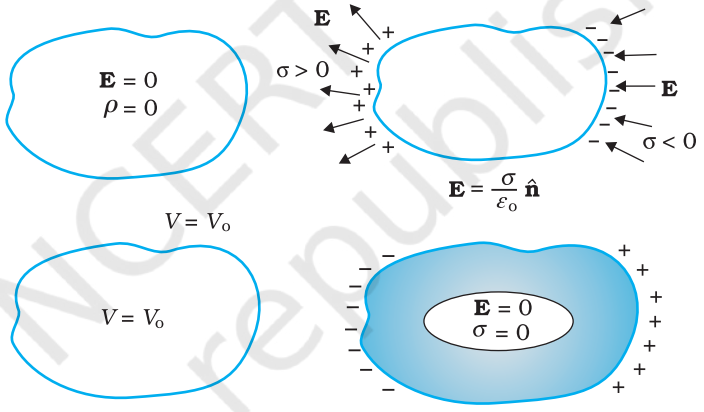
किसी ऐसे चालक के विषय में विचार कीजिए जिसमें कोई कोटर (गुहा) हो तथा उस कोटर के भीतर कोई आवेश न हो। एक विशिष्ट परिणाम यह देखने को मिलेगा कि चाहे कोटर की कोई भी आकृति एवं आकार क्यों न हो, तथा चाहे उस चालक पर कितने भी परिमाण का आवेश हो और कितनी भी तीव्रता के बाह्य क्षेत्र में उसे क्यों न रखा गया हो, कोटर के भीतर विद्युत क्षेत्र शून्य होता है। इसी परिणाम के एक सरल प्रकरण को हम पहले भी सिद्ध कर चुके हैं : किसी गोलीय कोश के भीतर विद्युत क्षेत्र शून्य होता है। कोश के लिए परिणाम की व्युत्पत्ति में हमने कोश की गोलीय सममिति का उपयोग किया था (अध्याय 1 देखिए)। परंतु किसी चालक का (आवेश मुक्त) कोटर में विद्युत क्षेत्र का विलोपन, जैसा कि पहले वर्णन किया जा चुका है, एक अत्यधिक व्यापक परिणाम है। इससे संबंधित एक परिणाम यह भी है कि यदि चालक आवेशित भी है, अथवा किसी बाह्य विद्युत क्षेत्र द्वारा उदासीन चालक पर आवेश प्रेरित क्यों न किए गए हों, समस्त आवेश केवल चालक पर कोटर सहित उसके बाह्य पृष्ठ पर विद्यमान रहता है।

© NCERT not to be republished



चित्र 2.18 किसी भी चालक की कोटर (गुहा) के भीतर विद्युत क्षेत्र शून्य होता है। चालक का समस्त आवेश कोटर सहित उस चालक के केवल बाह्य पृष्ठ पर ही विद्यमान रहता है (कोटर के भीतर कोई आवेश नहीं रखे गए हैं)।

चित्र 2.18 में दिए गए परिणामों की व्युत्पत्ति को यहाँ हम छोड़ रहे हैं, परंतु हमें इनकी महत्वपूर्ण उलझनों का ध्यान है। बाहर चाहे कितना भी आवेश तथा कैसा भी विद्युत क्षेत्र विन्यास क्यों न हो, उस चालक में कोई भी कोटर बाह्य विद्युत क्षेत्रों के प्रभाव से सदैव परिरक्षित रहती है; *कोटर के भीतर विद्युत क्षेत्र सदैव ही शून्य होता है।* इसे *स्थिरवैद्युत परिरक्षण* कहते हैं। इस प्रभाव का उपयोग संवेदनशील उपकरणों को बाह्य विद्युत प्रभावों से बचाने में किया जाता है। चित्र 2.19 में किसी चालक के महत्वपूर्ण स्थिरवैद्युत गुणधर्मों का सारांश दिया गया है।



चित्र 2.19 किसी चालक के कुछ महत्वपूर्ण स्थिरवैद्युत गुणधर्म।

उदाहरण 2.7

उदाहरण 2.7

(a) सूखे बालों में कंघा घुमाने के बाद वह कागज़ के टुकड़ों को आकर्षित कर लेता है, क्यों? यदि बाल भीगे हों या वर्षा का दिन हो तो क्या होता है? [ध्यान रहे कि कागज़ विद्युत चालक नहीं है।]

(b) साधारण रबर विद्युतरोधी है। परंतु वायुयान के विशेष रबर के पहिए हलके चालक बनाए जाते हैं। यह क्यों आवश्यक है?

(c) जो वाहन ज्वलनशील पदार्थ ले जाते हैं उनकी धातु की रस्सियाँ (ज़ंजीरें) वाहन के गतिमय होने पर धरती को छूती रहती हैं, क्यों?

(d) एक चिड़िया एक उच्च शक्ति के खुले (अरक्षित) बिजली के तार पर बैठी है, और उसको कुछ नहीं होता। धरती पर खड़ा एक व्यक्ति उसी तार को छूता है और उसे सांघातिक (घातक) धक्का लगता है, क्यों?

हल

(a) इसका कारण यह है कि कंघा घर्षण द्वारा आवेशित होता है। आवेशित कंघे द्वारा कागज़ के अणु ध्रुवित हो जाते हैं, परिणामस्वरूप एक नेट आकर्षी बल प्राप्त होता है। यदि बालों में नमी है अथवा वर्षा का दिन है तो कंघे और बालों के बीच घर्षण कम हो जाता है तथा कंघा आवेशित नहीं होता। अतः वह कागज़ के छोटे टुकड़ों को आकर्षित नहीं करता।

© NCERT not to be republished

उदाहरण 2.7

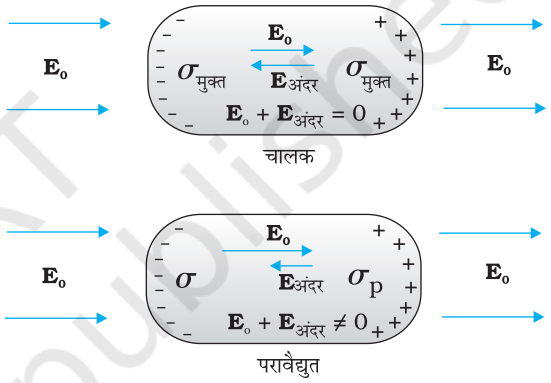
(b) जिससे घर्षण द्वारा उत्पन्न आवेश का भूमि में चालन हो सके। चूँकि स्थिरवैद्युत आवेश अत्यधिक मात्रा में टायरों के पृष्ठ पर संचित होकर चिनगारी (स्पार्क) पैदा करता है जिससे आग लग सकती है।

(c) कारण (b) के समान ही।

(d) विद्युत धारा केवल तब ही प्रवाहित होती है जब विभवांतर होता है।

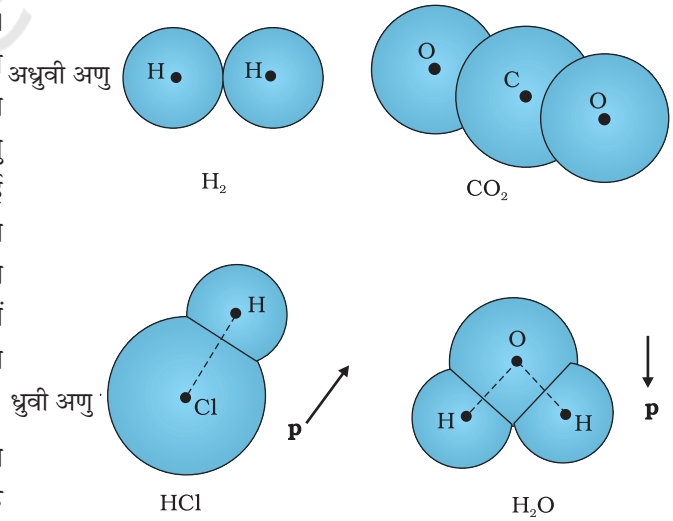
2.10 परावैद्युत तथा ध्रुवण

परावैद्युत अचालक पदार्थ होते हैं। चालकों की तुलना में इनमें कोई आवेश वाहक नहीं (अथवा नगण्य) होता। अनुभाग (2.9) को याद कीजिए, क्या होता है जब किसी चालक को किसी बाह्य विद्युत क्षेत्र में रखा जाता है? चालक में मुक्त आवेश वाहक गति करके अपने को इस प्रकार समायोजित कर लेते हैं कि प्रेरित आवेशों के कारण विद्युत क्षेत्र बाह्य क्षेत्र का विरोध करता है। यह उस समय तक होता रहता है जब तक कि स्थिर स्थिति में दोनों क्षेत्र एक-दूसरे का निरसन कर देते हैं तथा चालक के भीतर नेट स्थिरवैद्युत क्षेत्र शून्य होता है। किसी परावैद्युत में आवेश की यह मुक्त गति संभव नहीं होती। फिर भी यह पाया जाता है कि बाह्य क्षेत्र परावैद्युत के पृष्ठ पर कुछ आवेश प्रेरित कर देता है जो एक ऐसा क्षेत्र उत्पन्न करता है जो बाह्य क्षेत्र का विरोध करता है। परंतु चालक से भिन्न, इस प्रकार का प्रेरित विद्युत क्षेत्र बाह्य क्षेत्र को यथार्थ रूप में निरक्षित नहीं करता। यह केवल क्षेत्र को घटा देता है। इस प्रभाव की सीमा परावैद्युत की प्रकृति पर निर्भर करती है। इस प्रभाव को समझने के लिए हमें किसी परावैद्युत पदार्थ में आण्विक स्तर पर आवेश वितरण के अध्ययन की आवश्यकता होगी।



चित्र 2.20 किसी बाह्य विद्युत क्षेत्र में किसी चालक तथा परावैद्युत के व्यवहार में अंतर।

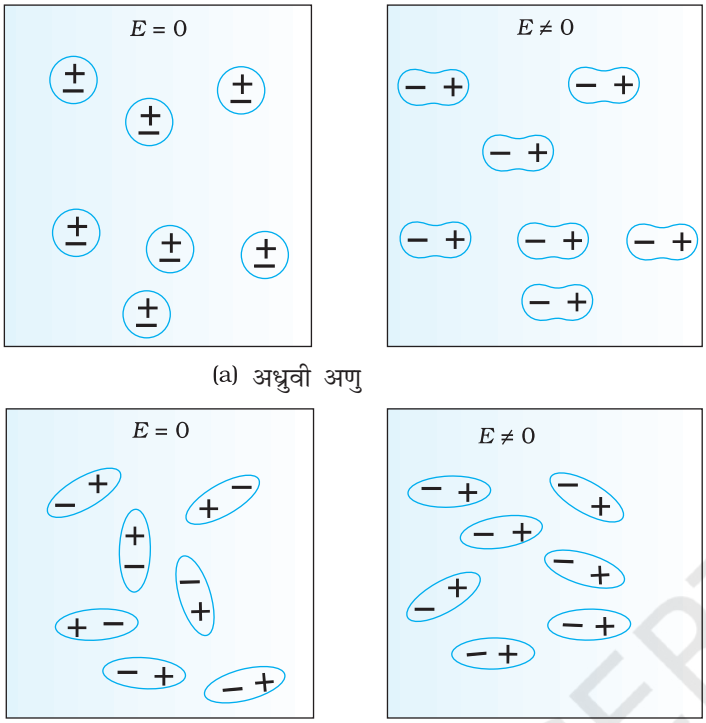
किसी पदार्थ के अणु ध्रुवी अथवा अध्रुवी हो सकते हैं। किसी अध्रुवी अणु में धनावेश तथा ऋणावेश के केंद्र संपाती होते हैं। तब अणु का कोई स्थायी (अथवा आंतरिक) द्विध्रुव आघूर्ण नहीं होता। ऑक्सीजन (O_2) तथा हाइड्रोजन (H_2) अणु अध्रुवी अणुओं के उदाहरण हैं जिनमें सममिति के कारण कोई द्विध्रुव आघूर्ण नहीं होता। इसके विपरीत कोई ध्रुवी अणु वह होता है जिसमें धनावेशों तथा ऋणावेशों के केंद्र पृथक-पृथक (उस स्थिति में भी जब कोई बाह्य क्षेत्र नहीं है) होते हैं। ऐसे अणुओं में स्थायी द्विध्रुव आघूर्ण होता है। HCl जैसा आयनी अणु अथवा जल (H_2O) का कोई अणु ध्रुवी अणुओं के उदाहरण हैं।



चित्र 2.21 ध्रुवी तथा अध्रुवी अणुओं के कुछ उदाहरण।

किसी बाह्य विद्युत क्षेत्र में अध्रुवी अणु के धनावेश तथा ऋणावेश विपरीत दिशाओं में विस्थापित हो जाते हैं। यह विस्थापन तब रुकता है जब अणु के अवयवी आवेशों पर बाह्य बल प्रत्यानयन बल (अणु में आंतरिक क्षेत्रों के कारण) द्वारा संतुलित हो जाता है। अतः अध्रुवी अणु एक प्रेरित द्विध्रुव आघूर्ण विकसित कर लेता है। उस स्थिति में परावैद्युत को बाह्य क्षेत्र द्वारा ध्रुवित कहा जाता है। हम

© NCERT not to be republished



चित्र 2.22 किसी बाह्य विद्युत क्षेत्र में कोई परावैद्युत किस प्रकार एक नेट द्विध्रुव आघूर्ण विकसित करता है। (a) अध्रुवी अणु, (b) ध्रुवी अणु।

केवल उस सरल स्थिति पर ही विचार करेंगे जिसमें प्रेरित द्विध्रुव आघूर्ण क्षेत्र की दिशा में होता है तथा क्षेत्र की तीव्रता के अनुक्रमानुपाती होता है। (पदार्थ जिनके लिए यह अभिधारणा सत्य है उन्हें *रैखिक समदैशिक परावैद्युत* कहते हैं) विभिन्न अणुओं के प्रेरित द्विध्रुव आघूर्ण एक-दूसरे से जुड़कर बाह्य क्षेत्र की उपस्थिति में परावैद्युत का नेट द्विध्रुव आघूर्ण प्रदान करते हैं।

ध्रुवी अणुओं का कोई परावैद्युत किसी बाह्य क्षेत्र में एक नेट द्विध्रुव आघूर्ण भी विकसित कर लेता है, परंतु इसका कारण भिन्न होता है। किसी बाह्य क्षेत्र की अनुपस्थिति में, विभिन्न स्थायी द्विध्रुव तापीय विक्षोभ के कारण यादृच्छिक अभिविन्यासित होते हैं; अतः कुल द्विध्रुव आघूर्ण शून्य होता है। जब कोई बाह्य क्षेत्र अनुप्रयुक्त किया जाता है तो व्यष्टिगत द्विध्रुव आघूर्ण क्षेत्र के साथ संरेखित होने लगते हैं। जब सब अणुओं पर इसका योग किया जाता है, तो बाह्य क्षेत्र की दिशा में एक नेट द्विध्रुव आघूर्ण पाया जाता है, अर्थात, परावैद्युत ध्रुवित हो जाता है। ध्रुवण की सीमा दो परस्पर विरोधी कारकों की आपेक्षिक तीव्रता पर निर्भर करती है, जो इस प्रकार हैं : विद्युत क्षेत्र में द्विध्रुव स्थितिज ऊर्जा जो द्विध्रुव को क्षेत्र के साथ संरेखित करने का प्रयास करती है, तथा तापीय ऊर्जा जो संरेखण को बिगाड़ने का प्रयास करती है। इसके अतिरिक्त अध्रुवी अणुओं की भाँति यहाँ भी प्रेरित द्विध्रुव आघूर्ण प्रभाव हो सकता है, परंतु व्यापक रूप में संरेखण प्रभाव ध्रुवी अणुओं के लिए अधिक महत्वपूर्ण होता है।

इस प्रकार दोनों ही प्रकरणों में, चाहे ध्रुवी हो अथवा अध्रुवी, परावैद्युत किसी बाह्य क्षेत्र की उपस्थिति में एक नेट द्विध्रुव आघूर्ण विकसित कर लेते हैं। किसी पदार्थ का प्रति एकांक आयतन द्विध्रुव आघूर्ण उसका *ध्रुवण* कहलाता है तथा इसे **P** द्वारा निर्दिष्ट किया जाता है। रैखिक समदैशिक परावैद्युतों के लिए

$$\mathbf{P} = E_o \chi_e \mathbf{E} \qquad (2.37)$$

यहाँ χ_e परावैद्युत का स्थिर अभिलक्षण है जिसे परावैद्युत माध्यम की *वैद्युत प्रवृत्ति* (electric susceptibility) कहते हैं।

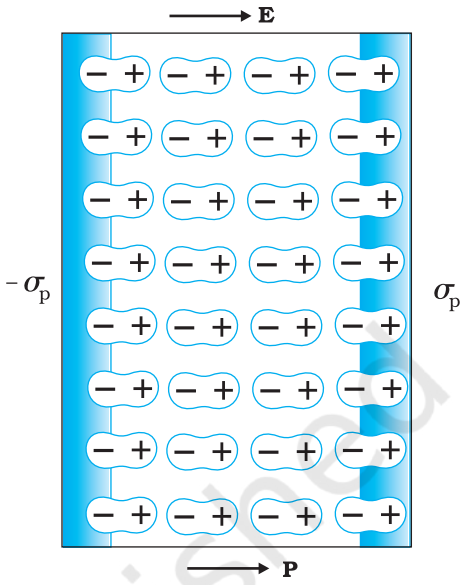
इसको (χ_e को) पदार्थ के आण्विक गुण से संबंधित करना संभव है, परंतु हम यहाँ इस पर चर्चा नहीं करेंगे।

अब प्रश्न यह है कि कोई ध्रुवित परावैद्युत अपने भीतर किसी मूल बाह्य क्षेत्र को रूपांतरित कैसे करता है? सरलता की दृष्टि से हम किसी ऐसे आयताकार परावैद्युत गुटके पर विचार करते हैं जो किसी ऐसे एकसमान बाह्य क्षेत्र $\mathbf{E}_o$ में रखा है, जो गुटके के दो फलकों के समांतर है। क्षेत्र के कारण परावैद्युत में एकसमान ध्रुवण **P** होता है। इस प्रकार गुटके के प्रत्येक आयतन अल्पांश Δv का क्षेत्र की दिशा में एक द्विध्रुव आघूर्ण $\mathbf{P}\,\Delta v$ होता है। स्थूल रूप से आयतन अल्पांश Δv छोटा होता है, परंतु इसमें अत्यधिक संख्या में

© NCERT not to be republished

आण्विक द्विध्रुव होते हैं। परावैद्युत के भीतर किसी भी स्थान पर आयतन अल्पांश Δv पर कोई नेट आवेश नहीं होता (यद्यपि इसका नेट द्विध्रुव आघूर्ण होता है)। इसका कारण यह है कि एक द्विध्रुव के धनावेश अपने से संलग्न द्विध्रुव के ऋणावेश के निकट होते हैं। परंतु, परावैद्युत के पृष्ठ पर विद्युत क्षेत्र के अभिलंबवत स्पष्ट रूप से एक नेट आवेश घनत्व होता है। जैसा कि चित्र 2.23 में दर्शाया गया है, दाएँ पृष्ठ पर द्विध्रुवों के धनात्मक सिरे तथा बाएँ पृष्ठ पर द्विध्रुवों के ऋणात्मक सिरे अनुदासित रह जाते हैं। असंतुलित आवेश बाह्य क्षेत्र के कारण प्रेरित आवेश होते हैं।

अत: ध्रुवित परावैद्युत दो आवेशित पृष्ठों के तुल्य होता है, जिनके प्रेरित पृष्ठीय आवेश घनत्व, σ_p तथा $-\sigma_p$ हैं। स्पष्ट है कि इन पृष्ठीय आवेशों द्वारा उत्पन्न विद्युत क्षेत्र बाह्य क्षेत्र का विरोध करते हैं। इस प्रकार परावैद्युत में कुल क्षेत्र, उस प्रकरण की तुलना में जिसमें कोई परावैद्युत नहीं है, कम हो जाता है। यहाँ ध्यान देने योग्य बात यह है कि, पृष्ठीय आवेश घनत्व $\pm \sigma_p$ परावैद्युत में मुक्त आवेशों के कारण नहीं वरन् परिबद्ध आवेशों से उत्पन्न होता है।



चित्र 2.23 कोई एकसमान ध्रुवित परावैद्युत पृष्ठीय आवेश घनत्व के समान होता है, परंतु किसी आयतनी आवेश घनत्व के नहीं।

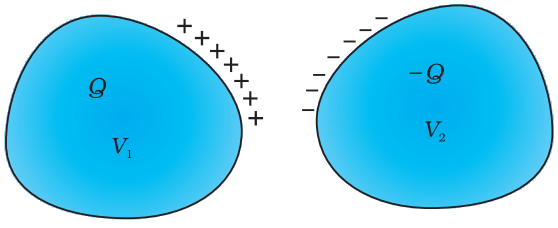
2.11 संधारित्र तथा धारिता

कोई संधारित्र विद्युतरोधी द्वारा पृथक दो चालकों का एक निकाय होता है (चित्र 2.24)। चालकों पर आवेश Q_1 तथा Q_2 तथा उनके विभव क्रमश: V_1 तथा V_2 हैं। प्राय:, व्यवहार में, दो चालकों पर आवेश Q तथा $-Q$ होते हैं तथा उनमें विभवांतर $V = V_1 - V_2$ होता है। हम केवल इसी प्रकार के विन्यास के संधारित्र पर विचार करेंगे। (एक सरल चालक को भी संधारित्र की भाँति प्रयोग किया जा सकता है, यदि दूसरे को अनंत पर माने) दोनों चालकों को किसी बैटरी के दो टर्मिनलों से संयोजित करके आवेशित कराया जा सकता है। Q को संधारित्र का आवेश कहते हैं, यद्यपि, वास्तव में यह संधारित्र के एक चालक पर आवेश होता है–संधारित्र का कुल आवेश शून्य होता है।

चालकों के बीच के क्षेत्र में विद्युत क्षेत्र आवेश Q के अनुक्रमानुपाती होता है। अर्थात, यदि संधारित्र पर आवेश दोगुना कर दिया जाए तो हर बिंदु पर विद्युत क्षेत्र दोगुना हो जाएगा। (यह कूलॉम के नियम तथा अध्यारोपण सिद्धांत द्वारा अंतर्निहित विद्युत क्षेत्र तथा आवेश के बीच अनुक्रमानुपात का अनुगामी है।) अब, विभवांतर V किसी लघु परीक्षण आवेश को क्षेत्र के विरुद्ध चालक 2 से 1 तक ले जाने में प्रति एकांक धनावेश द्वारा किए गए कार्य के बराबर होता है। इसके फलस्वरूप, V भी Q के अनुक्रमानुपाती है, तथा अनुपात Q/V एक नियतांक है –

$$C = \frac{Q}{V} \qquad (2.38)$$

यहाँ C एक नियतांक है जिसे संधारित्र की *धारिता* कहते हैं। जैसा कि पहले वर्णन किया जा चुका है धारिता C आवेश Q अथवा विभवांतर V पर निर्भर नहीं करती। धारिता C केवल दो चालकों के निकाय के ज्यामितीय विन्यास (आकार, आकृति, पृथकन) पर निर्भर करती है। [जैसा कि हम आगे देखेंगे, यह दोनों चालकों को पृथक करने वाले माध्यम अर्थात विद्युतरोधी (परावैद्युत) की प्रकृति पर निर्भर करती है]। धारिता का SI एकांक 1 फैरड = 1 कूलॉम प्रति वोल्ट अथवा $1F = 1\ C\ V^{-1}$ है। नियत धारिता के संधारित्र का प्रतीक ⊣ ⊢, जबकि परिवर्ती धारिता के संधारित्र का प्रतीक ⫞⫟ है।



चित्र 2.24 विद्युतरोधी से पृथक दो चालकों का कोई निकाय संधारित्र का निर्माण करता है।

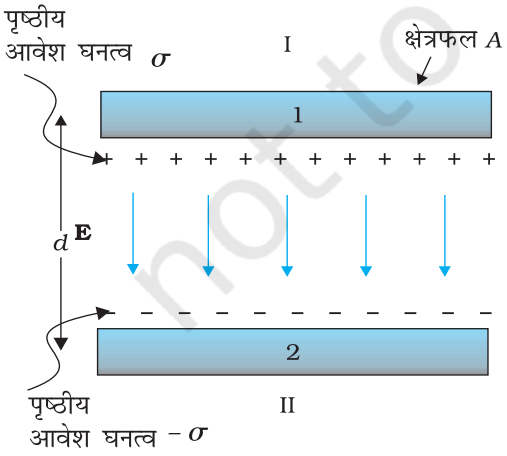
© NCERT not to be republished

समीकरण (2.38) यह दर्शाती है कि बड़े C के लिए यदि Q नियत है तो V लघु होता है। इसका अर्थ यह है कि बड़ा संधारित्र लघु विभव V पर अपेक्षाकृत आवेश Q के बड़े परिमाण को परिबद्ध कर सकता है। इसकी व्यावहारिक उपयोगिता है। उच्च विभवांतर में चालक के चारों ओर प्रबल विद्युत क्षेत्र की उपस्थिति अंतर्निहित है। कोई प्रबल विद्युत क्षेत्र चारों ओर की वायु को आयनीकृत करके उत्पन्न आवेशों को त्वरित कर सकता है जो विजातीय आवेशित पट्टिकाओं पर पहुँचकर उन्हें आंशिक उदासीन कर सकते हैं। दूसरे शब्दों में, संधारित्र का आवेश दोनों पट्टिकाओं के बीच के माध्यम की विद्युतरोधी क्षमता में ह्रास के कारण क्षरित हो सकता है।

वह अधिकतम विद्युत क्षेत्र जिसे कोई परावैद्युत माध्यम बिना भंजन (उसके विद्युतरोधी गुणधर्म) के सहन कर सकता है, उस माध्यम की *परावैद्युत सामर्थ्य* कहलाती है। वायु के लिए यह लगभग $3 \times 10^6\ \text{V m}^{-1}$ है। दो चालकों के बीच 1 cm कोटि के पृथकन के लिए यह क्षेत्र चालकों के बीच 3×10^4 V विभवांतर के तदनुरूपी होता है। अत: किसी संधारित्र के लिए बिना किसी क्षरण के अत्यधिक मात्रा में आवेश को संचित करने के लिए उसकी धारिता को इतना अधिक उच्च अवश्य होना चाहिए कि उनके बीच विभवांतर अथवा विद्युत क्षेत्र उसकी भंजन सीमा से अधिक न हो। इसे भिन्न शब्दों में इस प्रकार भी कह सकते हैं कि किसी दिए गए संधारित्र की बिना किसी सार्थक क्षरण के आवेश को संचित करने की एक सीमा होती है। व्यवहार में, 1 फैरड, धारिता का बहुत बड़ा मात्रक है, धारिता के अधिक सामान्य मात्रक, इस मात्रक (अर्थात फैरड) के अपवर्तक हैं: $1\ \mu\text{F} = 10^{-6}\ \text{F}$, $1\ \text{nF} = 10^{-9}\ \text{F}$, $1\ \text{pF} = 10^{-12}\ \text{F}$ आदि। आवेशों को संचित करने के अतिरिक्त संधारित्र अधिकांश प्रत्यावर्ती धारा परिपथों (ac परिपथों) में प्रमुख अवयवों के रूप में उपयोग होते हैं। अध्याय 7 में ac परिपथों में संधारित्रों के महत्वपूर्ण प्रकार्यों का वर्णन किया गया है।

2.12 समांतर पट्टिका संधारित्र

किसी समांतर पट्टिका संधारित्र में दो बड़ी समतल एक-दूसरे के समांतर चालक पट्टिकाएँ होती हैं, जिनके बीच पृथकन कम होता है (चित्र 2.25)। हम सर्वप्रथम दो पट्टिकाओं के बीच माध्यम के रूप में निर्वात को लेते हैं। अगले अनुभाग में पट्टिकाओं के बीच परावैद्युत माध्यम के प्रभाव का वर्णन किया गया है। मान लीजिए प्रत्येक पट्टिका का क्षेत्रफल A तथा उनके बीच पृथकन d है। दोनों पट्टिकाओं पर आवेश Q तथा $-Q$ है। चूँकि पट्टिकाओं की रैखिक विमाओं की तुलना में d बहुत छोटा है ($d^2 << A$), हम एकसमान आवेशित पृष्ठीय घनत्व σ की अनंत समतल चादर के विद्युत क्षेत्र के परिणाम का उपयोग कर सकते हैं (देखिए अनुभाग 1.15)। पट्टिका 1 का पृष्ठीय आवेश घनत्व $\sigma = \dfrac{Q}{A}$ तथा पट्टिका 2 का पृष्ठीय आवेश घनत्व $-\sigma$ है। विभिन्न क्षेत्रों में समीकरण (1.33) का उपयोग करने पर विद्युत क्षेत्र–



चित्र 2.25 समांतर पट्टिका संधारित्र।

बाह्य क्षेत्र I (पट्टिका 1 के ऊपर का क्षेत्र)

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} - \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} = 0 \qquad (2.39)$$

बाह्य क्षेत्र II (पट्टिका 2 के नीचे का क्षेत्र)

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} - \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} = 0 \qquad (2.40)$$

पट्टिकाओं 1 तथा 2 के भीतरी क्षेत्र में, दो आवेशित पट्टिकाओं के कारण विद्युत क्षेत्र जुड़ जाते हैं और हमें प्राप्त होता है–

© NCERT not to be republished

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} + \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{Q}{\varepsilon_0 A} \quad (2.41)$$

विद्युत क्षेत्र की दिशा धनावेशित पट्टिका से ऋणावेशित पट्टिका की ओर है।

इस प्रकार, दो पट्टिकाओं के बीच विद्युत क्षेत्र स्थानीकृत हो जाता है तथा यह एक सिरे से दूसरे सिरे तक एकसमान होता है। परिमित क्षेत्रफल की पट्टिकाओं के लिए पट्टिकाओं की बाहरी सीमा के निकट यह लागू नहीं होता। पट्टिकाओं के किनारों पर क्षेत्र रेखाएँ बाहर की ओर मुड़ जाती हैं–इस प्रभाव को 'क्षेत्र का उपांत प्रभाव' कहते हैं। इससे यह संकेत मिलता है कि समस्त पट्टिका पर पृष्ठीय आवेश घनत्व σ यथार्थ रूप से एकसमान नहीं होता [E तथा σ समीकरण (2.35) द्वारा संबंधित हैं]। तथापि, $d^2 << A$ के लिए ये प्रभाव किनारों से काफी दूर के क्षेत्रों के लिए उपेक्षणीय हैं; तथा वहाँ क्षेत्र समीकरण (2.41) के अनुसार होता है। अब एकसमान विद्युत क्षेत्रों के लिए विभवांतर, विद्युत क्षेत्र तथा पट्टिकाओं के बीच की दूरी के गुणनफल के बराबर होता है। अर्थात

$$V = Ed = \frac{1}{\varepsilon_0}\frac{Qd}{A} \quad (2.42)$$

तब समांतर पट्टिका संधारित्र C की धारिता

$$C = \frac{Q}{V} = = \frac{\varepsilon_0 A}{d} \quad (2.43)$$

जो कि, अपेक्षानुसार, निकाय की ज्यामिति पर निर्भर करता है। प्रारूपी मानों, जैसे $A = 1\ m^2$, $d = 1\ mm$ के लिए

$$C = \frac{8.85\times10^{-12}\,C^2N^{-1}m^{-2}\times1\,m^2}{10^{-3}\,m} = 8.85\times10^{-9}\,F \quad (2.44)$$

[आप यह जाँच कर सकते हैं कि $1\ F = 1\ C\ V^{-1} = 1\ C\ \ (N\,C^{-1}m)^{-1} = 1C^2N^{-1}m^{-1}$]। इससे प्रकट होता है कि जैसा पहले वर्णन किया जा चुका है कि 1 F व्यवहार में धारिता का एक बहुत बड़ा एकांक है। 1 F की 'विशालता' को देखने का एक ढंग और भी है कि हम यह ज्ञात करें कि 1F धारिता के समांतर पट्टिका संधारित्र की पट्टिकाओं का क्षेत्रफल, यदि उनके बीच दूरी 1 cm है, कितना होना चाहिए। अब चूँकि

$$A = \frac{Cd}{\varepsilon_0} = \frac{1F\times10^{-2}\,m}{8.85\times10^{-12}\,C^2N^{-1}m^{-2}} = 10^9\,m^2 \quad (2.45)$$

अर्थात पट्टिका की लंबाई व चौड़ाई लगभग 30 km होनी चाहिए!

2.13 धारिता पर परावैद्युत का प्रभाव

किसी बाह्य क्षेत्र में परावैद्युतों के व्यवहार के बारे में जानकारी के पश्चात आइए अब हम यह देखें कि किसी समांतर पट्टिका संधारित्र की धारिता किसी परावैद्युत की उपस्थिति द्वारा किस प्रकार रूपांतरित होती है। पहले की ही भाँति यहाँ भी हमारे पास दो बड़ी पट्टिकाएँ, जिनमें प्रत्येक का क्षेत्रफल A है, एक-दूसरे से d दूरी द्वारा पृथक हैं। पट्टिकाओं पर आवेश $\pm Q$ है, जो कि आवेश घनत्व $\pm\sigma$ (जहाँ $\sigma = Q/A$) के तदनुरूपी है। जब दोनों पट्टिकाओं के बीच निर्वात है, तब

$$E_0 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

तथा विभवांतर V_0 है,

भौतिकी
धारिता, कार्यरत संधारित्र को प्रभावित करने वाले कारक
प्रभावी जावा शिक्षकीय सामग्री
http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/capacitance/
© NCERT not to be republished

$V_0 = E_0 d$

इस प्रकरण में धारिता C_o है,

$$C_0 = \frac{Q}{V_0} = \varepsilon_0 \frac{A}{d} \tag{2.46}$$

इसके पश्चात हम उस प्रकरण पर विचार करते हैं जिसमें दोनों पट्टिकाओं के बीच के समस्त क्षेत्र को किसी परावैद्युत द्वारा भर दिया गया है। क्षेत्र द्वारा समस्त परावैद्युत ध्रुवित हो जाता है, तथा जैसा कि ऊपर स्पष्ट किया जा चुका है, यह प्रभाव दो आवेशित चादरों (परावैद्युत के पृष्ठों पर क्षेत्र के अभिलंबवत) के समतुल्य है जिनके पृष्ठीय आवेश घनत्व σ_p तथा $-\sigma_p$ हैं। इस स्थिति में परावैद्युत में विद्युत क्षेत्र उस प्रकरण के तदनुरूपी होता है जिसमें पट्टिकाओं पर नेट आवेश घनत्व $\pm (\sigma - \sigma_p)$ होता है। अर्थात

$$E = \frac{\sigma - \sigma_P}{\varepsilon_0} \tag{2.47}$$

अत: पट्टिकाओं के सिरों पर विभवांतर

$$V = Ed = \frac{\sigma - \sigma_P}{\varepsilon_0} d \tag{2.48}$$

रैखिक परावैद्युतों के लिए, हम अपेक्षा करते हैं कि σ_p, E_0 अर्थात σ के अनुक्रमानुपाती हो। इस प्रकार $(\sigma - \sigma_p)$, σ के अनुक्रमानुपाती है तथा हम लिख सकते हैं कि–

$$\sigma - \sigma_P = \frac{\sigma}{K} \tag{2.49}$$

यहाँ K परावैद्युत का एक स्थिर अभिलक्षण है। स्पष्ट है कि $K > 1$, तब

$$V = \frac{\sigma d}{\varepsilon_0 K} = \frac{Qd}{A\varepsilon_0 K} \tag{2.50}$$

पट्टिकाओं के बीच परावैद्युत होने पर, धारिता C

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\varepsilon_0 KA}{d} \tag{2.51}$$

गुणनफल $\varepsilon_0 K$ को माध्यम का *परावैद्युतांक* कहते हैं तथा इसे ε के द्वारा निर्दिष्ट किया जाता है।

$$\varepsilon = \varepsilon_0 K \tag{2.52}$$

निर्वात के लिए $K = 1$, तथा $\varepsilon = \varepsilon_0$; ε_0 को निर्वात का *परावैद्युतांक* कहते हैं। विमाहीन अनुपात

$$K = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \tag{2.53}$$

को पदार्थ का *परावैद्युतांक* कहते हैं। जैसी कि पहले टिप्पणी की जा चुकी है, समीकरण (2.49) से, यह स्पष्ट है कि $K > 1$ अर्थात K का मान 1 से अधिक है। समीकरणों (2.46) तथा (2.51) से

$$K = \frac{C}{C_0} \tag{2.54}$$

इस प्रकार किसी पदार्थ का परावैद्युतांक एक कारक (> 1) है जिसके द्वारा जब किसी संधारित्र की पट्टिकाओं के बीच कोई परावैद्युत पदार्थ पूर्णत: भर दिया जाता है, तो उसके धारिता के मान में निर्वात के मान से वृद्धि हो जाती है। यद्यपि हम समांतर पट्टिका संधारित्र के प्रकरण के लिए समीकरण (2.54) पर पहुँचे हैं, तथापि यह हर प्रकार के संधारित्रों पर लागू

© NCERT not to be republished

होता है तथा वास्तव में इसे व्यापक रूप में किसी पदार्थ के परावैद्युतांक की परिभाषा के रूप में देखा जा सकता है।

वैद्युत विस्थापन

हमने परावैद्युतांक की धारणा से आपको परिचित कराया तथा प्रेरित आवेश घनत्व σ_p तथा ध्रुवण **P** में बिना कोई सुस्पष्ट संबंध बताए ही समीकरण (2.54) पर पहुँच गए।

हम बिना व्युत्पत्ति के परिणाम को लेते हैं जो इस प्रकार है

$$\sigma_p = \mathbf{P}.\hat{\mathbf{n}}$$

यहाँ $\hat{\mathbf{n}}$ पृष्ठ के बहिर्मुखी अभिलंबवत का एकांक सदिश है। ऊपर दिया गया समीकरण व्यापक है, यह सभी आकृतियों के परावैद्युतों पर लागू होती है। चित्र 2.23 में गुटके के लिए **P** दाहिने पृष्ठ पर $\hat{\mathbf{n}}$ के अनुदिश है तथा बाएँ पृष्ठ पर $\hat{\mathbf{n}}$ के विपरीत है। इस प्रकार दाहिने पृष्ठ पर प्रेरित आवेश घनत्व धनात्मक तथा बाएँ पृष्ठ पर यह ऋणात्मक है, जैसा कि हम पहले की गुणात्मक चर्चा में अनुमान लगा चुके हैं। विद्युत क्षेत्र के लिए सदिश रूप में समीकरण लिखने पर

$$\mathbf{E}.\hat{\mathbf{n}} = \frac{\sigma - \mathbf{P}.\hat{\mathbf{n}}}{\varepsilon_0}$$

अथवा $(\varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}) \cdot \hat{\mathbf{n}} = \sigma$

राशि $\varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$ को *वैद्युत विस्थापन* कहते हैं तथा इसे **D** द्वारा निर्दिष्ट करते हैं। **D** एक सदिश राशि है। इस प्रकार

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}, \mathbf{D} \cdot \hat{\mathbf{n}} = \sigma,$$

D की सार्थकता यह है कि निर्वात में **E** मुक्त आवेश घनत्व σ से संबंधित है। जब कोई परावैद्युत माध्यम विद्यमान होता है, तो तदनुरूपी भूमिका **D** द्वारा ग्रहण कर ली जाती है। किसी परावैद्युत माध्यम के लिए मुक्त आवेश घनत्व σ से **D** का प्रत्यक्ष संबंध है, **E** से नहीं। चूँकि **P** तथा **E** की दिशाएँ समान हैं, सभी तीनों सदिश **P, E** तथा **D** एक-दूसरे के समांतर हैं।

D तथा **E** के परिमाणों का अनुपात

$$\frac{D}{E} = \frac{\sigma\varepsilon_0}{\sigma - \sigma_P} = \varepsilon_0 K$$

इस प्रकार,

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 K \mathbf{E}$$

तथा, $\mathbf{P} = \mathbf{D} - \varepsilon_0 \mathbf{E} = \varepsilon_0 (K-1)\mathbf{E}$

यह समीकरण (2.37) में परिभाषित वैद्युत प्रवृत्ति χ_e के लिए देती है

$\chi_e = (K-1)$

उदाहरण 2.8 K परावैद्युतांक के पदार्थ के किसी गुटके का क्षेत्रफल समांतर पट्टिका संधारित्र की पट्टिकाओं के क्षेत्रफल के समान है परंतु गुटके की मोटाई $(3/4)d$ है, यहाँ d पट्टिकाओं के बीच पृथकन है। पट्टिकाओं के बीच गुटके को रखने पर संधारित्र की धारिता में क्या परिवर्तन हो जाएगा?

हल मान लीजिए जब पट्टिकाओं के बीच कोई परावैद्युत नहीं है तो पट्टिकाओं के बीच विद्युत क्षेत्र $E_0 = V_0/d$ है तथा विभवांतर V_0 है। यदि अब कोई परावैद्युत पदार्थ रख दिया जाता है तो परावैद्युत में विद्युत क्षेत्र $E = E_0 / K$ होगा। तब विभवांतर होगा

उदाहरण 2.8

© NCERT not to be republished

उदाहरण 2.8

$$V = E_0(\frac{1}{4}d) + \frac{E_0}{K}(\frac{3}{4}d)$$

$$= E_0 d(\frac{1}{4} + \frac{3}{4K}) = V_0 \frac{K+3}{4K}$$

विभवांतर $(K+3)/4K$ के गुणज द्वारा कम हो जाता है जबकि पट्टिकाओं पर आवेश Q_0 अपरिवर्तित रहता है। इस प्रकार संधारित्र की धारिता में वृद्धि हो जाती है

$$C = \frac{Q_0}{V} = \frac{4K}{K+3}\frac{Q_0}{V_0} = \frac{4K}{K+3}C_0$$

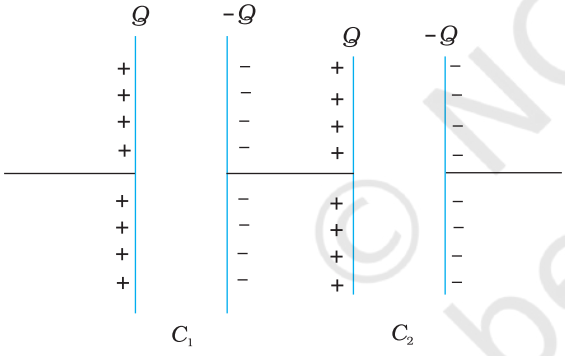
2.14 संधारित्रों का संयोजन

हम कई संधारित्रों जिनकी धारिताएँ $C_1, C_2, \ldots, C_n$ हैं, के संयोजन द्वारा एक प्रभावी धारिता C का निकाय प्राप्त कर सकते हैं। यह प्रभावी धारिता व्यष्टिगत संधारित्रों को संयोजित करने के ढंग पर निर्भर करती है। दो संभावित सरल संयोजन इस प्रकार हैं :

2.14.1 संधारित्रों का श्रेणीक्रम संयोजन

चित्र 2.26 में दो संधारित्र C_1 तथा C_2 श्रेणीक्रम में संयोजित दर्शाए गए हैं।

C_1 की बाईं तथा C_2 की दाईं पट्टिका बैटरी के दो टर्मिनलों से संयोजित हैं तथा उन पर क्रमशः Q तथा $-Q$ आवेश है। इसका अर्थ यह है कि C_1 की दाईं पट्टिका पर $-Q$ तथा C_2 की बाईं पट्टिका पर आवेश $+Q$ है। यदि ऐसा नहीं है, तो संधारित्र की दोनों पट्टिकाओं पर नेट आवेश शून्य नहीं होगा। इसके परिणामस्वरूप C_1 तथा C_2 को संयोजित करने वाले चालक में कोई विद्युत क्षेत्र होगा तथा C_1 एवं C_2 में आवेश उस समय तक प्रवाहित होता रहेगा, जब तक कि प्रत्येक संधारित्र C_1 तथा C_2 पर नेट आवेश शून्य नहीं हो जाता तथा C_1 एवं C_2 को संयोजित करने वाले चालक में विद्युत क्षेत्र शून्य नहीं होता। अतः श्रेणीक्रम संयोजन में प्रत्येक संधारित्र की दोनों पट्टिकाओं पर आवेश $(\pm Q)$ समान होता है। संयोजन के सिरों पर विभवपात V संधारित्रों C_1 तथा C_2 के सिरों पर क्रमशः विभवपातों V_1 तथा V_2 का योग होता है–



चित्र 2.26 दो संधारित्रों का श्रेणीक्रम संयोजन।

$$V = V_1 + V_2 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} \qquad (2.55)$$

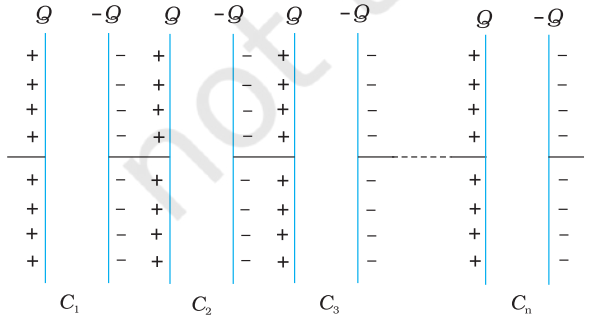
अर्थात, $$\frac{V}{Q} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}, \qquad (2.56)$$

हम इस संयोजन को एक ऐसा प्रभावी संधारित्र मान सकते हैं जिस पर आवेश Q तथा जिसके सिरों के बीच विभवांतर V हो। तब संयोजन की *प्रभावी धारिता*–

$$C = \frac{Q}{V} \qquad (2.57)$$

समीकरण (2.57) की समीकरण (2.56) से तुलना करने पर हमें निम्नलिखित संबंध प्राप्त होता है–

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \qquad (2.58)$$



चित्र 2.27 n संधारित्रों का श्रेणीक्रम संयोजन।

स्पष्ट है कि इस व्युत्पत्ति को हम कितने भी संधारित्र लेकर, उन्हें इसी प्रकार संयोजित करके n संधारित्रों के लिए समीकरण (2.55) का व्यापकीकरण कर सकते हैं–

© NCERT not to be republished

$$V = V_1 + V_2 + \ldots + V_n = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \ldots + \frac{Q}{C_n} \quad (2.59)$$

जिन चरणों का हमने दो संधारित्रों के प्रकरण में उपयोग किया था, उन्हीं चरणों का उपयोग n संधारित्रों के संयोजन के लिए करके, हम n संधारित्रों के श्रेणीक्रम संयोजन के लिए प्रभावी धारिता का व्यापक सूत्र प्राप्त कर सकते हैं :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots + \frac{1}{C_n} \quad (2.60)$$

2.14.2 संधारित्रों का पार्श्वक्रम संयोजन

चित्र 2.28(a) में दो संधारित्र पार्श्वक्रम में संयोजित दर्शाए गए हैं। इस प्रकरण में दोनों संधारित्रों पर समान विभवांतर अनुप्रयुक्त किया गया है। परंतु संधारित्र 1 की पट्टिकाओं पर आवेश ($\pm Q_1$) का परिमाण संधारित्र 2 की पट्टिकाओं पर आवेश ($\pm Q_2$) के समान होना आवश्यक नहीं है :

$$Q_1 = C_1 V,\ Q_2 = C_2 V \quad (2.61)$$

यदि इस संयोजन के तुल्य किसी संधारित्र पर आवेश

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (2.62)$$

तथा विभवांतर V है :

$$Q = CV = C_1 V + C_2 V \quad (2.63)$$

तो समीकरण (2.63) से प्रभावी धारिता C

$$C = C_1 + C_2 \quad (2.64)$$

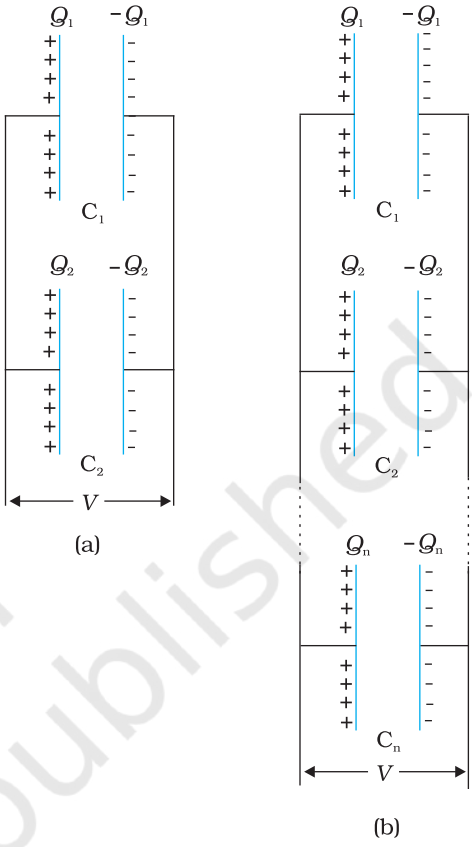
n संधारित्रों के पार्श्वक्रम संयोजन के लिए प्रभावी धारिता C के लिए व्यापक सूत्र, इसी प्रकार प्राप्त किया जा सकता है [चित्र 2.28(b)] :

$$Q = Q_1 + Q_2 + \ldots + Q_n \quad (2.65)$$

अर्थात, $$CV = C_1 V + C_2 V + \ldots C_n V \quad (2.66)$$

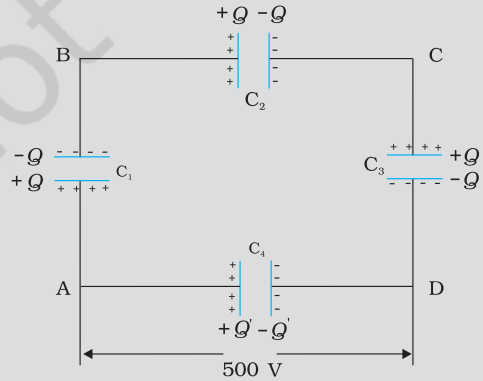
इससे प्राप्त होता है

$$C = C_1 + C_2 + \ldots C_n \quad (2.67)$$



चित्र 2.28 (a) दो संधारित्रों, (b) n संधारित्रों का पार्श्वक्रम संयोजन।

उदाहरण 2.9 चित्र 2.29 में दर्शाए अनुसार 10 μF के चार संधारित्रों के किसी नेटवर्क को 500 V के स्रोत से संयोजित किया गया है। (a) नेटवर्क की तुल्य धारिता, तथा (b) प्रत्येक संधारित्र पर आवेश ज्ञात कीजिए। (नोट: किसी *संधारित्र पर आवेश* उसकी उच्च विभव की पट्टिका पर आवेश के बराबर होता है तथा वह आवेश निम्न विभव की पट्टिका पर आवेश के परिमाण में समान, परंतु विजातीय होता है)।



चित्र 2.29

उदाहरण 2.9

© NCERT not to be republished

उदाहरण 2.9

हल

(a) दिए गए नेटवर्क में तीन संधारित्र C_1, C_2 तथा C_3 श्रेणीक्रम में संयोजित हैं। इन तीनों संधारित्रों की प्रभावी धारिता C' इस प्रकार व्यक्त की जाती है :

$$\frac{1}{C'} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

$C_1 = C_2 = C_3 = 10\ \mu F$, $C' = (10/3)\ \mu F$

नेटवर्क में C_4 को C' के पार्श्वक्रम में संयोजित किया गया है। अत:, समस्त नेटवर्क की तुल्य धारिता

$$C = C' + C_4 = \left(\frac{10}{3} + 10\right)\ \mu F = 13.3 \mu F$$

(b) चित्र से स्पष्ट है कि C_1, C_2 तथा C_3 प्रत्येक पर आवेश समान है, मान लीजिए यह आवेश Q है। मान लीजिए C_4 पर आवेश Q' है। अब चूँकि AB के सिरों के बीच विभवांतर Q/C_1, BC के सिरों पर Q/C_2 तथा CD के सिरों पर Q/C_3 है, अत:

$$\frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} = 500\ V$$

तथा $Q'/C_4 = 500\ V$

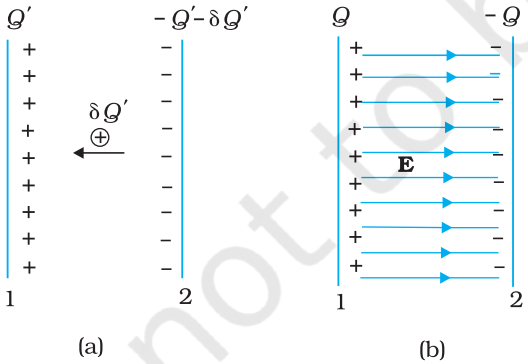
इससे हमें संधारित्रों की विभिन्न धारिताओं के दिए गए मानों के लिए

$$Q = 500\,V \times \frac{10}{3}\mu F = 1.7 \times 10^{-3} C \text{ तथा}$$

$$Q' = 500\,V \times 10\,\mu F = 5.0 \times 10^{-3}\ C$$

2.15 संधारित्र में संचित ऊर्जा

जैसा कि हमने ऊपर चर्चा में अध्ययन किया, संधारित्र दो चालकों का एक ऐसा निकाय होता है जिस पर आवेश Q तथा $-Q$ होते हैं तथा जिनमें कुछ पृथकन होता है। इस विन्यास में संचित ऊर्जा ज्ञात करने के लिए आरंभ में दो अनावेशित चालकों 1 तथा 2 पर विचार कीजिए। अब चालक 2 से चालक 1 पर आवेश को छोटे-छोटे टुकड़ों में स्थानांतरित करने की किसी प्रक्रिया की कल्पना कीजिए, ताकि अंत में चालक 1 पर Q आवेश आ जाए। आवेश संरक्षण नियम के अनुसार अंत में चालक 2 पर $-Q$ आवेश होता है (चित्र 2.30)।



चित्र 2.30 (a) चालक 1 पर Q' से $Q' + \delta Q'$ तक लघु चरणों में आवेश निर्मित करने में किया गया कार्य। (b) संधारित्र को आवेशित करने में किया गया कुल कार्य का अवलोकन दोनों पट्टिकाओं के बीच विद्युत क्षेत्र में संचित ऊर्जा के रूप में किया जा सकता है।

आवेश को 2 से 1 पर स्थानांतरित करने में बाह्य कार्य करना होता है, चूँकि हर चरण में चालक 2 की तुलना में चालक 1 अधिक विभव पर होता है। किए गए कुल कार्य का परिकलन करने के लिए पहले हम छोटे-छोटे चरणों में आवेश की अत्यल्प (अर्थात लोप बिंदु तक छोटी) मात्रा को स्थानांतरित करने में किया गया कार्य परिकलित करते हैं। उस माध्य स्थिति पर विचार कीजिए जिसमें चालकों 1 तथा 2 पर क्रमश: आवेश Q' तथा $-Q'$ हैं। इस स्थिति में, चालकों 1 तथा 2 के बीच विभवांतर $V' = Q'/C$ होता है, यहाँ C निकाय की धारिता है। अब यह कल्पना कीजिए कि लघु आवेश $\delta Q'$ चालक 2 से 1 में स्थानांतरित किया जाता है। इस चरण में किया गया कार्य (δw), जिसके परिणामस्वरूप चालक 1 पर आवेश Q' से बढ़कर $Q' + \delta Q'$ हो जाता है, इस प्रकार व्यक्त किया जाता है :

$$\delta W = V' \delta Q' = \frac{Q'}{C}\delta Q' \qquad (2.68)$$

© NCERT not to be republished

चूँकि $\delta Q'$ को हम जितना चाहें छोटा बना सकते हैं, समीकरण (2.68) को हम इस प्रकार भी लिख सकते हैं

$$\delta W = \frac{1}{2C}[(Q' + \delta Q')^2 - Q'^2] \tag{2.69}$$

समीकरण (2.69) में $\delta Q'$ की द्वितीय कोटि के पद अर्थात $\delta Q'^2/2C$ की $\delta Q'$ के यादृच्छिक छोटे होने के कारण नगण्य मानकर उपेक्षा की जा सकती है। अतः समीकरण (2.68) तथा (2.69) सर्वसम हैं। कुल किया गया कार्य (W), आवेश Q' को शून्य से Q तक बढ़ाने में अत्यधिक चरणों में किए गए लघु कार्यों (δW) का योग होता है–

$$W = \sum_{\text{सभी चरणों का योग}} \delta W$$

$$= \sum_{\text{सभी चरणों का योग}} \frac{1}{2C}[(Q' + \delta Q')^2 - Q'^2] \tag{2.70}$$

$$= \frac{1}{2C}[\{\delta Q'^2 - 0\} + \{(2\delta Q')^2 - \delta Q'^2\} + \{(3\delta Q')^2 - (2\delta Q')^2\} + \ldots$$
$$+ \{Q^2 - (Q - \delta Q')^2\}] \tag{2.71}$$

$$= \frac{1}{2C}[Q^2 - 0] = \frac{Q^2}{2C} \tag{2.72}$$

यही परिणाम सीधे ही, समीकरण (2.68) से समाकलन द्वारा प्राप्त किया जा सकता है:

$$W = \int_0^Q \frac{Q'}{C}\delta Q' = \frac{1}{C}\frac{Q'^2}{2}\Big|_0^Q = \frac{Q^2}{2C}$$

इसमें आश्चर्य की कोई बात नहीं है क्योंकि समाकलन बहुत से छोटे पदों का योग ही होता है। अंतिम परिणाम, समीकरण (2.72), को हम भिन्न-भिन्न प्रकार से व्यक्त कर सकते हैं :

$$W = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}QV \tag{2.73}$$

चूँकि स्थिरवैद्युत बल संरक्षी बल है, यह कार्य निकाय में स्थितिज ऊर्जा के रूप में संचित हो जाता है। यही कारण है कि स्थितिज ऊर्जा का अंतिम परिणाम, समीकरण (2.73), जिस ढंग से संधारित्र का आवेश विन्यास निर्मित किया गया है, उस ढंग पर निर्भर नहीं करता। जब कोई संधारित्र निरावेशित होता है तो उसमें संचित ऊर्जा मुक्त हो जाती है। संधारित्र की पट्टिकाओं के बीच विद्युत क्षेत्र में 'संचित' हुई स्थितिज ऊर्जा के रूप में समझना संभव है। इसे देखने के लिए, सरलता की दृष्टि से, किसी समांतर पट्टिका (प्रत्येक का क्षेत्रफल A) संधारित्र जिसकी पट्टिकाओं के बीच पृथकन d है, पर विचार कीजिए।

संधारित्र में संचित ऊर्जा

$$= \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C} = \frac{(A\sigma)^2}{2} \times \frac{d}{\varepsilon_0 A} \tag{2.74}$$

पृष्ठीय आवेश घनत्व σ पट्टिकाओं के बीच विद्युत क्षेत्र E से संबंधित है–

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \tag{2.75}$$

समीकरणों (2.74) तथा (2.75) से प्राप्त होता है–

संधारित्र में संचित ऊर्जा

$$U = (1/2)\varepsilon_0 E^2 \times A d \tag{2.76}$$

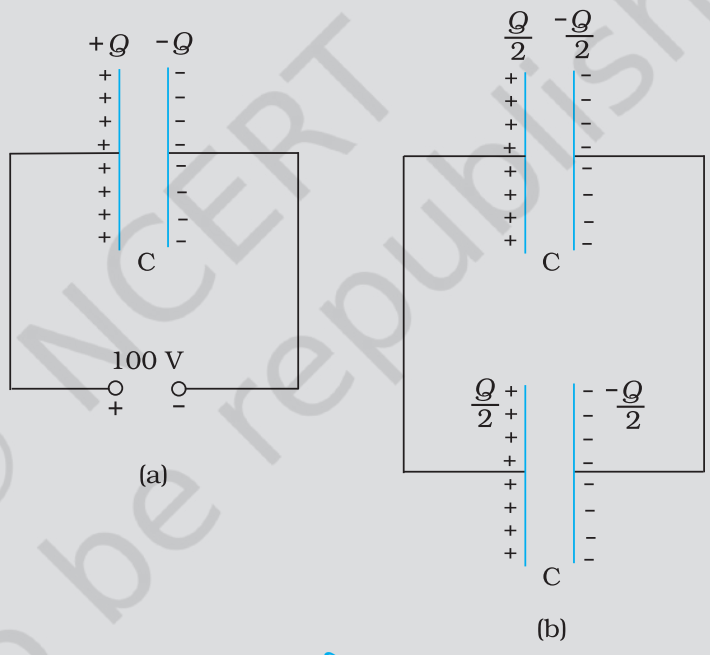
© NCERT not to be republished

ध्यान दीजिए, Ad दोनों पट्टिकाओं के बीच के क्षेत्र का आयतन है (इसी क्षेत्र में केवल विद्युत क्षेत्र होता है)। यदि हम *ऊर्जा घनत्व* को दिक्स्थान के प्रति एकांक आयतन में संचित ऊर्जा के रूप में परिभाषित करें तो, समीकरण (2.76) के अनुसार

विद्युत क्षेत्र का ऊर्जा घनत्व $u = (1/2)\varepsilon_0 E^2$ (2.77)

यद्यपि हमने समीकरण (2.77) समांतर पट्टिका संधारित्र के प्रकरण में व्युत्पन्न की है, किसी विद्युत क्षेत्र का ऊर्जा घनत्व से संबंधित परिणाम वास्तव में, अत्यंत व्यापक है तथा यह किसी भी आवेश विन्यास के कारण विद्युत क्षेत्र पर लागू होता है।

उदाहरण 2.10 (a) 900 pF के किसी संधारित्र को 100 V बैटरी से आवेशित किया गया [चित्र 2.31(a)]। संधारित्र में संचित कुल स्थिरवैद्युत ऊर्जा कितनी है? (b) इस संधारित्र को बैटरी से वियोजित करके किसी अन्य 900 pF के संधारित्र से संयोजित किया गया। निकाय द्वारा संचित स्थिरवैद्युत ऊर्जा कितनी है?



चित्र 2.31

हल

(a) संधारित्र पर आवेश

$Q = CV = 900 \times 10^{-12}\ \text{F} \times 100\ \text{V} = 9 \times 10^{-8}\ \text{C}$

संधारित्र द्वारा संचित ऊर्जा

$= (1/2)\ CV^2 = (1/2)\ QV$

$= (1/2) \times 9 \times 10^{-8}\text{C} \times 100\ \text{V} = 4.5 \times 10^{-6}\ \text{J}$

(b) स्थायी स्थिति में, दोनों संधारित्रों की धनात्मक पट्टिकाएँ समान विभव पर हैं, तथा उनकी ऋणात्मक पट्टिकाएँ उसी समान विभव पर हैं। मान लीजिए उभयनिष्ठ विभवांतर V' है। तब, प्रत्येक संधारित्र पर आवेश $Q' = CV'$। आवेश संरक्षण द्वारा, $Q' = Q/2$, इसमें यह अंतर्निहित है कि, $V' = \text{V}/2$। तब निकाय की कुल ऊर्जा

$$= 2 \times \frac{1}{2} Q'V' = \frac{1}{4} QV = 2.25 \times 10^{-6}\ \text{J}$$

उदाहरण 2.10

© NCERT not to be republished

उदाहरण 2.10

अत: (a) से (b) में जाने पर यद्यपि आवेश की कोई हानि नहीं होती, तथापि अंतिम ऊर्जा आरंभिक ऊर्जा की केवल आधी होती है। *तब शेष ऊर्जा कहाँ चली जाती है?* निकाय को स्थिति (b) तक व्यवस्थित होने में कुछ समय लगता है। इस अवधि में पहले संधारित्र से दूसरे संधारित्र में एक अस्थायी विद्युत धारा प्रवाहित होती है। इस अवधि में ऊष्मा तथा विद्युत चुंबकीय विकिरणों के रूप में कुछ ऊर्जा-क्षय हो जाती है।

सारांश

1. स्थिरवैद्युत बल एक संरक्षी बल है। किसी बाह्य बल (स्थिरवैद्युत बल के समान एवं विपरीत) द्वारा आवेश q को बिंदु R से बिंदु P तक लाने में किया गया कार्य $q(V_P - V_R)$ होता है, जो कि अंतिम बिंदु तथा प्रारंभिक बिंदु के बीच आवेश की स्थितिज ऊर्जाओं का अंतर होता है।

2. किसी बिंदु पर विभव (किसी बाह्य एजेंसी) प्रति एकांक धनावेश पर किया गया वह कार्य होता है जो उस आवेश को अनंत से उस बिंदु तक लाने में किया जाता है। किसी बिंदु पर विभव किसी योज्यता स्थिरांक के अंतर्गत यादृच्छिक होता है, चूँकि जो राशि भौतिक रूप से महत्वपूर्ण है वह दो बिंदुओं के बीच विभवांतर है। यदि अनंत पर किसी आवेश के कारण विभव को शून्य चुनें (अथवा मानें) तो मूल बिंदु पर रखे किसी आवेश Q के कारण स्थिति सदिश $\mathbf{r}$ वाले बिंदु पर वैद्युत विभव

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{Q}{r}$$

3. मूल बिंदु पर स्थित $\mathbf{p}$ द्विध्रुव आघूर्ण के बिंदु द्विध्रुव के कारण स्थिति सदिश $\mathbf{r}$ के किसी बिंदु पर स्थिरवैद्युत विभव

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{\mathbf{p}\cdot\hat{\mathbf{r}}}{r^2}$$

यह परिणाम किसी द्विध्रुव (जिस पर आवेश $-q$ तथा q एक-दूसरे से $2a$ दूरी पर हों) के लिए $r >> a$ शर्त के साथ लागू होता है।

4. स्थिति सदिश $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \ldots, \mathbf{r}_n$ के आवेशों $q_1, q_2, \ldots, q_n$ के आवेश विन्यास का अध्यारोपण सिद्धांत द्वारा किसी बिंदु P पर विभव

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\left(\frac{q_1}{r_{1P}} + \frac{q_2}{r_{2P}} + \ldots + \frac{q_n}{r_{nP}}\right)$$

यहाँ पर r_{1P} आवेश q_1 तथा P के बीच, r_{2P} आवेश q_2 तथा P के बीच की दूरी है, तथा अन्य दूरियाँ इसी प्रकार हैं।

5. समविभव पृष्ठ एक ऐसा पृष्ठ होता है जिसके सभी बिंदुओं पर विभव का समान मान होता है। किसी बिंदु आवेश के लिए, उस आवेश को केंद्र मानकर खींचे गए संकेंद्री गोले समविभव पृष्ठ होते हैं। समविभव पृष्ठ के किसी बिंदु पर विद्युत क्षेत्र $\mathbf{E}$ उस बिंदु से गुज़रने वाले अभिलंब के अनुदिश होता है। $\mathbf{E}$ की दिशा वही होती है जिस दिशा में वैद्युत विभव तीव्रता से घटता है।

© NCERT not to be republished

6. किसी आवेशों के निकाय में संचित स्थितिज ऊर्जा (किसी बाह्य बल द्वारा) आवेशों को उनकी स्थितियों पर लाकर एकत्र करने में किए जाने वाले कार्य के बराबर होती है। दो आवेशों q_1 तथा q_2 की $\mathbf{r}_1$ तथा $\mathbf{r}_2$ पर स्थितिज ऊर्जा

$$U = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q_1 q_2}{r_{12}}$$

यहाँ r_{12} दो आवेशों q_1 तथा q_2 के बीच की दूरी है।

7. किसी बाह्य विभव $V(\mathbf{r})$ में आवेश q की स्थितिज ऊर्जा $q\,V(\mathbf{r})$ होती है। एकसमान विद्युत क्षेत्र $\mathbf{E}$ में किसी द्विध्रुव $\mathbf{p}$ की स्थितिज ऊर्जा $-\mathbf{p}.\mathbf{E}$ होती है।

8. किसी चालक के अभ्यंतर में स्थिरवैद्युत क्षेत्र $\mathbf{E}$ शून्य होता है। किसी आवेशित चालक के पृष्ठ के तुरंत बाहर $\mathbf{E}$ पृष्ठ के अभिलंबवत् होता है।

$\mathbf{E} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\hat{\mathbf{n}}$, यहाँ $\hat{\mathbf{n}}$ बहिर्मुखी अभिलंब के अनुदिश एकांक सदिश तथा σ पृष्ठीय आवेश घनत्व है। किसी चालक के आवेश केवल उसके पृष्ठ पर ही विद्यमान रह सकते हैं। किसी चालक के अंतर्गत (भीतर) तथा उसके पृष्ठ पर विभव हर बिंदु पर नियत रहता है। चालक के भीतर किसी आवेशविहीन कोटर (गुहा) में विद्युत क्षेत्र शून्य होता है।

9. संधारित्र दो ऐसे चालकों का निकाय होता है जो किसी विद्युतरोधी द्वारा एक-दूसरे से पृथक रहते हैं। इसकी धारिता C को $C = Q/V$ द्वारा परिभाषित किया जाता है, यहाँ Q तथा $-Q$ इसके दो चालकों के आवेश हैं तथा V इन दोनों के बीच विभवांतर है। C का निर्धारण पूर्णतया संधारित्र की ज्यामितीय आकृति, आकार, दो चालकों की आपेक्षिक स्थितियों द्वारा किया जाता है। धारिता का एकांक फैरड है: $1\ \text{F} = 1\ \text{C V}^{-1}$

किसी समांतर पट्टिका संधारित्र (पट्टिकाओं के बीच निर्वात) के लिए

$$C = \varepsilon_o A/d$$

यहाँ A प्रत्येक पट्टिका का क्षेत्रफल तथा d इनके बीच का पृथकन है।

10. यदि किसी संधारित्र की दो पट्टिकाओं के बीच कोई विद्युतरोधी पदार्थ (परावैद्युत) भरा है, तो आवेशित पट्टिकाओं के विद्युत क्षेत्र के कारण परावैद्युत में नेट द्विध्रुव आघूर्ण प्रेरित हो जाता है। इस प्रभाव, जिसे ध्रुवण कहते हैं, के कारण विपरीत दिशा में एक विद्युत क्षेत्र उत्पन्न होता है। इससे परावैद्युत के भीतर नेट विद्युत क्षेत्र, तथा इसीलिए पट्टिकाओं के बीच विभवांतर घट जाता है। परिणामस्वरूप संधारित्र की धारिता C, C_0 (जबकि पट्टिकाओं के बीच कोई माध्यम नहीं अर्थात निर्वात है) से बढ़ जाती है। $C = K C_0$

जहाँ K विद्युतरोधी पदार्थ का परावैद्युतांक है।

11. संधारित्रों के श्रेणीक्रम संयोजन के लिए, कुल धारिता C निम्नलिखित संबंध द्वारा दर्शाई जाती है

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots\ldots\ldots$$

पार्श्वक्रम संयोजन के लिए कुल धारिता C होती है–

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots.$$

जहाँ $C_1, C_2, C_3 \ldots\ldots$ व्यष्टिगत धारिताएँ हैं।

© NCERT not to be republished

12. आवेश Q, वोल्टता V तथा धारिता C के किसी संधारित्र में संचित ऊर्जा E निम्नलिखित संबंधों द्वारा व्यक्त की जाती है–

$$U = \frac{1}{2}QV = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}$$

किसी विद्युत क्षेत्र के स्थान पर वैद्युत आवेश घनत्व (प्रति एकांक आयतन ऊर्जा) $(1/2)\varepsilon_0 E^2$ होता है।

भौतिक राशि	प्रतीक	विमाएँ	मात्रक	टिप्पणी
विभव	ϕ अथवा V	$[M^1 L^2 T^{-3} A^{-1}]$	V	विभवांतर भौतिक दृष्टि से महत्वपूर्ण होता है।
धारिता	C	$[M^{-1} L^{-2} T^{-4} A^2]$	F	
ध्रुवण	**P**	$[L^{-2} AT]$	$C\ m^{-2}$	द्विध्रुव आघूर्ण प्रति एकांक आयतन
परावैद्युतांक	K	[विमाहीन]		

विचारणीय विषय

1. स्थिरवैद्युतिकी में स्थिर आवेशों के बीच लगने वाले बलों का अध्ययन किया जाता है। परंतु जब किसी आवेश पर बल आरोपित है तो वह विराम में कैसे हो सकता है? अत: जब दो आवेशों के बीच लगने वाले स्थिरवैद्युत बल के विषय में चर्चा करते हैं, तो यह समझा जाना चाहिए कि प्रत्येक आवेश कुछ अनिर्दिष्ट बलों, जो उस आवेश पर लगे नेट कूलॉम बल का विरोध करते हैं, के प्रभाव से विराम में है।
2. कोई संधारित्र इस प्रकार विन्यासित होता है कि वह विद्युत क्षेत्र रेखाओं को एक छोटे क्षेत्र तक ही सीमित किए रखता है। इस प्रकार, यद्यपि विद्युत क्षेत्र काफी प्रबल हो सकता है परंतु संधारित्र की दो पट्टिकाओं के बीच विभवांतर कम होता है।
3. किसी गोलीय आवेशित कोश के पृष्ठ के आर-पार विद्युत क्षेत्र संतत नहीं होता। गोले के भीतर यह शून्य तथा बाहर यह $\frac{\sigma}{\varepsilon_0}\hat{\mathbf{n}}$ होता है। परंतु वैद्युत विभव पृष्ठ के आर-पार संतत होता है, इसका मान पृष्ठ पर $q/4\pi\varepsilon_0 R$ होता है।
4. किसी द्विध्रुव पर लगा बल आघूर्ण $\mathbf{p} \times \mathbf{E}$ इसमें $\mathbf{E}$ के परित: दोलन उत्पन्न करता है। केवल तभी जब प्रक्रिया क्षयकारी है तो दोलन अवमंदित होते हैं तथा द्विध्रुव अंतत: $\mathbf{E}$ के संरेखित हो जाता है।
5. किसी आवेश q के कारण अपनी स्थिति पर विभव अपरिभाषित है–यह अनंत होता है।

© NCERT not to be republished

6. किसी आवेश q की स्थितिज ऊर्जा के व्यंजक $qV(\mathbf{r})$ में, $V(\mathbf{r})$ बाह्य आवेशों के कारण विभव है तथा q के कारण विभव नहीं है। जैसा कि बिंदु 5 में देखा, यह व्यंजक उस स्थिति में, जबकि स्वयं आवेश q के कारण विभव को $V(\mathbf{r})$ में सम्मिलित कर लें, सही रूप में परिभाषित नहीं होगा।

7. किसी चालक के भीतर कोटर (गुहा) बाह्य वैद्युत प्रभावों से परिरक्षित रहता है। यहाँ यह बात ध्यान देने योग्य है कि स्थिरवैद्युत परिरक्षण उस परिस्थिति में प्रभावी नहीं रहता जिसमें आप कोटर में भीतर आवेश रख देते हैं, तब तो चालक का बहिर्भाग भीतर के आवेशों के विद्युत क्षेत्रों से परिरक्षित नहीं रहता।

अभ्यास

2.1 5×10^{-8} C तथा -3×10^{-8} C के दो आवेश 16 cm दूरी पर स्थित हैं। दोनों आवेशों को मिलाने वाली रेखा के किस बिंदु पर वैद्युत विभव शून्य होगा? अनंत पर विभव शून्य लीजिए।

2.2 10 cm भुजा वाले एक सम-षट्भुज के प्रत्येक शीर्ष पर 5 μC का आवेश है। षट्भुज के केंद्र पर विभव परिकलित कीजिए।

2.3 6 cm की दूरी पर अवस्थित दो बिंदुओं A एवं B पर दो आवेश 2 μC तथा -2 μC रखे हैं।

(a) निकाय के सम विभव पृष्ठ की पहचान कीजिए।

(b) इस पृष्ठ के प्रत्येक बिंदु पर विद्युत क्षेत्र की दिशा क्या है?

2.4 12 cm त्रिज्या वाले एक गोलीय चालक के पृष्ठ पर 1.6×10^{-7}C का आवेश एकसमान रूप से वितरित है।

(a) गोले के अंदर

(b) गोले के ठीक बाहर

(c) गोले के केंद्र से 18 cm पर अवस्थित, किसी बिंदु पर विद्युत क्षेत्र क्या होगा?

2.5 एक समांतर पट्टिका संधारित्र, जिसकी पट्टिकाओं के बीच वायु है, की धारिता 8pF ($1\text{pF} = 10^{-12}$ F) है। यदि पट्टिकाओं के बीच की दूरी को आधा कर दिया जाए और इनके बीच के स्थान में 6 परावैद्युतांक का एक पदार्थ भर दिया जाए तो इसकी धारिता क्या होगी?

2.6 9 pF धारिता वाले तीन संधारित्रों को श्रेणीक्रम में जोड़ा गया है।

(a) संयोजन की कुल धारिता क्या है?

(b) यदि संयोजन को 120 V के संभरण (सप्लाई) से जोड़ दिया जाए, तो प्रत्येक संधारित्र पर क्या विभवांतर होगा?

2.7 2 pF, 3 pF और 4 pF धारिता वाले तीन संधारित्र पार्श्वक्रम में जोड़े गए हैं।

(a) संयोजन की कुल धारिता क्या है?

(b) यदि संयोजन को 100 V के संभरण से जोड़ दें तो प्रत्येक संधारित्र पर आवेश ज्ञात कीजिए।

© NCERT not to be republished

2.8 पट्टिकाओं के बीच वायु वाले एक समांतर पट्टिका संधारित्र की प्रत्येक पट्टिका का क्षेत्रफल $6 \times 10^{-3}\ m^2$ तथा उनके बीच की दूरी 3 mm है। संधारित्र की धारिता को परिकलित कीजिए। यदि इस संधारित्र को 100 V के संभरण से जोड़ दिया जाए तो संधारित्र की प्रत्येक पट्टिका पर कितना आवेश होगा?

2.9 अभ्यास 2.8 में दिए गए संधारित्र की पट्टिकाओं के बीच यदि 3 mm मोटी अभ्रक की एक शीट (पत्तर) (परावैद्युतांक = 6) रख दी जाती है तो स्पष्ट कीजिए कि क्या होगा जब

(a) विभव (वोल्टेज) संभरण जुड़ा ही रहेगा।

(b) संभरण को हटा लिया जाएगा?

2.10 12 pF का एक संधारित्र 50 V की बैटरी से जुड़ा है। संधारित्र में कितनी स्थिरवैद्युत ऊर्जा संचित होगी?

2.11 200 V संभरण (सप्लाई) से एक 600 pF के संधारित्र को आवेशित किया जाता है। फिर इसको संभरण से वियोजित कर देते हैं तथा एक अन्य 600 pF वाले अनावेशित संधारित्र से जोड़ देते हैं। इस प्रक्रिया में कितनी ऊर्जा का ह्रास होता है?

अतिरिक्त अभ्यास

2.12 मूल बिंदु पर एक 8 mC का आवेश अवस्थित है। -2×10^{-9} C के एक छोटे से आवेश को बिंदु P (0, 0, 3 cm) से, बिंदु R (0, 6 cm, 9 cm) से होकर, बिंदु Q (0, 4 cm, 0) तक ले जाने में किया गया कार्य परिकलित कीजिए।

2.13 b भुजा वाले एक घन के प्रत्येक शीर्ष पर q आवेश है। इस आवेश विन्यास के कारण घन के केंद्र पर विद्युत विभव तथा विद्युत क्षेत्र ज्ञात कीजिए।

2.14 1.5 μC और 2.5 μC आवेश वाले दो सूक्ष्म गोले 30 cm दूर स्थित हैं।

(a) दोनों आवेशों को मिलाने वाली रेखा के मध्य बिंदु पर, और

(b) मध्य बिंदु से होकर जाने वाली रेखा के अभिलंब तल में मध्य बिंदु से 10 cm दूर स्थित किसी बिंदु पर विभव और विद्युत क्षेत्र ज्ञात कीजिए।

2.15 आंतरिक त्रिज्या r_1 तथा बाह्य त्रिज्या r_2 वाले एक गोलीय चालक खोल (कोश) पर Q आवेश है।

(a) खोल के केंद्र पर एक आवेश q रखा जाता है। खोल के भीतरी और बाहरी पृष्ठों पर पृष्ठ आवेश घनत्व क्या है?

(b) क्या किसी कोटर (जो आवेश विहीन है) में विद्युत क्षेत्र शून्य होता है, चाहे खोल गोलीय न होकर किसी भी अनियमित आकार का हो? स्पष्ट कीजिए।

2.16 (a) दर्शाइए कि आवेशित पृष्ठ के एक पार्श्व से दूसरे पार्श्व पर स्थिरवैद्युत क्षेत्र के अभिलंब घटक में असांतत्य होता है, जिसे

$$(\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1).\hat{\mathbf{n}} = \frac{\sigma}{\varepsilon_o}$$

द्वारा व्यक्त किया जाता है। जहाँ $\hat{\mathbf{n}}$ एक बिंदु पर पृष्ठ के अभिलंब एकांक सदिश है तथा σ उस बिंदु पर पृष्ठ आवेश घनत्व है ($\hat{\mathbf{n}}$ की दिशा पार्श्व 1 से पार्श्व 2 की ओर है।)। अत: दर्शाइए कि चालक के ठीक बाहर विद्युत क्षेत्र $\sigma \hat{\mathbf{n}}/\varepsilon_0$ है।

© NCERT not to be republished

(b) दर्शाइए कि आवेशित पृष्ठ के एक पार्श्व से दूसरे पार्श्व पर स्थिरवैद्युत क्षेत्र का स्पर्शीय घटक संतत है।

[*संकेत:* (a) के लिए गाउस-नियम का उपयोग कीजिए। (b) के लिए इस सत्य का उपयोग करें कि संवृत पाश पर एक स्थिरवैद्युत क्षेत्र द्वारा किया गया कार्य शून्य होता है)।

2.17 रैखिक आवेश घनत्व λ वाला एक लंबा आवेशित बेलन एक खोखले समाक्षीय चालक बेलन द्वारा घिरा है। दोनों बेलनों के बीच के स्थान में विद्युत क्षेत्र कितना है?

2.18 एक हाइड्रोजन परमाणु में इलेक्ट्रॉन तथा प्रोटॉन लगभग 0.53 Å दूरी पर परिबद्ध हैं :

(a) निकाय की स्थितिज ऊर्जा का eV में परिकलन कीजिए, जबकि प्रोटॉन से इलेक्ट्रान के मध्य की अनंत दूरी पर स्थितिज ऊर्जा को शून्य माना गया है।

(b) इलेक्ट्रॉन को स्वतंत्र करने में कितना न्यूनतम कार्य करना पड़ेगा, यदि यह दिया गया है कि इसकी कक्षा में गतिज ऊर्जा (a) में प्राप्त स्थितिज ऊर्जा के परिमाण की आधी है?

(c) यदि स्थितिज ऊर्जा को 1.06 Å पृथक्करण पर शून्य ले लिया जाए तो, उपर्युक्त (a) और (b) के उत्तर क्या होंगे?

2.19 यदि H_2 अणु के दो में से एक इलेक्ट्रॉन को हटा दिया जाए तो हमें हाइड्रोजन आणविक आयन (H_2^+) प्राप्त होगा। (H_2^+) की निम्नतम अवस्था (ground state) में दो प्रोटॉन के बीच दूरी लगभग1.5Å है और इलेक्ट्रॉन प्रत्येक प्रोटॉन से लगभग 1 Å की दूरी पर है। निकाय की स्थितिज ऊर्जा ज्ञात कीजिए। स्थितिज ऊर्जा की शून्य स्थिति के चयन का उल्लेख कीजिए।

2.20 a और b त्रिज्याओं वाले दो आवेशित चालक गोले एक तार द्वारा एक-दूसरे से जोड़े गए हैं। दोनों गोलों के पृष्ठों पर विद्युत क्षेत्रों में क्या अनुपात है? प्राप्त परिणाम को, यह समझाने में प्रयुक्त कीजिए कि किसी एक चालक के तीक्ष्ण और नुकीले सिरों पर आवेश घनत्व, चपटे भागों की अपेक्षा अधिक क्यों होता है।

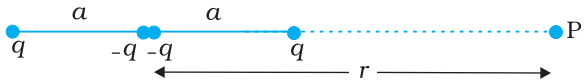
2.21 बिंदु (0, 0, $-a$) तथा (0, 0, a) पर दो आवेश क्रमशः $-q$ और $+q$ स्थित हैं।

(a) बिंदुओं (0, 0, z) और (x, y, 0) पर स्थिरवैद्युत विभव क्या है?

(b) मूल बिंदु से किसी बिंदु की दूरी r पर विभव की निर्भरता ज्ञात कीजिए, जबकि $r/a >> 1$ है।

(c) x-अक्ष पर बिंदु (5, 0, 0) से बिंदु (–7, 0,0) तक एक परीक्षण आवेश को ले जाने में कितना कार्य करना होगा? यदि परीक्षण आवेश के उन्हीं बिंदुओं के बीच x-अक्ष से होकर न ले जाएँ तो क्या उत्तर बदल जाएगा?

2.22 नीचे दिए गए चित्र 2.32 में एक आवेश विन्यास जिसे *विद्युत चतुर्ध्रुवी* कहा जाता है, दर्शाया गया है। चतुर्ध्रुवी के अक्ष पर स्थित किसी बिंदु के लिए r पर विभव की निर्भरता प्राप्त कीजिए जहाँ $r/a >> 1$। अपने परिणाम की तुलना एक विद्युत द्विध्रुव व विद्युत एकल ध्रुव (अर्थात् किसी एकल आवेश) के लिए प्राप्त परिणामों से कीजिए।



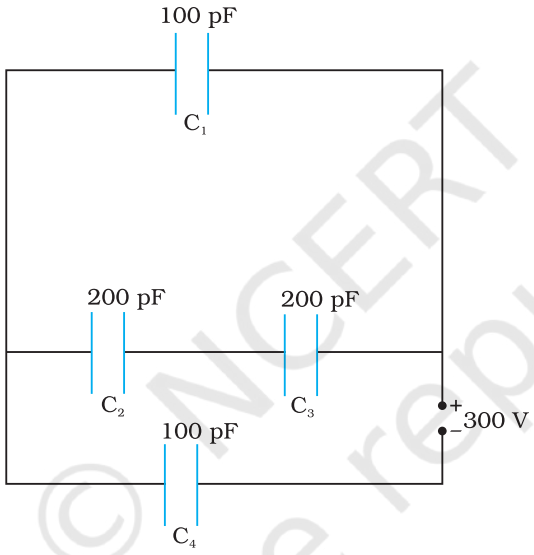
चित्र 2.32

© NCERT not to be republished

2.23 एक वैद्युत टैक्नीशियन को 1 kV विभवांतर के परिपथ में 2 μF संधारित्र की आवश्यकता है। 1 μF के संधारित्र उसे प्रचुर संख्या में उपलब्ध हैं जो 400 V से अधिक का विभवांतर वहन नहीं कर सकते। कोई संभव विन्यास सुझाइए जिसमें न्यूनतम संधारित्रों की आवश्यकता हो।

2.24 2 F वाले एक समांतर पट्टिका संधारित्र की पट्टिका का क्षेत्रफल क्या है, जबकि पट्टिकाओं का पृथकन 0.5 cm है? [अपने उत्तर से आप यह समझ जाएँगे कि सामान्य संधारित्र μF या कम परिसर के क्यों होते हैं? तथापि विद्युत-अपघटन संधारित्रों (Electrolytic capacitors) की धारिता कहीं अधिक (0.1 F) होती है क्योंकि चालकों के बीच अति सूक्ष्म पृथकन होता है]।

2.25 चित्र 2.33 के नेटवर्क (जाल) की तुल्य धारिता प्राप्त कीजिए। 300 V संभरण (सप्लाई) के साथ प्रत्येक संधारित्र का आवेश व उसकी वोल्टता ज्ञात कीजिए।



चित्र 2.33

2.26 किसी समांतर पट्टिका संधारित्र की प्रत्येक पट्टिका का क्षेत्रफल 90 cm^2 है और उनके बीच पृथकन 2.5 mm है। 400 V संभरण से संधारित्र को आवेशित किया गया है।

(a) संधारित्र कितना स्थिरवैद्युत ऊर्जा संचित करता है?

(b) इस ऊर्जा को पट्टिकाओं के बीच स्थिरवैद्युत क्षेत्र में संचित समझकर प्रति एकांक आयतन ऊर्जा u ज्ञात कीजिए। इस प्रकार, पट्टिकाओं के बीच विद्युत क्षेत्र E के परिमाण और u में संबंध स्थापित कीजिए।

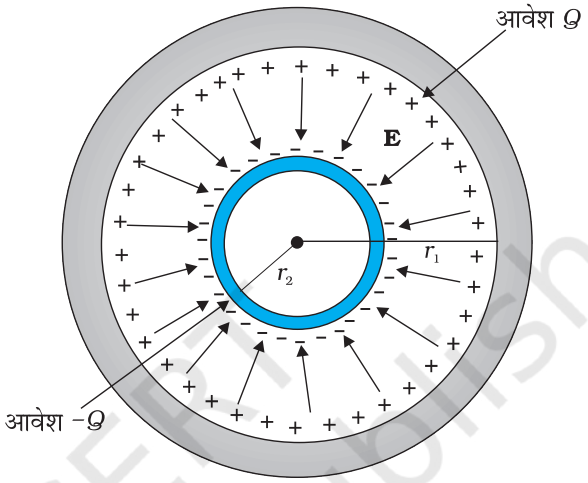
2.27 एक 4 μF के संधारित्र को 200 V संभरण (सप्लाई) से आवेशित किया गया है। फिर संभरण से हटाकर इसे एक अन्य अनावेशित 2 μF के संधारित्र से जोड़ा जाता है। पहले संधारित्र की कितनी स्थिरवैद्युत ऊर्जा का ऊष्मा और वैद्युत-चुंबकीय विकिरण के रूप में ह्रास होता है?

2.28 दर्शाइए कि एक समांतर पट्टिका संधारित्र की प्रत्येक पट्टिका पर बल का परिमाण $\frac{1}{2}QE$ है, जहाँ Q संधारित्र पर आवेश है और E पट्टिकाओं के बीच विद्युत क्षेत्र का परिमाण है। घटक ½ के मूल को समझाइए।

© NCERT not to be republished

2.29 दो संकेंद्री गोलीय चालकों जिनको उपयुक्त विद्युतरोधी आलंबों से उनकी स्थिति में रोका गया है, से मिलकर एक गोलीय संधारित्र बना है (चित्र 2.34)। दर्शाइए कि गोलीय संधारित्र की धारिता C इस प्रकार व्यक्त की जाती है :

$$C = \frac{4\pi\varepsilon_0 r_1 r_2}{r_1 - r_2}$$



चित्र 2.34

यहाँ r_1 और r_2 क्रमशः बाहरी तथा भीतरी गोलों की त्रिज्याएँ हैं।

2.30 एक गोलीय संधारित्र के भीतरी गोले की त्रिज्या 12 cm तथा बाहरी गोले की त्रिज्या 13 cm है। बाहरी गोला भू-संपर्कित है तथा भीतरी गोले पर 2.5 μC का आवेश दिया गया है। संकेंद्री गोलों के बीच के स्थान में 32 परावैद्युतांक का द्रव भरा है।

(a) संधारित्र की धारिता ज्ञात कीजिए।

(b) भीतरी गोले का विभव क्या है?

(c) इस संधारित्र की धारिता की तुलना एक 12 cm त्रिज्या वाले किसी वियुक्त गोले की धारिता से कीजिए। व्याख्या कीजिए कि गोले की धारिता इतनी कम क्यों है।

2.31 सावधानीपूर्वक उत्तर दीजिए:

(a) दो बड़े चालक गोले जिन पर आवेश Q_1 और Q_2 हैं, एक-दूसरे के समीप लाए जाते हैं। क्या इनके बीच स्थिरवैद्युत बल का परिमाण तथ्यतः

$Q_1 Q_2 / 4\pi\varepsilon_0 r^2$

द्वारा दर्शाया जाता है, जहाँ r इनके केंद्रों के बीच की दूरी है?

(b) यदि कूलॉम के नियम में $1/r^3$ निर्भरता का समावेश ($1/r^2$ के स्थान पर) हो तो क्या गाउस का नियम अभी भी सत्य होगा?

(c) स्थिरवैद्युत क्षेत्र विन्यास में एक छोटा परीक्षण आवेश किसी बिंदु पर विराम में छोड़ा जाता है। क्या यह उस बिंदु से होकर जाने वाली क्षेत्र रेखा के अनुदिश चलेगा?

© NCERT not to be republished

(d) इलेक्ट्रॉन द्वारा एक वृत्तीय कक्षा पूरी करने में नाभिक के क्षेत्र द्वारा कितना कार्य किया जाता है? यदि कक्षा दीर्घवृत्ताकार हो तो क्या होगा?

(e) हमें ज्ञात है कि एक आवेशित चालक के पृष्ठ के आर-पार विद्युत क्षेत्र असंतत होता है। क्या वहाँ वैद्युत विभव भी असंतत होगा?

(f) किसी एकल चालक की धारिता से आपका क्या अभिप्राय है?

(g) एक संभावित उत्तर की कल्पना कीजिए कि पानी का परावैद्युतांक (= 80), अभ्रक के परावैद्युतांक (=6) से अधिक क्यों होता है?

2.32 एक बेलनाकार संधारित्र में 15 cm लंबाई एवं त्रिज्याएँ 1.5 cm तथा 1.4 cm के दो समाक्ष बेलन हैं। बाहरी बेलन भू-संपर्कित है और भीतरी बेलन को 3.5 μC का आवेश दिया गया है। निकाय की धारिता और भीतरी बेलन का विभव ज्ञात कीजिए। अंत्य प्रभाव (अर्थात् सिरों पर क्षेत्र रेखाओं का मुड़ना) की उपेक्षा कर सकते हैं।

2.33 3 परावैद्युतांक तथा 10^7 V m^{-1} की परावैद्युत सामर्थ्य वाले एक पदार्थ से 1 kV वोल्टता अनुमतांक के समांतर पट्टिका संधारित्र की अभिकल्पना करनी है। [परावैद्युत सामर्थ्य वह अधिकतम विद्युत क्षेत्र है जिसे कोई पदार्थ बिना भंग हुए अर्थात् आंशिक आयनन द्वारा बिना वैद्युत संचरण आरंभ किए सहन कर सकता है] सुरक्षा की दृष्टि से क्षेत्र को कभी भी परावैद्युत सामर्थ्य के 10% से अधिक नहीं होना चाहिए। 50 pF धारिता के लिए पट्टिकाओं का कितना न्यूनतम क्षेत्रफल होना चाहिए?

2.34 व्यवस्थात्मकत: निम्नलिखित में संगत समविभव पृष्ठ का वर्णन कीजिए:

(a) z-दिशा में अचर विद्युत क्षेत्र

(b) एक क्षेत्र जो एकसमान रूप से बढ़ता है, परंतु एक ही दिशा (मान लीजिए z-दिशा) में रहता है।

(c) मूल बिंदु पर कोई एकल धनावेश, और

(d) एक समतल में समान दूरी पर समांतर लंबे आवेशित तारों से बने एकसमान जाल।

2.35 r_1 त्रिज्या तथा q_1 आवेश वाला एक छोटा गोला, r_2 त्रिज्या और q_2 आवेश के गोलीय खोल (कोश) से घिरा है। दर्शाइए यदि q_1 धनात्मक है तो (जब दोनों को एक तार द्वारा जोड़ दिया जाता है) आवश्यक रूप से आवेश, गोले से खोल की तरफ ही प्रवाहित होगा, चाहे खोल पर आवेश q_2 कुछ भी हो।

2.36 निम्न का उत्तर दीजिए :

(a) पृथ्वी के पृष्ठ के सापेक्ष वायुमंडल की ऊपरी परत लगभग 400 kV पर है, जिसके संगत विद्युत क्षेत्र ऊँचाई बढ़ने के साथ कम होता है। पृथ्वी के पृष्ठ के समीप विद्युत क्षेत्र लगभग 100 V m^{-1} है। तब फिर जब हम घर से बाहर खुले में जाते हैं, तो हमें विद्युत आघात क्यों नहीं लगता? (घर को लोहे का पिंजरा मान लीजिए, अत: उसके अंदर कोई विद्युत क्षेत्र नहीं है !)

(b) एक व्यक्ति शाम के समय अपने घर के बाहर 2 m ऊँचा अवरोधी पट्ट रखता है जिसके शिखर पर एक 1 m^2 क्षेत्रफल की बड़ी ऐलुमिनियम की चादर है। अगली सुबह वह यदि धातु की चादर को छूता है तो क्या उसे विद्युत आघात लगेगा?

© NCERT not to be republished

(c) वायु की थोड़ी-सी चालकता के कारण सारे संसार में औसतन वायुमंडल में विसर्जन धारा 1800 A मानी जाती है। तब यथासमय वातावरण स्वयं पूर्णत: निरावेशित होकर विद्युत उदासीन क्यों नहीं हो जाता? दूसरे शब्दों में, वातावरण को कौन आवेशित रखता है?

(d) तड़ित के दौरान वातावरण की विद्युत ऊर्जा, ऊर्जा के किन रूपों में क्षयित होती है?

[संकेत: पृष्ठ आवेश घनत्व $=10^{-9}\ C\ m^{-2}$ के अनुरूप पृथ्वी के (पृष्ठ) पर नीचे की दिशा में लगभग $100\ V\ m^{-1}$ का विद्युत क्षेत्र होता है। लगभग 50 km ऊँचाई तक (जिसके बाहर यह अच्छा चालक है) वातावरण की थोड़ी सी चालकता के कारण लगभग +1800 C का आवेश प्रति सेकंड समग्र रूप से पृथ्वी में पंप होता रहता है। तथापि, पृथ्वी निरावेशित नहीं होती, क्योंकि संसार में हर समय लगातार तड़ित तथा तड़ित-झंझा होती रहती है, जो समान मात्रा में ऋणावेश पृथ्वी में पंप कर देती है।]

© NCERT not to be republished

अध्याय 3

विद्युत धारा

© NCERT not to be republished

3.1 भूमिका

अध्याय 1 में सभी आवेशों को चाहे वे स्वतंत्र हों अथवा परिबद्ध, विरामावस्था में माना गया था। गतिमान आवेश विद्युत धारा का निर्माण करते हैं। ऐसी ही धारा प्रकृति में बहुत-सी स्थितियों में पाई जाती है। तड़ित एक ऐसी परिघटना है जिसमें आवेश बादलों से पृथ्वी तक वायुमंडल से होकर पहुँचते हैं, जिनका परिणाम कभी-कभी भयंकर होता है। तड़ित में आवेश का प्रवाह स्थायी नहीं होता, परंतु हम अपने दैनिक जीवन में बहुत-सी युक्तियों में आवेशों को उसी प्रकार प्रवाहित होते हुए देखते हैं जिस प्रकार नदियों में जल प्रवाहित होता रहता है। टॉर्च तथा सेल से चलने वाली घड़ी इस प्रकार की युक्तियों के कुछ उदाहरण हैं। इस अध्ययन में हम अपरिवर्ती अथवा स्थायी विद्युत धारा से संबंधित कुछ मूल नियमों का अध्ययन करेंगे।

3.2 विद्युत धारा

आवेश प्रवाह के लंबवत एक लघु क्षेत्रफल की कल्पना कीजिए। इस क्षेत्र से होकर धनात्मक और ऋणात्मक दोनों ही प्रकार के आवेश अग्र अथवा पश्च दिशा में प्रवाहित हो सकते हैं। मान लीजिए, किसी काल-अंतराल t में इस क्षेत्र से प्रवाहित होने वाला नेट अग्रगामी धनावेश q_+ (अर्थात अग्रगामी तथा पश्चगामी का अंतर) है। इसी प्रकार, मान लीजिए इसी क्षेत्र से प्रवाहित होने वाला नेट अग्रगामी ऋणावेश q_- है। तब इस काल अंतराल t में इस क्षेत्र से प्रवाहित होने वाला नेट आवेश $q = q_+ - q_-$ है। स्थायी धारा के लिए यह t के अनुक्रमानुपाती है और भागफल

$$I = \frac{q}{t} \tag{3.1}$$

क्षेत्र से होकर अग्रगामी दिशा में प्रवाहित विद्युत धारा को परिभाषित करता है। (यदि यह संख्या ऋणात्मक है तो इससे यह संकेत प्राप्त होता है कि विद्युत धारा पश्चदिशा में है।)

विद्युत धाराएँ सदैव अपरिवर्ती नहीं होतीं, इसलिए अधिक व्यापक रूप में हम विद्युत धारा को निम्न प्रकार से परिभाषित करते हैं। मान लीजिए काल-अंतराल Δt [अर्थात काल t तथा $(t + \Delta t)$ के बीच] में किसी चालक की अनुप्रस्थ काट से प्रवाहित होने वाला नेट आवेश ΔQ है। तब काल t पर चालक के इस अनुप्रस्थ काट से प्रवाहित विद्युत धारा को ΔQ या Δt के अनुपात के मान के रूप में इस प्रकार परिभाषित किया जाता है जिसमें Δt की सीमा शून्य की ओर प्रवृत्त है,

$$I(t) \equiv \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} \tag{3.2}$$

S I मात्रकों में विद्युत धारा का मात्रक ऐम्पियर है। एक ऐम्पियर को विद्युत धारा के चुंबकीय प्रभाव द्वारा परिभाषित किया जाता है जिसका हम अगले अनुच्छेद में अध्ययन करेंगे। घरेलू वैद्युत-साधित्रों में प्रवाहित होने वाली प्रतिरूपी विद्युत धारा के परिमाण की कोटि एक ऐम्पियर होती है। जहाँ एक ओर किसी औसत तड़ित में हज़ारों ऐम्पियर कोटि की धारा प्रवाहित हो जाती है, वहीं दूसरी ओर हमारी तंत्रिकाओं से प्रवाहित होने वाली धाराएँ कुछ माइक्रोऐम्पियर कोटि की होती हैं।

3.3 चालक में विद्युत धारा

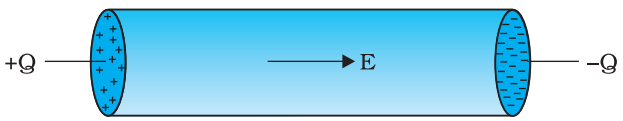
यदि किसी वैद्युत आवेश पर कोई विद्युत क्षेत्र को अनुप्रयुक्त किया जाए तो वह एक बल का अनुभव करेगा। यदि यह गति करने के लिए स्वतंत्र है तो यह भी गतिमान होकर विद्युत धारा उत्पन्न करेगा। वायुमंडल के ऊपरी स्तर जिसे आयनमंडल कहते हैं, की भाँति प्रकृति में मुक्त आवेशित कण पाए जाते हैं। तथापि, अणुओं तथा परमाणुओं में ऋणावेशित इलेक्ट्रॉन तथा धनावेशित इलेक्ट्रॉन एक-दूसरे से परिबद्ध होने के कारण गति करने के लिए स्वतंत्र नहीं होते हैं। स्थूल पदार्थ अनेक अणुओं से निर्मित होते हैं, उदाहरण के लिए, एक ग्राम जल में लगभग 10^{22} अणु होते हैं। ये अणु इतने संकुलित होते हैं कि इलेक्ट्रॉन अब एक व्यष्टिगत नाभिक से ही जुड़ा नहीं रहता। कुछ पदार्थों में इलेक्ट्रॉन अभी भी परिबद्ध होते हैं, अर्थात विद्युत-क्षेत्र अनुप्रयुक्त करने पर भी त्वरित नहीं होते। कुछ दूसरे पदार्थों में विशेषकर धातुओं में कुछ इलेक्ट्रॉन स्थूल पदार्थ के भीतर वास्तविक रूप से, गति करने के लिए स्वतंत्र होते हैं। इन पदार्थों जिन्हें सामान्यत: चालक कहते हैं, में विद्युत क्षेत्र अनुप्रयुक्त करने पर विद्युत धारा उत्पन्न हो जाती है।

यदि हम ठोस चालक पर विचार करें तो वास्तव में इनमें परमाणु आपस में निकट रूप से, कस कर आबद्ध होते हैं जिसके कारण ऋण आवेशित इलेक्ट्रॉन विद्युत धारा का वहन करते हैं। तथापि, अन्य प्रकार के चालक भी होते हैं जैसे विद्युत अपघटनी विलयन, जिनमें धनावेश तथा ऋणावेश दोनों गति कर सकते हैं। हम अपनी चर्चा को ठोस चालकों पर ही केंद्रित रखेंगे जिसमें स्थिर धनायनों की पृष्ठभूमि में ऋण आवेशित इलेक्ट्रॉन विद्युत धारा का वहन करते हैं।

पहले हम ऐसी स्थिति पर विचार करते हैं जहाँ कोई विद्युत क्षेत्र उपस्थित नहीं है। इलेक्ट्रॉन तापीय गति करते समय आबद्ध आयनों से संघट्ट करते हैं। संघट्ट के पश्चात इलेक्ट्रॉन की चाल अपरिवर्तित रहती है। अत: टकराने के बाद चाल की दिशा पूर्णतया यादृच्छिक होती है। किसी दिए हुए समय पर इलेक्ट्रॉनों की चाल की कोई अधिमानिक दिशा नहीं होती है। अत: औसत रूप से

© NCERT not to be republished

किसी एक विशेष दिशा में गमन करने वाले इलेक्ट्रॉनों की संख्या, उस दिशा के ठीक विपरीत दिशा में गमन करने वाले इलेक्ट्रॉनों की संख्या के ठीक बराबर होती है। अत: कोई नेट विद्युत धारा नहीं होगी।



चित्र 3.1 धात्विक बेलन के सिरों पर रखे $+Q$ और $-Q$ आवेश। आवेशों को उदासीन करने के लिए उत्पन्न विद्युत क्षेत्र के कारण इलेक्ट्रॉनों का अपवाह होगा। यदि आवेश $+Q$ और $-Q$ की पुन: पूर्ति सतत न की गई तो कुछ देर में विद्युत धारा प्रवाह समाप्त हो जाएगा।

आइए अब हम यह देखें कि इस प्रकार के चालक के किसी टुकड़े पर कोई विद्युत क्षेत्र अनुप्रयुक्त करने पर क्या होता है। अपने विचारों को केंद्रित करने के लिए R त्रिज्या के बेलनाकार चालक की कल्पना कीजिए (चित्र 3.1)। मान लीजिए परावैद्युत पदार्थ की बनी दो पतली वृत्ताकार डिस्क लेते हैं जिनकी त्रिज्याएँ चालक के समान हैं और जिनमें एक पर धनावेश $+Q$ तथा दूसरे पर ऋणावेश $-Q$ एकसमान रूप से वितरित हैं। इन दोनों डिस्कों को बेलन की दो चपटी पृष्ठों से जोड़ देते हैं। ऐसा करने पर एक विद्युत क्षेत्र उत्पन्न हो जाएगा जिसकी दिशा धनावेश से ऋणावेश की ओर होगी। इस क्षेत्र के कारण इलेक्ट्रॉन $+Q$ की तरफ त्वरित होंगे। इस प्रकार वे आवेशों को उदासीन करने के लिए गति करेंगे। जब तक इलेक्ट्रॉन का प्रवाह बना रहेगा, विद्युत धारा बनी रहेगी। इस प्रकार विचाराधीन परिस्थिति में बहुत अल्प समय के लिए विद्युत धारा बहेगी और उसके पश्चात कोई धारा नहीं होगी।

हम ऐसी युक्तियों की भी कल्पना कर सकते हैं जो बेलन के सिरों पर, चालक के अंदर गतिमान इलेक्ट्रॉनों द्वारा उदासीन सभी आवेशों की नए आवेशों से पुन: पूर्ति कराएँ। उस प्रकाश में चालक में एक स्थायी विद्युत क्षेत्र स्थापित होगा, जिसके परिणामस्वरूप जो धारा उत्पन्न होगी वह अल्पावधि की न होकर, सतत विद्युत धारा होगी। इस प्रकार स्थायी विद्युत क्षेत्र उत्पन्न करने वाली युक्तियाँ विद्युत सेल अथवा बैटरियाँ होती हैं जिनके विषय में हम इस अध्याय में आगे अध्ययन करेंगे। अगले अनुभागों में हम चालकों में स्थायी विद्युत-क्षेत्रों से प्राप्त स्थायी विद्युत धारा का अध्ययन करेंगे।

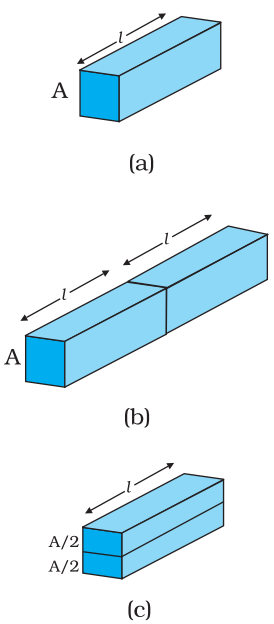
3.4 ओम का नियम

विद्युत धारा के प्रवाह के लिए उत्तरदायी भौतिक युक्तियों की खोज से काफी पहले जी. एस. ओम ने सन् 1828 में धारा प्रवाह से संबद्ध एक मूल नियम की खोज कर ली थी। एक चालक की परिकल्पना कीजिए जिससे धारा I प्रवाहित हो रही है और मान लीजिए V, चालक के सिरों के मध्य विभवान्तर है। तब ओम के नियम का कथन है कि

$$V \propto I$$

अथवा $$V = R\,I \qquad (3.3)$$

यहाँ आनुपातिकता स्थिरांक R, चालक का *प्रतिरोध* कहलाता है। प्रतिरोध का SI मात्रक *ओम* है और यह प्रतीक Ω द्वारा निर्दिष्ट किया जाता है। प्रतिरोध R चालक के केवल पदार्थ पर ही नहीं बल्कि चालक के विस्तार पर भी निर्भर करता है। प्रतिरोध की चालक के विस्तार पर निर्भरता नीचे दिए अनुसार आसानी से ज्ञात की जा सकती है।



चित्र 3.2 लंबाई l तथा अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल A की आयताकार सिल्ली के संबंध $R = \rho l/A$ का निदर्श चित्र।

लंबाई l तथा अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल A की किसी आयताकार सिल्ली पर विचार कीजिए जो समीकरण (3.3) को संतुष्ट करता है [चित्र 3.2]। कल्पना कीजिए ऐसी दो सर्वसम सिल्लियाँ सिरे से सिरे को मिलाते हुए इस प्रकार रखी हुई हैं कि संयोजन की लंबाई $2l$ है। इस संयोजन से उतनी ही धारा प्रवाहित होगी जितनी कि दोनों में से किसी एक सिल्ली से होगी। यदि पहली सिल्ली के

© NCERT not to be republished

जॉर्ज साइमन ओम (1787–1854)



जॉर्ज साइमन ओम (1787–1854) जर्मन भौतिकविज्ञानी, म्यूनिख में प्रोफ़ेसर थे। ओम ने अपने नियम की खोज ऊष्मा-चालन से सदृश्य के आधार पर की– विद्युत क्षेत्र ताप-प्रवणता के तुल्य है और विद्युत धारा ऊष्मा-प्रवाह के।

सिरों के मध्य विभवांतर V है, तब दूसरी सिल्ली के सिरों के मध्य भी विभवांतर V होगा, क्योंकि दूसरी सिल्ली पहली के समान है और दोनों से समान धारा प्रवाहित हो रही है। स्पष्टतया संयोजन के सिरों के मध्य विभवांतर, दो पृथक सिल्लियों के मध्य विभवांतरों का योग है, अत: $2V$ के बराबर है। संयोजन से होकर प्रवाहित धारा I है तब समीकरण (3.3) से संयोजन का प्रतिरोध R_C

$$R_C = \frac{2V}{I} = 2R \tag{3.4}$$

चूँकि $V/I = R$, दोनों में से किसी एक सिल्ली का प्रतिरोध है। इस प्रकार चालक की लंबाई दोगुनी करने पर इसका प्रतिरोध दोगुना हो जाता है। तब व्यापक रूप से प्रतिरोध लंबाई के अनुक्रमानुपाती होता है

$$R \propto l \tag{3.5}$$

इसके बाद इस सिल्ली को लंबाई में दो समान भागों में विभाजित करने की कल्पना कीजिए जिससे कि सिल्ली को लंबाई l की दो सर्वसम सिल्लियों जिनमें प्रत्येक का अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल $A/2$ है, के संयोजन जैसा समझा जा सके [चित्र 3.2 (c)]।

सिल्ली के सिरों के मध्य दिए गए विभवांतर V के लिए यदि पूरी सिल्ली से प्रवाहित होने वाली धारा I है तो स्पष्टता प्रत्येक आधी सिल्ली से प्रवाहित होने वाली धारा $I/2$ होगी। चूँकि आधी सिल्ली के सिरों के मध्य विभवांतर V है, अर्थात उतना ही है जितना कि पूरी सिल्ली के सिरों के मध्य विभवांतर है, इसलिए प्रत्येक आधी सिल्ली का प्रतिरोध R_1 इस प्रकार व्यक्त किया जा सकता है

$$R_1 = \frac{V}{(I/2)} = 2\frac{V}{I} = 2R \tag{3.6}$$

इस प्रकार चालक की अनुप्रस्थ काट के क्षेत्रफल को आधा करने पर प्रतिरोध दोगुना हो जाता है। व्यापक रूप से तब प्रतिरोध R, अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल (A) के व्युत्क्रमानुपाती होता है, अर्थात

$$R \propto \frac{1}{A} \tag{3.7}$$

समीकरण (3.5) और (3.7) के संयोजन से

$$R \propto \frac{l}{A} \tag{3.8}$$

अत:, किसी दिए गए चालक के लिए

$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{3.9}$$

यहाँ ρ एक आनुपातिकता स्थिरांक है जो चालक के पदार्थ की प्रकृति पर निर्भर करता है, इसके विस्तार पर नहीं। ρ को *प्रतिरोधकता* कहते हैं।

समीकरण (3.9) का प्रयोग करने पर, ओम के नियम को इस प्रकार व्यक्त कर सकते हैं

$$V = I \times R = \frac{I\rho l}{A} \tag{3.10}$$

विद्युत धारा प्रति एकांक क्षेत्र (धारा के अभिलंबवत ली गई) I/A *धारा घनत्व* कहलाता है और

© NCERT not to be republished

j द्वारा निर्दिष्ट किया जाता है। धारा घनत्व का SI मात्रक A/m^2 है। इसके अतिरिक्त यदि एकसमान विद्युत क्षेत्र E के किसी चालक की लंबाई l है तो इस चालक के सिरों के बीच विभवांतर का परिणाम El होता है। इसका उपयोग करने पर समीकरण (3.10) को इस प्रकार व्यक्त करते हैं

$$E\,l = j\,\rho\,l$$

अथवा $$E = j\,\rho \qquad (3.11)$$

E तथा **j** के परिमाण के लिए उपरोक्त समीकरण को अवश्य ही सदिश रूप में व्यक्त किया जा सकता है। धारा घनत्व (जिसे हमने धारा के अभिलंबवत प्रति एकांक क्षेत्रफल के रूप में परिभाषित किया है) भी **E** की ओर निर्दिष्ट है और j ($\equiv j\mathbf{E}/E$) एक सदिश भी है। इस प्रकार समीकरण (3.11) को इस प्रकार से व्यक्त करते हैं

$$\mathbf{E} = \mathbf{j}\rho \qquad (3.12)$$

अथवा $$\mathbf{j} = \sigma\,\mathbf{E} \qquad (3.13)$$

जहाँ $\sigma = 1/\rho$ को *चालकता* कहते हैं। ओम के नियम को प्रायः समीकरण (3.3) के अलावा समीकरण (3.13) द्वारा भी समतुल्य रूप में व्यक्त किया जाता है। अगले अनुच्छेद में हम ओम के नियम के उद्गम को इस रूप में समझने का प्रयास करेंगे जैसे कि यह इलेक्ट्रॉनों के अपवाह के अभिलक्षणों से उत्पन्न हुआ है।

3.5 इलेक्ट्रॉन का अपवाह एवं प्रतिरोधकता का उद्गम

हमने पहले देखा है कि जब कोई इलेक्ट्रॉन किसी भारी आयन से संघट्ट करता है तो संघट्ट के बाद उसी चाल से चलता है लेकिन इसकी दिशा यादृच्छिक हो जाती है। यदि हम सभी इलेक्ट्रॉनों पर विचार करें तो उनका औसत वेग शून्य होगा, क्योंकि उनकी दिशाएँ यादृच्छिक हैं। इस प्रकार यदि i^{th} इलेक्ट्रॉन ($i = 1, 2, 3, \ldots N$) का वेग किसी दिए समय में $\mathbf{v}_i$ हो तो

$$\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\mathbf{v}_i = 0 \qquad (3.14)$$

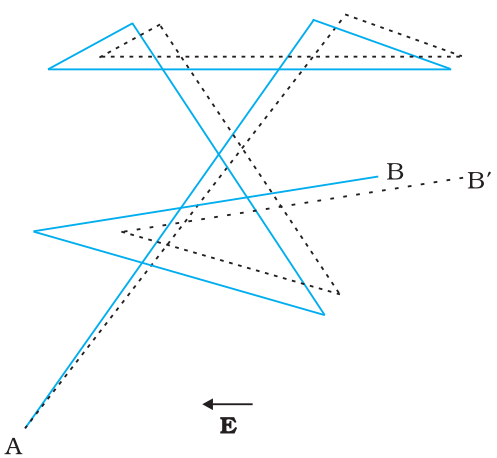
अब ऐसी स्थिति पर विचार करें जब यह चालक किसी विद्युत क्षेत्र में उपस्थित है। इस क्षेत्र के कारण इलेक्ट्रॉन में त्वरण उत्पन्न होगा

$$\mathbf{a} = \frac{-e\,\mathbf{E}}{m} \qquad (3.15)$$

जहाँ $-e$ इलेक्ट्रॉन का आवेश तथा m इसका द्रव्यमान है। दिए गए समय t में i^{th} इलेक्ट्रॉन पर पुनः विचार करें। यह इलेक्ट्रॉन t के कुछ समय पहले अंतिम बार संघट्ट करेगा और मान लीजिए, t_i इसके अंतिम संघट्ट के बाद व्यतीत समय है। यदि v_i अंतिम संघट्ट के तुरंत पश्चात का वेग था तब समय t पर इसका वेग

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{v}_i + \left(-\frac{e\,\mathbf{E}}{m}\right)t_i \qquad (3.16)$$

चूँकि अपने अंतिम संघट्ट से आरंभ करने के पश्चात यह इलेक्ट्रॉन किसी समय अंतराल t_i के लिए समीकरण (3.15) द्वारा दिए गए त्वरण के साथ त्वरित हुआ था। सभी इलेक्ट्रॉनों का समय t पर औसत वेग सभी $\mathbf{V}_i$ का औसत है।



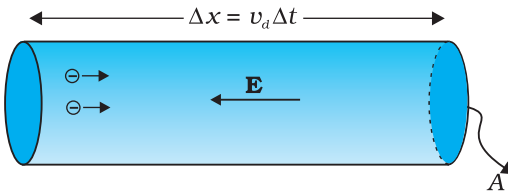
चित्र 3.3 किसी बिंदु A से दूसरे बिंदु B तक बारम्बार संघट्टों के द्वारा इलेक्ट्रॉन की गति तथा संघट्टों के बीच रैखिक गति का आरेखीय चित्रण (सतत रेखाएँ)। यदि दर्शाए अनुसार कोई विद्युत क्षेत्र लगाया जाता है तो इलेक्ट्रॉन B' पर रुक जाता है (बिंदुकृत रेखाएँ)। विद्युत क्षेत्र के विपरीत दिशा में मामूली अपवाह दिखलाई दे रहा है।

© NCERT not to be republished

$\mathbf{v}_i$ का औसत शून्य है [समीकरण (3.14)] क्योंकि संघट्ट के तुरंत बाद एक इलेक्ट्रॉन के वेग की दिशा पूर्णतया यादृच्छिक होती है। इलेक्ट्रॉनों के संघट्ट नियमित काल-अंतरालों पर न होकर यादृच्छिक समय में होते हैं। यदि लगातार (क्रमिक) संघट्टों के बीच औसत समय को हम लोग τ से निर्दिष्ट करें तो किसी दिए गए समय में कुछ इलेक्ट्रॉन τ से ज्यादा और कुछ τ से कम समय व्यतीत किए होंगे। दूसरे शब्दों में, जैसे-जैसे हम $i = 1, 2 \ldots\ldots N$ विभिन्न मान देते हैं तो हमें समीकरण (3.16) के अनुसार समय t_i के मान कुछ के लिए τ से ज्यादा होंगे तथा कुछ के लिए τ से कम होंगे। तब t_i का औसत मान τ होगा (जिसे *विश्रांति काल* कहते हैं)। इस प्रकार किसी दिए समय t पर N इलेक्ट्रॉनों के लिए समीकरण (3.16) का औसत लेने पर हमें औसत वेग $\mathbf{v}_d$ प्राप्त होता है

$$\mathbf{v}_d \equiv (\mathbf{V}_i)_{\text{औसत}} = (\mathbf{v}_i)_{\text{औसत}} - \frac{e\mathbf{E}}{m}(t_i)_{\text{औसत}}$$

$$= 0 - \frac{e\mathbf{E}}{m}\tau = -\frac{e\mathbf{E}}{m}\tau \qquad (3.17)$$



चित्र 3.4 धात्विक चालक में विद्युत धारा। धातु में धारा घनत्व का परिमाण एकांक क्षेत्रफल तथा $\mathbf{v}_d$ ऊँचाई के बेलन में अंतर्विष्ट आवेश के परिमाण के बराबर है।

यह अंतिम परिणाम आश्चर्यजनक है। यह हमें बताता है कि इलेक्ट्रॉन, यद्यपि त्वरित है, एक औसत वेग से गतिमान है जो समय पर निर्भर नहीं करता है। यह परिघटना अपवाह की है और समीकरण (3.17) का वेग $\mathbf{v}_d$ *अपवाह वेग* कहलाता है।

अपवाह के कारण, विद्युत क्षेत्र $\mathbf{E}$ के लंबवत किसी क्षेत्र से होकर आवेशों का नेट परिवहन होगा। चालक के अंदर एक समतलीय क्षेत्र पर विचार करें जो कि $\mathbf{E}$ के समांतर क्षेत्र पर अभिलंब है (चित्र 3.4)। तब अपवाह के कारण, अत्यणु समय Δt में, क्षेत्र की बायीं ओर के सभी इलेक्ट्रॉन $|\mathbf{v}_d|\Delta t$ दूरी पार कर लिए होंगे। यदि चालक में प्रति एकांक आयतन मुक्त इलेक्ट्रॉनों की संख्या n है तो $n\Delta t|\mathbf{v}_d|A$ ऐसे इलेक्ट्रॉन होंगे। चूँकि प्रत्येक इलेक्ट्रॉन आवेश $-e$ वहन करता है, Δt समय में क्षेत्र A की दायीं ओर परिवहित कुल आवेश $-neA|\mathbf{v}_d|\Delta t$ है। $\mathbf{E}$ बायीं ओर निर्दिष्ट है, अतः इस क्षेत्र से होकर $\mathbf{E}$ के अनुदिश परिवहित कुल आवेश इसके ऋणात्मक होगा। परिभाषानुसार [समीकरण (3.2)] क्षेत्र A को समय Δt में पार करने वाले आवेश $I\Delta t$ होंगे, यहाँ I धारा का परिमाण है। अतः

$$I\Delta t = +neA|\mathbf{v}_d|\Delta t \qquad (3.18)$$

$|\mathbf{v}_d|$ के मान को समीकरण (3.17) से प्रतिस्थापित करने पर

$$I\Delta t = \frac{e^2A}{m}\tau n\Delta t|\mathbf{E}| \qquad (3.19)$$

परिभाषानुसार, धारा घनत्व के परिमाण $|\mathbf{j}|$ से I संबंधित है

$$I = |\mathbf{j}|A \qquad (3.20)$$

अतः समीकरण (3.19) तथा (3.20) से,

$$|\mathbf{j}| = \frac{ne^2}{m}\tau|\mathbf{E}| \qquad (3.21)$$

सदिश $\mathbf{j}$, $\mathbf{E}$ के समांतर है, इसलिए हम समीकरण (3.21) को सदिश रूप में लिख सकते हैं

$$\mathbf{j} = \frac{ne^2}{m}\tau\mathbf{E} \qquad (3.22)$$

अगर हम चालकता σ का तादात्म्य स्थापित करें

$$\sigma = \frac{ne^2}{m}\tau$$

© NCERT not to be republished

तो समीकरण (3.13) से तुलना करने पर यह व्यक्त होता है कि समीकरण (3.22) तथ्यत: ओम का नियम है। यदि हम चालकता को σ द्वारा निर्दिष्ट करें तो $\sigma = \frac{ne^2}{m}\tau$ (3.23)

इस प्रकार हम देखते हैं कि विद्युत चालकता का एक बहुत सरल चित्रण ओम के नियम की प्रतिकृति तैयार करता है। अवश्य ही हमने यह पूर्वधारणा बनाई है कि τ और n, E से स्वतंत्र स्थिरांक हैं। अगले अनुच्छेद में हम ओम के नियम की सीमाओं का विवेचन करेंगे।

उदाहरण 3.1 (a) $1.0 \times 10^{-7}\,m^2$ अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल वाले ताँबे के तार में 1.5 A धारा प्रवाहित हो रही है। इसमें चालक इलेक्ट्रॉनों की औसत अपवाह चाल का आकलन कीजिए। मान लीजिए कि ताँबे का प्रत्येक परमाणु धारा के प्रवाह में एक चालक इलेक्ट्रॉन का योगदान करता है। ताँबे का घनत्व $9.0 \times 10^3\,kg/m^3$ तथा इसका परमाणु द्रव्यमान 63.5 u है। (b) ऊपर निकाली गई अपवाह चाल की निम्नलिखित उदाहरणों से तुलना कीजिए। (i) सामान्य तापों पर ताँबे के परमाणुओं की तापीय चाल (ii) चालक के अनुदिश विद्युत क्षेत्र की संचरण चाल जो अपवाह गति उत्पन्न करती है।

हल

(a) चालक इलेक्ट्रॉन के अपवाह वेग की दिशा विद्युत क्षेत्र की दिशा के विपरीत है अर्थात इलेक्ट्रॉन बढ़ते हुए विभव की दिशा में अपवाह करते हैं। अपवाह चाल v_d समीकरण (3.18) से व्यक्त होगी,

$v_d = (I/neA)$

अब $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C, $A = 1.0 \times 10^{-7} m^2$, $I = 1.5$ A है। चालक इलेक्ट्रॉनों का घनत्व, n प्रति घन मीटर में परमाणुओं की संख्या के बराबर है (मान लीजिए कि प्रति ताँबे के परमाणु में एक चालक इलेक्ट्रॉन है जो संयोजकता इलेक्ट्रॉन की संख्या 1 के अनुसार यथोचित है)। एक घन मीटर ताँबे का द्रव्यमान 9.0×10^3 kg है। चूँकि 6.0×10^{23} ताँबे के परमाणुओं का द्रव्यमान 63.5 g है, अत:

$$n = \frac{6.0 \times 10^{23}}{63.5} \times 9.0 \times 10^6 = 8.5 \times 10^{28}\ m^{-3}$$

जिससे हमें अपवाह चाल का निम्न मान प्राप्त होता है:

$$v_d = \frac{1.5}{8.5 \times 10^{28} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1.0 \times 10^{-7}}$$

$= 1.1 \times 10^{-3}\ m\ s^{-1}$

$= 1.1\ mm\ s^{-1}$

(b) (i) ताप T पर M द्रव्यमान के ताँबे के एक परमाणु की तापीय चाल* विशिष्ट रूप से $\sqrt{k_B T / M}$ की कोटि की है। जिसे $[<(1/2)\,Mv^2> = (3/2)\,k_B T]$ से प्राप्त किया गया है। यहाँ k_B बोल्ट्ज़मैन नियतांक है। 300 K पर ताँबे के लिए यह लगभग 2×10^2 m/s है। यह किसी चालक में ताँबे के परमाणुओं की यादृच्छिक कंपन चालों को इंगित करता है। ध्यान दीजिए कि इलेक्ट्रॉनों की अपवाह चाल बहुत कम है। साधारण ताप पर यह इलेक्ट्रॉनों की प्रतिरूपी तापीय चाल की लगभग 10^{-5} गुनी होती है।

(ii) चालक के अनुदिश गतिशील विद्युत क्षेत्र की चाल किसी विद्युत चुंबकीय तरंग की चाल अर्थात $3.0 \times 10^8\ m\ s^{-1}$ के बराबर है। (इसके नियम में आप अध्याय 8 में पढ़ेंगे)। इसकी तुलना में अपवाह चाल बहुत ही कम है, 10^{-11} गुणक द्वारा कम।

उदाहरण 3.1

* भौतिकी पाठ्यपुस्तक, कक्षा 11, अध्याय 13 का समीकरण (13.23) देखिए।

© NCERT not to be republished

उदाहरण 3.2

उदाहरण 3.2

(a) उदाहरण 3.1 में कुछ ऐम्पियर धारा के परिसर में किसी इलेक्ट्रॉन की अपवाह गति केवल कुछ mm s^{-1} ही आकलित की गई है। तब परिपथ बंद करते ही लगभग उसी क्षण धारा कैसे स्थापित हो जाती है?

(b) किसी चालक के अंदर इलेक्ट्रॉन अपवाह विद्युत क्षेत्र में इलेक्ट्रॉनों द्वारा अनुभव किए गए बल के कारण उत्पन्न होता है। लेकिन बल द्वारा त्वरण उत्पन्न होना चाहिए। तब इलेक्ट्रॉन अपरिवर्ती औसत अपवाह वेग क्यों प्राप्त कर लेते हैं?

(c) यदि इलेक्ट्रॉन का अपवाह वेग इतना कम है और इलेक्ट्रॉन का आवेश भी कम है तो फिर किसी चालक में हम अधिक मात्रा में धारा कैसे प्राप्त कर सकते हैं?

(d) जब किसी धातु में इलेक्ट्रॉन कम विभव से अधिक विभव की ओर अपवाह करते हैं तो क्या इसका तात्पर्य यह है कि धातु में सभी मुक्त इलेक्ट्रॉन एक ही दिशा में गतिमान हैं?

(e) क्या उत्तरोत्तर संघट्टों (धातु के धनायनों के साथ) के बीच इलेक्ट्रॉनों के पथ (i) विद्युत क्षेत्र की अनुपस्थिति में, (ii) विद्युत क्षेत्र की उपस्थिति में, सरल रेखीय हैं?

हल

(a) पूर्ण परिपथ में विद्युत क्षेत्र लगभग तत्काल स्थापित हो जाता है (प्रकाश के वेग से) जो प्रत्येक बिंदु पर स्थानीय इलेक्ट्रॉन अपवाह उत्पन्न करता है। परिपथ में विद्युत धारा स्थापित होने के लिए यह प्रतीक्षा नहीं करनी पड़ती कि इलेक्ट्रॉन चालक में एक सिरे से दूसरे सिरे तक जाएंगे। फिर भी, धारा स्थायी मान प्राप्त करने में अल्प समय अवश्य लेती है।

(b) प्रत्येक मुक्त इलेक्ट्रॉन त्वरित होता है जिससे उसकी अपवाह चाल तब तक बढ़ती है जब तक वह धातु के धनायनों से संघट्ट नहीं करता। संघट्ट के पश्चात यह अपनी अपवाह चाल खो देता है। पर यह पुनः त्वरित होता है तथा पुनः इसके अपवाह वेग में तब तक वृद्धि होती है जब यह पुनः संघट्ट नहीं करता और यह क्रम चलता रहता है। अतः औसतन इलेक्ट्रॉन केवल अपवाह चाल प्राप्त कर पाता है।

(c) सरल है, क्योंकि चालक में इलेक्ट्रॉन संख्या घनत्व अत्यधिक ($\sim 10^{29}\ \text{m}^{-3}$) है।

(d) किसी प्रकार नहीं। इलेक्ट्रॉनों की अपवाह चाल उनके अत्यधिक यादृच्छिक वेग पर अध्यारोपित होती है।

(e) विद्युत क्षेत्र की अनुपस्थिति में पथ ऋजु-रेखीय हैं जबकि विद्युत क्षेत्र की उपस्थिति में पथ व्यापक रूप से वक्रित होते हैं।

3.5.1 गतिशीलता

जैसा कि हम देख चुके हैं, चालकता गतिमान आवेश वाहकों से उत्पन्न होती है। धातुओं में यह गतिमान आवेश वाहक इलेक्ट्रॉन हैं, आयनित गैस में ये इलेक्ट्रॉन तथा धन आवेशित आयन हैं, विद्युत अपघट्य में ये धनायन तथा ऋणायन दोनों हो सकते हैं।

एक महत्वपूर्ण राशि *गतिशीलता* μ है जिसे प्रति एकांक विद्युत क्षेत्र के अपवाह वेग के परिमाण के रूप में परिभाषित करते हैं

$$\mu = \frac{|\mathbf{v}_d|}{E} \tag{3.24}$$

गतिशीलता का SI मात्रक m^2/Vs है और इसके प्रायोगिक मात्रक (cm^2/Vs) का 10^4 गुना है। गतिशीलता धनात्मक होती है। समीकरण (3.17) में,

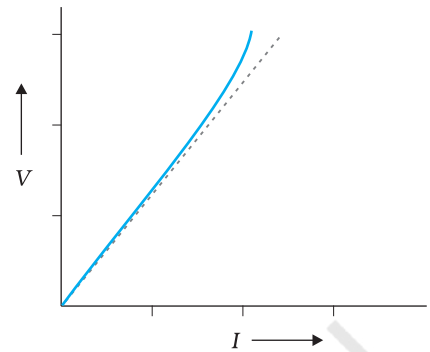
© NCERT not to be republished

$$v_d = \frac{e\,\tau\,E}{m}$$

अत:

$$\mu = \frac{v_d}{E} = \frac{e\,\tau}{m} \quad (3.25)$$

जहाँ τ इलेक्ट्रॉन के लिए संघट्टन का औसत समय है।



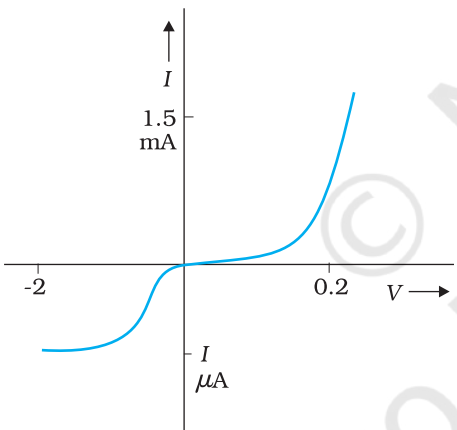
चित्र 3.5 बिंदुकित रेखा रैखिक ओम-नियम को निरूपित करती है। सतत रेखा अच्छे चालक के लिए V तथा I के संबंध को दर्शाती है।

3.6 ओम के नियम की सीमाएँ

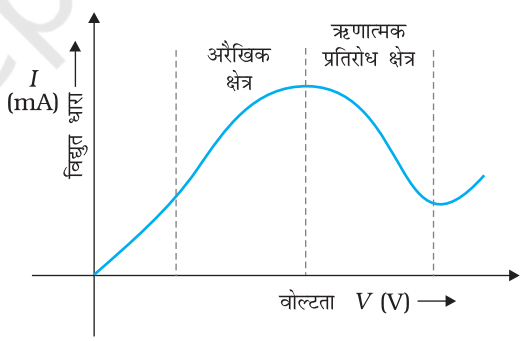
यद्यपि ओम का नियम पदार्थों के विस्तृत वर्ग के लिए मान्य है, विद्युत परिपथों में उपयोग होने वाले कुछ ऐसे पदार्थ एवं युक्तियाँ विद्यमान हैं जहाँ V तथा I की आनुपातिकता लागू नहीं होती है। मोटे तौर पर, यह विचलन निम्नलिखित एक या अधिक प्रकार का हो सकता है

(a) V की I से आनुपातिकता समाप्त हो जाती है (चित्र 3.5)

(b) V तथा I के मध्य संबंध V के चिह्न पर निर्भर करता है। दूसरे शब्दों में, यदि कुछ V के लिए धारा I है, तो V का परिमाण स्थिर रख कर इसकी दिशा बदलने पर, विपरीत दिशा में I के समान परिमाण की धारा उत्पन्न नहीं होती है (चित्र 3.6)। उदाहरण के लिए, डायोड में ऐसा होता है जिसका अध्ययन हम अध्याय 14 में करेंगे।



चित्र 3.6 डायोड के अभिलाक्षणिक वक्र। वोल्टता तथा धारा के ऋण व धन मानों के लिए विभिन्न पैमानों को नोट कीजिए।



चित्र 3.7 GaAs में वोल्टता के सापेक्ष धारा में परिवर्तन।

(c) V तथा I के मध्य संबंध एकमात्र संबंध नहीं है अर्थात उसी धारा I के लिए V के एक से अधिक मान हो सकते हैं (चित्र 3.7)।

पदार्थ तथा युक्तियाँ जो समीकरण (3.3) के रूप में ओम के नियम का पालन नहीं करती हैं, यथार्थ में, इलेक्ट्रॉनिक परिपथ में व्यापक रूप से उपयोग की जाती हैं। तथापि इस अध्याय तथा परवर्ती अध्याय में, हम उस पदार्थ में विद्युत धारा का अध्ययन करेंगे जो ओम के नियम का पालन करते हैं।

3.7 विभिन्न पदार्थों की प्रतिरोधकता

विविध सामान्य पदार्थों की प्रतिरोधकता सारणी 3.1 में सूचीबद्ध हैं। प्रतिरोधकता पर निर्भरता तथा

© NCERT not to be republished

उनके बढ़ते हुए मान के अनुसार पदार्थों का वर्गीकरण चालक, अर्धचालक तथा विद्युतरोधी में किया जाता है। धातुओं की प्रतिरोधकता 10^{-8} Ωm से 10^{-6} Ωm के परिसर में होती है। इसके विपरीत मृत्तिका (सिरेमिक), रबर तथा प्लास्टिक जैसे विद्युतरोधी पदार्थ भी हैं जिनकी प्रतिरोधकता, धातुओं की तुलना में 10^{18} गुनी या अधिक है। इन दोनों के मध्य अर्धचालक हैं। इनकी प्रतिरोधकता, तथापि ताप बढ़ाने पर अभिलाक्षणिक रूप से घटती है। अर्धचालक की प्रतिरोधकता उपयुक्त अशुद्धियों को अल्प मात्रा में मिलाने पर कम की जा सकती है। इस अंतिम विशिष्टता का लाभ, इलेक्ट्रॉनिक युक्तियों में उपयोग होने वाले अर्धचालकों के निर्माण में किया जाता है।

सारणी 3.1 कुछ पदार्थों की प्रतिरोधकता

पदार्थ	प्रतिरोधकता, ρ 0°C पर (Ω m)	प्रतिरोधकता का ताप गुणांक α (°C)$^{-1}$; $\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dT}$ 0°C पर
चालक		
चाँदी (सिल्वर)	1.6×10^{-8}	0.0041
ताँबा (कॉपर)	1.7×10^{-8}	0.0068
ऐलुमिनियम	2.7×10^{-8}	0.0043
टंगस्टन	5.6×10^{-8}	0.0045
लोहा (आयरन)	10×10^{-8}	0.0065
प्लैटिनम	11×10^{-8}	0.0039
पारा (मर्करी)	98×10^{-8}	0.0009
निक्रोम (Ni, Fe तथा Cr की मिश्रातु)	$\sim 100 \times 10^{-8}$	0.0004
मैंगनिन	48×10^{-8}	0.002×10^{-3}
अर्धचालक		
कार्बन (ग्रैफाइट)	3.5×10^{-5}	– 0.0005
जर्मेनियम	0.46	– 0.05
सिलिकॉन	2300	– 0.07
विद्युतरोधी		
शुद्ध जल	2.5×10^{5}	
काँच (ग्लास)	$10^{10} - 10^{14}$	
कठोर रबर	$10^{13} - 10^{16}$	
सोडियम क्लोराइड (NaCl)	$\sim 10^{14}$	
संयुक्त स्फटिक (फ्यूज़्ड क्वार्ट्ज़)	$\sim 10^{16}$	

घरेलू या प्रयोगशालाओं में प्रयोग हेतु व्यापारिक दृष्टिकोण से बनाए जाने वाले प्रतिरोधक मुख्यत: दो प्रकार के होते हैं–तार आबद्ध प्रतिरोधक तथा कार्बन प्रतिरोधक। तार आबद्ध प्रतिरोधक किसी मिश्रातु, जैसे मैंगनिन, कान्सटेन्टन, निक्रोम या उनके जैसे तारों को लपेट कर बनाए जाते हैं। बहुधा इन पदार्थों का चयन इस तथ्य से निर्धारित होता है कि इनकी प्रतिरोधकता पर ताप का प्रभाव अपेक्षाकृत नगण्य है।

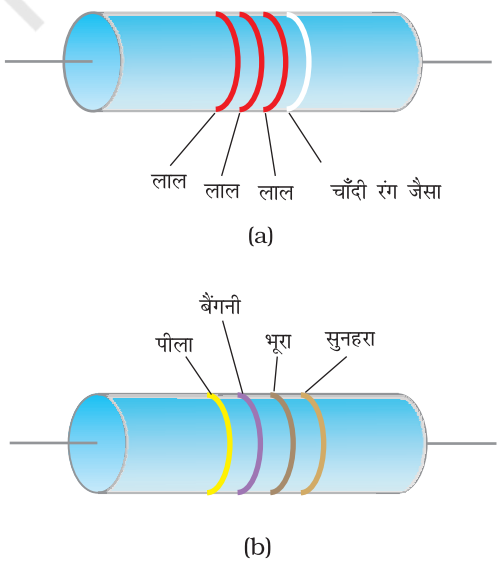
© NCERT not to be republished

इन प्रतिरोधों का परिसर एक ओम के किसी अंश से लेकर कुछ सौ ओम तक होता है। उच्चतर परिसर के प्रतिरोधक मुख्यत: कार्बन से बनाए जाते हैं। कार्बन के प्रतिरोधक सुसंहत और सस्ते होते हैं, इसलिए इलेक्ट्रॉनिक परिपथों में व्यापक रूप से उपयोग किए जाते हैं। कार्बन प्रतिरोधक आमाप में छोटे होते हैं, अत: उनके मान वर्ण कोड के द्वारा व्यक्त किए जाते हैं।

सारणी 3.2 प्रतिरोधक वर्ण कोड

रंग	अंक	गुणक	सह्यता (%)
काला	0	1	
भूरा	1	10^1	
लाल	2	10^2	
नारंगी	3	10^3	
पीला	4	10^4	
हरा	5	10^5	
नीला	6	10^6	
बैंगनी	7	10^7	
धूसर (ग्रे)	8	10^8	
सफेद	9	10^9	
सुनहरा		10^{-1}	5
चाँदी रंग का		10^{-2}	10
वर्णहीन			20

प्रतिरोधक पर समाक्ष रंगीन वलयों का समूह होता है जिनकी सार्थकता सारणी 3.2 में सूचीबद्ध की गई है। सिरे से पहली दो धारियाँ ओम में प्रतिरोध के पहले दो सार्थक अंकों को निर्देशित करती हैं। तीसरी धारी दशमलव गुणक को निर्देशित करती है (जैसा कि सारणी 3.2 में सूचीबद्ध है) तथा अंतिम धारी सह्यता अथवा निर्देशित मान के प्रतिशत में संभावित विचरण को व्यक्त करती है। कभी-कभी यह अंतिम धारी नहीं होती है जिसका आशय यह है कि सह्यता 20% है (चित्र 3.8)। उदाहरण के लिए, यदि चार रंग नारंगी, नीला, पीला और सुनहरा हैं, तो प्रतिरोध का मान 5% सह्यता मान के साथ $36 \times 10^4\ \Omega$ होगा।



चित्र 3.8 वर्ण कोडयुक्त प्रतिरोधक
(a) $22 \times 10^2\Omega \pm 10\%$
(b) $(47 \times 10\Omega) \pm 5\%$

3.8 प्रतिरोधकता की ताप पर निर्भरता

पदार्थ की प्रतिरोधकता ताप पर निर्भर पाई जाती है। विभिन्न पदार्थ एक जैसी निर्भरता प्रदर्शित नहीं करते। एक सीमित ताप परिसर में, जो बहुत अधिक नहीं होता, किसी धात्विक चालक की लगभग प्रतिरोधकता को इस प्रकार व्यक्त करते हैं

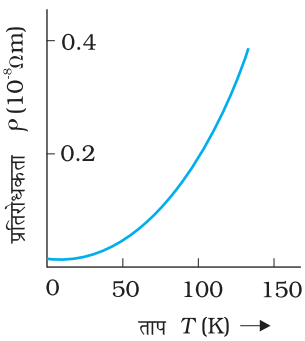
$$\rho_T = \rho_0 [1 + \alpha (T - T_0)] \qquad (3.26)$$

जहाँ ρ_T ताप T पर प्रतिरोधकता है तथा ρ_0 संदर्भ ताप T_0 पर इसका माप है। α को *प्रतिरोधकता ताप-गुणांक* कहते हैं और समीकरण (3.26) से α की विमा $(\text{ताप})^{-1}$ है। धातुओं के लिए α का मान धनात्मक होता है तथा $T_0 = 0°C$ पर कुछ धातुओं के लिए α का मान सारणी 3.1 में सूचीबद्ध है।

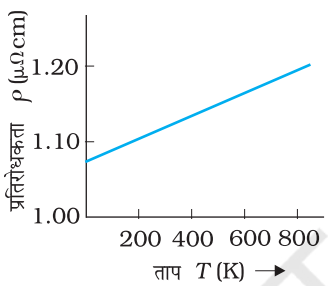
© NCERT not to be republished

समीकरण (3.26) के संबंध से यह ध्वनित होता है कि T और ρ_T के बीच ग्राफ एक सरल रेखा होती है। तथापि, 0°C से बहुत कम तापों पर, ग्राफ एक सरल रेखा से काफी विचलित हो जाता है।

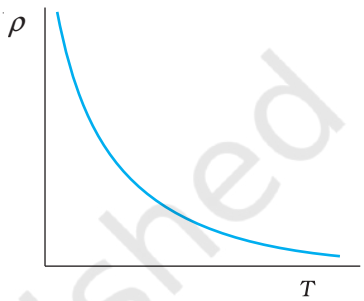
अत: समीकरण (3.26) को किसी संदर्भ ताप T_0 के लगभग किसी सीमित परिसर में उपयोग कर सकते हैं, जहाँ ग्राफ करीब-करीब एक सरल रेखा होगी।



चित्र 3.9 ताप T के फलन के रूप में ताँबे की प्रतिरोधकता ρ_T ।



चित्र 3.10 परम ताप T के फलन के रूप में निक्रोम की प्रतिरोधकता।



चित्र 3.11 विशिष्ट अर्द्धचालक के लिए प्रतिरोधकता की ताप-निर्भरता।

कुछ पदार्थ जैसे कि निक्रोम (जो कि निकैल, लोहा तथा क्रोमियम की मिश्रातु है) बहुत दुर्बल ताप-निर्भरता प्रदर्शित करता है (चित्र 3.10)। मैंगनीन तथा कांसटेंटन में भी इसी प्रकार के गुण हैं। चूँकि इनके प्रतिरोध की ताप-निर्भरता बहुत कम है, इसलिए ये पदार्थ तार आबद्ध मानक प्रतिरोधकों के निर्माण में व्यापक रूप से उपयोग किए जाते हैं।

धातुओं के विपरीत, अर्धचालकों की प्रतिरोधकता ताप में वृद्धि होने पर कम हो जाती है। इस प्रारूपिक निर्भरता को चित्र 3.11 में दर्शाया गया है।

हम समीकरण (3.23) में व्युत्पन्न परिणामों के आधार पर प्रतिरोधकता की ताप-निर्भरता को गुणात्मक रूप में समझ सकते हैं। इस समीकरण से किसी पदार्थ की प्रतिरोधकता व्यक्त की जाती है

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{m}{n e^2 \tau} \qquad (3.27)$$

किसी पदार्थ की प्रतिरोधकता प्रति एकांक आयतन में इलेक्ट्रॉनों की संख्या तथा उसमें होने वाले संघट्टों पर प्रतिलोमी रूप से निर्भर करती है। जैसे-जैसे हम ताप बढ़ाते हैं, विद्युत धारा वहने करने वाले इलेक्ट्रॉनों की औसत चाल बढ़ती जाती है जिसके परिणामस्वरूप संघट्ट की आवृत्ति भी बढ़ती जाती है। इसलिए संघट्टों का औसत समय τ, ताप के साथ घटता है।

धातुओं में n की ताप निर्भरता उपेक्षणीय है, इसलिए ताप बढ़ने से τ के मान के घटने के कारण ρ बढ़ता है, जैसा कि हमने प्रेक्षण किया है।

तथापि, विद्युतरोधियों एवं अर्धचालकों में ताप में वृद्धि के साथ n में भी वृद्धि होती है। यह वृद्धि समीकरण (3.23) में τ में होने वाली किसी भी कमी से भी अधिक की क्षतिपूर्ति करती है जिसके फलस्वरूप ऐसे पदार्थों के लिए प्रतिरोधकता ρ का मान ताप के साथ घट जाता है।

© NCERT not to be republished

उदाहरण 3.3 किसी विद्युत टोस्टर में निक्रोम के तापन अवयव का उपयोग होता है। जब इससे एक नगण्य लघु विद्युत धारा प्रवाहित होती है तो कक्ष ताप पर (27.0 °C) इसका प्रतिरोध 75.3 Ω पाया जाता है। जब इस टोस्टर को 230 V आपूर्ति से संयोजित करते हैं तो कुछ सेकंड में परिपथ में 2.68 A की स्थायी धारा स्थापित हो जाती है। निक्रोम-अवयव का स्थायी ताप क्या है? निक्रोम को सम्मिलित ताप परिसर में प्रतिरोध ताप गुणांक $1.70 \times 10^{-4}\ °C^{-1}$ है।

हल

जब अवयव में धारा बहुत कम है तो तापीय प्रभावों की उपेक्षा की जा सकती है और तब अवयव का ताप T_1 कमरे के ताप के बराबर हो जाता है। जब टोस्टर को आपूर्ति से संयोजित किया जाएगा, तो प्रारंभिक धारा स्थायी मान 2.68 A से कुछ अधिक हो जाएगी। परंतु विद्युत धारा के तापीय प्रभाव के कारण ताप बढ़ेगा। यह प्रतिरोध को बढ़ाएगा फलस्वरूप परिपथ की विद्युत धारा में कुछ कमी उत्पन्न होगी। कुछ सेकंड में स्थायी अवस्था प्राप्त हो जाएगी तथा ताप और नहीं बढ़ेगा। अवयव का प्रतिरोध तथा आपूर्ति से ली गई विद्युत धारा दोनों स्थायी मान प्राप्त कर लेंगे। तब स्थायी ताप T_2 पर प्रतिरोध R_2 का मान

$$R_2 = \frac{230\ V}{2.68\ A} = 85.8\ \Omega$$

संबंध $R_2 = R_1 [1 + \alpha (T_2 - T_1)]$ का उपयोग संबंध

$\alpha = 1.70 \times 10^{-4}\ °C^{-1}$ के साथ करने पर हमें प्राप्त होता है

$$T_2 - T_1 = \frac{(85.8 ? 75.3)}{(75.3) \times 1.70 \times 10^{? 4}} = 820\ °C$$

अर्थात, $T_2 = (820 + 27.0)\ °C = 847\ °C$

इस प्रकार, तापन अवयव का ताप (जब धारा के कारण तापीय प्रभाव प्रतिवेश में हुए ऊष्मा क्षय के बराबर है) 847 °C है।

उदाहरण 3.3

उदाहरण 3.4 प्लैटिनम प्रतिरोध तापमापी के प्लैटिनम के तार का प्रतिरोध हिमांक पर 5 Ω तथा भाप बिंदु पर 5.23 Ω है। जब तापमापी को किसी तप्त-ऊष्मक में प्रविष्ट कराया जाता है तो प्लैटिनम के तार का प्रतिरोध 5.795 Ω हो जाता है। ऊष्मक का ताप परिकलित कीजिए।

हल $R_0 = 5\ \Omega$, $R_{100} = 5.23\ \Omega$ तथा $R_t = 5.795\ \Omega$

अब, $$t = \frac{R_t - R_o}{R_{100} - R_o} \times 100, \qquad R_t = R_o (1 + \alpha t)$$

$$= \frac{5.795 - 5}{5.23 - 5} \times 100$$

$$= \frac{0.795}{0.23} \times 100 = 345.65\ °C$$

उदाहरण 3.4

3.9 विद्युत ऊर्जा, शक्ति

किसी चालक AB पर विचार कीजिए जिसमें A से B की ओर I धारा प्रवाहित हो रही है। A तथा B पर विद्युत विभव क्रमशः V(A) एवं V(B) से निरूपित किए गए हैं। चूँकि धारा A से B की ओर प्रवाहित हो रही है, V(A) > V(B) और चालक AB के सिरों के बीच विभवांतर $V = V(A) - V(B) > 0$ है।

© NCERT not to be republished

Δt काल अंतराल में, आवेश की एक मात्रा $\Delta Q = I\,\Delta t$ A से B की ओर चलती है। परिभाषानुसार बिंदु A पर आवेश की स्थितिज ऊर्जा $Q\,V$(A) थी तथा इसी प्रकार बिंदु B पर आवेश की स्थितिज ऊर्जा $Q\,V$(B) है। इसलिए स्थितिज ऊर्जा में यह परिवर्तन ΔU_{pot} है

ΔU_{pot} = अंतिम स्थितिज ऊर्जा – प्रारंभिक स्थितिज ऊर्जा

$$= \Delta Q[V\,(\mathrm{B}) - V\,(\mathrm{A})] = -\Delta Q\,V$$

$$= -I\,V\Delta t < 0 \qquad (3.28)$$

यदि आवेश चालक के अंदर बिना संघट्ट किए गतिमान हैं तो उनकी गतिज ऊर्जा भी परिवर्तित होती है जिससे कि समस्त ऊर्जा अपरिवर्तित रहे। समस्त ऊर्जा के संरक्षण से यह परिणाम निकलता है कि

$$\Delta K = -\Delta U_{pot} \qquad (3.29)$$

अथवा

$$\Delta K = I\,V\Delta t > 0 \qquad (3.30)$$

अत: चालक के अंदर विद्युत क्षेत्र के प्रभाव से अगर आवेश मुक्त रूप से गतिमान रहते तो उनकी गतिज ऊर्जा बढ़ जाती। तथापि, हमने पहले समझा है कि सामान्य तौर पर, आवेश त्वरित गति से गमन नहीं करते हैं बल्कि अपरिवर्ती अपवाह वेग से चलते हैं। यह पारगमन की अवधि में आयनों तथा परमाणुओं से संघट्ट के कारण होता है। संघट्टों के समय आवेशों द्वारा प्राप्त की गई ऊर्जा, परमाणुओं के साथ आपस में बाँट ली जाती है। परमाणु ज्यादा प्रबल रूप से कंपन करते हैं अर्थात चालक गर्म हो जाते हैं। इस प्रकार एक वास्तविक चालक में काल अंतराल Δt में ऊष्मा के रूप में क्षयित ऊर्जा का परिमाण

$$\Delta W = I\,V\Delta t \qquad (3.31)$$

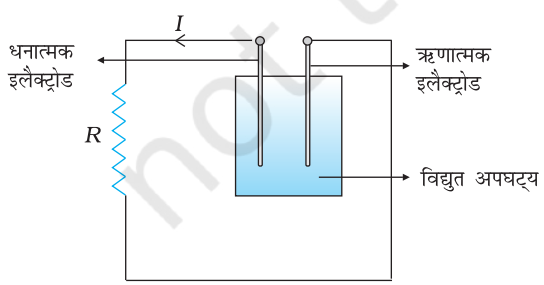
प्रति एकांक समय में क्षय हुई ऊर्जा क्षयित शक्ति के बराबर है $P = \Delta W/\Delta t$ और हम प्राप्त कर सकते हैं

$$P = I\,V \qquad (3.32)$$

ओम के नियम $V = IR$ का उपयोग करने पर हम पाते हैं

$$P = I^2\,R = V^2/R \qquad (3.33)$$

जो कि R प्रतिरोध के चालक जिससे I विद्युत धारा प्रवाहित हो रही है, में होने वाला शक्ति क्षय (ओमी क्षय) है। यह वही शक्ति है जो, उदाहरण के लिए किसी तापदीप्त विद्युत लैंप की कुंडली को प्रदीप्त करती है, जिसके कारण वह ऊष्मा तथा प्रकाश को विकिरण करता है।



चित्र 3.12 सेल के टर्मिनलों से संयोजित प्रतिरोधक में R ऊष्मा उत्पन्न होती है। प्रतिरोधक R में क्षयित ऊर्जा विद्युत अपघट्य की रासायनिक ऊर्जा से आती है।

यह शक्ति कहाँ से आती है? जैसा कि हम पहले स्पष्ट कर चुके हैं कि किसी चालक में स्थायी धारा का प्रवाह बनाए रखने के लिए हमें एक बाह्य स्रोत की आवश्यकता होती है। स्पष्टतया यही स्रोत है जिसे इस शक्ति की आपूर्ति करनी चाहिए। चित्र (3.12) में विद्युत सेल के साथ दर्शाए गए एक सरल परिपथ में यह सेल की ही रासायनिक ऊर्जा है जो इस शक्ति की आपूर्ति जब तक कर सके, करती है।

समीकरणों (3.32) तथा (3.33) में शक्ति के लिए दिए गए व्यंजक से यह स्पष्ट होता है कि किसी प्रतिरोधक R में क्षयित शक्ति उस चालक में प्रवाहित धारा तथा उसके सिरों पर वोल्टता पर किस प्रकार निर्भर करती है।

समीकरण (3.33) का विद्युत शक्ति संचरण में महत्वपूर्ण अनुप्रयोग है। विद्युत शक्ति का संचरण पावर स्टेशन से घरों तथा कारखानों में

© NCERT not to be republished

संचरण केबल द्वारा किया जाता है जो कि सैकड़ों मील दूर हो सकते हैं। स्पष्ट है कि हम पावर स्टेशनों से घरों तथा कारखानों से जोड़ने वाले संचरण केबिल में होने वाले शक्ति क्षय को न्यूनतम करना चाहेंगे। अब समझेंगे कि इसमें हम कैसे सफल हो सकते हैं। एक युक्ति R पर विचार करें जिसमें R_c प्रतिरोध वाले संचरण केबिल से होकर शक्ति P को पहुँचाना है, जिसे अंतिमत: क्षयित होना है यदि R के सिरों के बीच वोल्टता V है और उससे I विद्युत धारा प्रवाहित हो रही है तो

$$P = V I \tag{3.34}$$

पावर स्टेशन से युक्ति को संयोजित करने वाले संयोजी तारों का प्रतिरोध परिमित है और यह R_c है। संयोजक तारों में ऊर्जा क्षय P_c जो कि व्यर्थ व्यय होता है

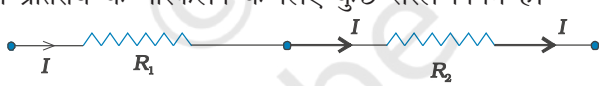
$$P_c = I^2 R_c$$

$$= \frac{P^2 R_c}{V^2} \tag{3.35}$$

समीकरण (3.32) से। अत: शक्ति P की किसी युक्ति को संचालित करने के लिए, संयोजक तार में शक्ति अपव्यय V^2 के व्युत्क्रमानुपाती है। पावर स्टेशन से आने वाले संचरण केबल सैकड़ों मील लंबे होते हैं तथा उनका प्रतिरोध R_c काफी अधिक होता है। संचरण में होने वाले शक्ति-क्षय P_c को कम करने के लिए इन विद्युतवाही तारों में बृहत वोल्टता V पर विद्युत धारा प्रवाहित की जाती है। यही कारण है कि इन शक्ति संचरण लाइनों पर उच्च वोल्टता के खतरे का चिह्न बना होता है, जो कि आबादी वाले क्षेत्र से दूर जाने पर एक सामान्य दृश्य होता है। इतनी उच्च वोल्टता पर विद्युत का प्रयोग सुरक्षित नहीं है। अत: इस धारा की वोल्टता को उपयोग के लिए उपयुक्त मान तक एक युक्ति द्वारा जिसे ट्रांसफार्मर कहते हैं, कम किया जाता है।

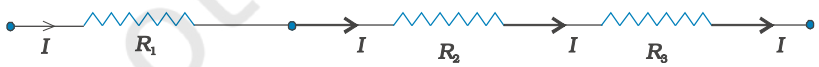
3.10 प्रतिरोधकों का संयोजन-श्रेणी संयोजन तथा पार्श्व संयोजन

ओम के नियम से, एक एकल प्रतिरोधक R जिसके सिरों के मध्य विभवांतर V है, से प्रवाहित धारा $I = V/R$ व्यक्त की जाती है। कभी-कभी प्रतिरोधक एक दूसरे से संयोजित रहते हैं तथा इस प्रकार संयोजनों के तुल्य प्रतिरोध के परिकलन के लिए कुछ सरल नियम हैं।



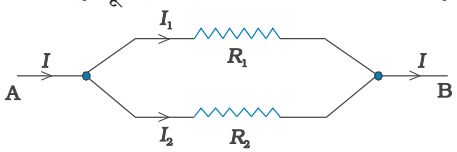
चित्र 3.13 दो प्रतिरोधकों R_1 एवं R_2 का श्रेणी संयोजन।

दो प्रतिरोधक *श्रेणीक्रम* में कहे जाते हैं यदि उनमें से केवल एक अंत्य बिंदु संयोजित होता है (चित्र 3.13)। यदि एक तीसरा प्रतिरोधक, दोनों के श्रेणी संयोजन से जोड़ा जाता है (चित्र 3.14), तो तीनों को श्रेणीक्रम में संयोजित कहते हैं। स्पष्टत: हम इस परिभाषा का विस्तार अनेक प्रतिरोधकों के श्रेणी संयोजन के लिए कर सकते हैं।



चित्र 3.14 तीन प्रतिरोधकों R_1, R_2 एवं R_3 का श्रेणी संयोजन।

दो या अधिक प्रतिरोधक पार्श्व में संयोजित कहे जाते हैं यदि सभी प्रतिरोधकों के एक सिरे आपस में जुड़े हों और उसी तरह दूसरे सिरे भी आपस में संबंधित हों (चित्र 3.15)।



चित्र 3.15 दो प्रतिरोधकों R_1 तथा R_2 का पार्श्व संयोजन।

© NCERT not to be republished

दो प्रतिरोधकों R_1 तथा R_2 के श्रेणी संयोजन पर विचार करते हैं। जो आवेश R_1 से प्रस्थान कर रहा है उसे R_2 में प्रवेश करना चाहिए। चूँकि विद्युत धारा, आवेश के प्रवाह दर की माप है, इसका अर्थ यह है कि यही धारा R_1 तथा R_2 से होकर प्रवाहित हो रही है। ओम के नियम से–

R_1 के मध्य विभवांतर = $V_1 = I R_1$, तथा

R_2 के मध्य विभवांतर = $V_2 = I R_2$

संयोजन के मध्य विभवांतर V, V_1+V_2 के बराबर है। अत:

$$V = V_1 + V_2 = I (R_1 + R_2) \tag{3.36}$$

यह ऐसा है जैसे कि संयोजन का तुल्य प्रतिरोध R_{eq} था, जो कि ओम के नियम से

$$R_{eq} \equiv \frac{V}{I} = (R_1 + R_2) \tag{3.37}$$

यदि हमारे पास तीन प्रतिरोधक श्रेणीक्रम में संयोजित होते तो इसी प्रकार

$$V = I R_1 + I R_2 + I R_3 = I (R_1 + R_2 + R_3) \tag{3.38}$$

स्पष्ट रूप से इसे प्रतिरोधकों की किसी भी संख्या n, R_1, R_2 ....., R_n के श्रेणीक्रम में संयोजन के लिए विस्तार कर सकते हैं। तुल्य प्रतिरोध R_{eq} होगा

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \ldots + R_n \tag{3.39}$$

अब दो प्रतिरोधकों के पार्श्व संयोजन पर विचार करते हैं (चित्र 3.15)। जो आवेश A की बायीं ओर से अंदर प्रवाहित होता है, आंशिक रूप से R_1 से होकर तथा आंशिक रूप से R_2 से होकर बाहर प्रवाहित होता है। चित्र में दर्शायी विद्युत धाराएँ I, I_1, I_2 निर्दिष्ट बिंदुओं पर आवेश प्रवाह की दर हैं। अत:

$$I = I_1 + I_2 \tag{3.40}$$

R_1 पर ओम का नियम लागू करने पर, A तथा B के मध्य विभवांतर

$$V = I_1 R_1 \tag{3.41}$$

इसी तरह, R_2 पर ओम का नियम लागू करने पर

$$V = I_2 R_2 \tag{3.42}$$

$$\therefore I = I_1 + I_2 = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} = V \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \tag{3.43}$$

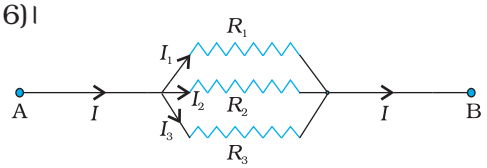
यदि संयोजन को एक तुल्य प्रतिरोध R_{eq} से प्रतिस्थापित करें तो ओम के नियम से हमें प्राप्त होगा

$$I = \frac{V}{R_{eq}} \tag{3.44}$$

अत:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \tag{3.45}$$

हम आसानी से यह समझ सकते हैं कि तीन प्रतिरोधकों के पार्श्वक्रम में इसे कैसे विस्तृत कर सकते हैं चित्र (3.16)।



चित्र 3.16 तीन प्रतिरोधकों R_1, R_2 तथा R_3 का पार्श्व संयोजन।

© NCERT not to be republished

ठीक पहले की तरह

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \tag{3.46}$$

और R_1, R_2 तथा R_3 पर ओम का नियम लागू करने पर हम पाते हैं

$$V = I_1 R_1,\ V = I_2 R_2,\ V = I_3 R_3 \tag{3.47}$$

जिससे कि,

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = V\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right) \tag{3.48}$$

एक समतुल्य प्रतिरोध R_{eq} जो कि संयोजन को प्रतिस्थापित करता है, इस प्रकार होगा कि

$$I = \frac{V}{R_{eq}} \tag{3.49}$$

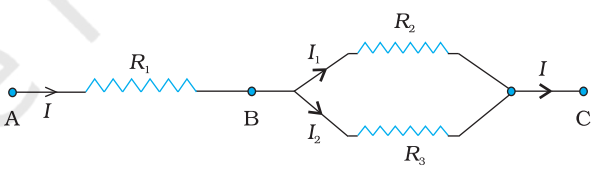
अत:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \tag{3.50}$$

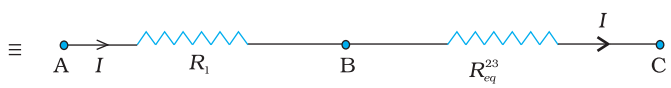
पार्श्व में संयोजित प्रतिरोधकों की किसी भी संख्या के लिए इसी आधार पर हम व्यंजक लिख सकते हैं। पार्श्व में जुड़े n प्रतिरोधकों $R_1, R_2 \ldots, R_n$ का तुल्य प्रतिरोध है

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_3} \tag{3.51}$$

तुल्य प्रतिरोधकों के इन सूत्रों [समीकरण (3.39) तथा समीकरण (3.51)] को अधिक जटिल परिपथों की धारा एवं वोल्टता ज्ञात करने के लिए उपयोग कर सकते हैं। उदाहरण के लिए चित्र (3.17) के परिपथ पर विचार कीजिए, जहाँ तीन प्रतिरोधक R_1, R_2 तथा R_3 हैं। R_2 तथा R_3 पार्श्वक्रम में हैं, अत: हम उन्हें बिंदु B एवं C के मध्य एक तुल्य प्रतिरोध R_{eq}^{23} से प्रतिस्थापित कर सकते हैं



$$\frac{1}{R_{eq}^{23}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$



अथवा, $$R_{eq}^{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \tag{3.52}$$



चित्र 3.17 तीन प्रतिरोधकों R_1, R_2 तथा R_3 का संयोजन। ≡ प्रतिरोधक R_1 के साथ श्रेणीक्रम में संयोजित R_2 तथा R_3 के पार्श्वक्रम का तुल्य प्रतिरोधक R_{eq}^{23} ≡ प्रतिरोधकों R_1, R_2 तथा R_3 का तुल्य प्रतिरोधक R_{eq}^{123}

परिपथ में अब R_1 तथा R_{eq}^{23} श्रेणी संयोजन में हैं, अत: उनके संयोजन को एक तुल्य प्रतिरोध R_{eq}^{123} से प्रतिस्थापित कर सकते हैं

$$R_{eq}^{123} = R_{eq}^{23} + R_1 \tag{3.53}$$

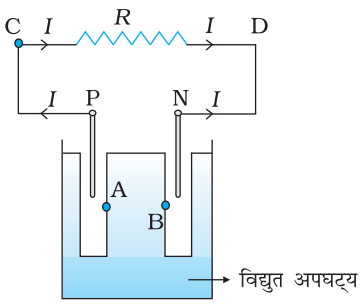
यदि A तथा C के मध्य वोल्टता V है, तो प्राप्त विद्युत धारा का मान

$$I = \frac{V}{R_{eq}^{123}} = \frac{V}{R_1 + \left[R_2 R_3 / (R_2 + R_3)\right]}$$

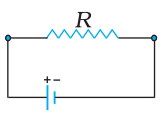
© NCERT not to be republished

$$= \frac{V(R_2 + R_3)}{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3} \qquad (3.54)$$

3.11 सेल, विद्युत वाहक बल (emf), आंतरिक प्रतिरोध



(a)



(b)

चित्र 3.18 (a) धनात्मक टर्मिनल P तथा ऋणात्मक टर्मिनल N के साथ एक विद्युत अपघटनीय सेल का रेखा चित्र। स्पष्टता के लिए इलैक्ट्रोडों के मध्य अंतराल बढ़ाए गए हैं। विद्युत अपघट्य में A तथा B बिंदु प्रारूपिक तौर पर P एवं N के निकट हैं। (b) एक सेल का संकेत। + चिह्न P को तथा – का चिह्न N इलैक्ट्रोड को इंगित करता है। सेल के साथ विद्युतीय संयोजन P तथा N पर बनाए जाते हैं।

हमने पहले ही उल्लेख किया है कि विद्युत अपघटनी सेल विद्युत परिपथ में स्थायी धारा को बनाए रखने के लिए एक सरल युक्ति है। जैसा कि चित्र 3.18 में दिखाया गया है, मूल रूप से एक सेल के दो इलैक्ट्रोड होते हैं, जो कि धनात्मक (P) तथा ऋणात्मक (N) कहलाते हैं। ये एक विद्युत अपघटनी विलयन में डूबे रहते हैं। विलयन में डूबे इलैक्ट्रोड विद्युत अपघट्य के साथ आवेशों का आदान-प्रदान करते हैं। इसके फलस्वरूप धनात्मक इलैक्ट्रोड के ठीक पास विद्युत अपघटनी विलयन के किसी बिंदु A पर [चित्र (3.18(a)] तथा स्वयं इस इलैक्ट्रोड के बीच एक विभवांतर V_+ ($V_+ > 0$) होता है। इसी प्रकार ऋणात्मक इलैक्ट्रोड अपने ठीक पास के विद्युत अपघटनी विलयन के किसी बिंदु B के सापेक्ष एक ऋणात्मक विभव $-(V_-)$ ($V_- \geq 0$) पर हो जाता है। जब कोई विद्युत धारा नहीं प्रवाहित होती है तो समस्त विद्युत अपघटनी विलयन का समान विभव होता है, जिससे कि P तथा N के मध्य विभवांतर $V_+ - (-V_-) = V_+ + V_-$ रहता है। इस अंतर को सेल का *विद्युत वाहक बल* (emf) कहते हैं और इसे ε से निर्दिष्ट करते हैं। इस प्रकार

$$\varepsilon = V_+ + V_- > 0 \qquad (3.55)$$

ध्यान दीजिए कि ε वास्तव में एक विभवांतर है, बल नहीं। तथापि, इसके नाम के लिए विद्युत वाहक बल का उपयोग ऐतिहासिक कारणों से करते हैं और यह नाम उस समय दिया गया था जब यह परिघटना उचित रूप से समझी नहीं गई थी।

ε का महत्त्व समझने के लिए, सेल से संयोजित एक प्रतिरोधक R पर विचार कीजिए (चित्र 3.18)। R से होकर एक विद्युत धारा C से D की ओर प्रवाहित होती है। जैसी कि पहले व्याख्या की जा चुकी है, एक स्थायी धारा बनाए रखी जाती है, क्योंकि विद्युत धारा, विद्युत अपघट्य से होकर N से P की ओर प्रवाहित होती है। स्पष्टत: विद्युत अपघट्य से होकर यही धारा N से P की ओर प्रवाहित होती है जबकि R से होकर यही धारा P से N की ओर प्रवाहित होती है।

जिस विद्युत अपघट्य से होकर यह धारा प्रवाहित होती है उसका एक परिमित प्रतिरोध r होता है, जिसे सेल का आंतरिक प्रतिरोध कहते हैं। पहले हम ऐसी स्थिति पर विचार करें जब R अनंत है जिससे कि $I = V/R = 0$, जहाँ V, P तथा N के मध्य विभवांतर है।

अब,

V = P तथा A के मध्य विभवांतर
+ A तथा B के मध्य विभवांतर
+ B तथा N के मध्य विभवांतर
$= \varepsilon \qquad (3.56)$

अत: विद्युत वाहक बल ε एक खुले परिपथ में (अर्थात जब सेल से होकर कोई धारा नहीं प्रवाहित हो रही है) धनात्मक तथा ऋणात्मक इलैक्ट्रोड के मध्य विभवांतर है।

तथापि, यदि R परिमित है तो I शून्य नहीं होगा। उस स्थिति में P तथा N के मध्य विभवांतर

$$V = V_+ + V_- - Ir$$
$$= \varepsilon - Ir \qquad (3.57)$$

A तथा B के मध्य विभवांतर के लिए व्यजंक (Ir) में ऋणात्मक चिह्न पर ध्यान दीजिए। यह इसलिए है कि विद्युत अपघट्य में धारा I, B से A की ओर प्रवाहित होती है।

प्रायोगिक परिकलनों में, जब धारा I ऐसी है कि $\varepsilon >> Ir$, तब परिपथ में सेल के आंतरिक प्रतिरोध को नगण्य माना जा सकता है। सेल के आंतरिक प्रतिरोध के वास्तविक मान, विभिन्न सेलों

के लिए भिन्न-भिन्न होते हैं। तथापि, शुष्क सेल के लिए आंतरिक प्रतिरोध, सामान्य विद्युत अपघटनी सेल से बहुत अधिक होता है।

हमने यह भी अवलोकन किया है कि जब R से होकर विभवांतर V है तो ओम के नियम से

$$V = I\ R \qquad (3.58)$$

समीकरण (3.57) तथा (3.58) को संयोजित करने पर,

$$I\ R\ = \varepsilon - I\ r$$

अथवा $$I = \frac{\varepsilon}{R + r} \qquad (3.59)$$

$R = 0$ के लिए सेल से अधिकतम धारा प्राप्त की जा सकती है $I_{\text{अधिकतम}} = \varepsilon / r$ तथापि अधिकांश सेलों में अधिकतम अनुमत धारा इससे बहुत कम होती है जिससे सेल को स्थायी क्षति से बचाया जा सके।

बादलों में आवेश

पुरातन काल में तड़ित को अलौलिक उद्‌गम की वायुमंडलीय स्फुर क्षणदीप्ति समझा गया। इसे ईश्वर का महान हथियार माना गया। किन्तु आज तड़ित की परिघटना की, भौतिकी के प्राथमिक सिद्धांतों द्वारा, वैज्ञानिक रूप से व्याख्या की जा सकती है।

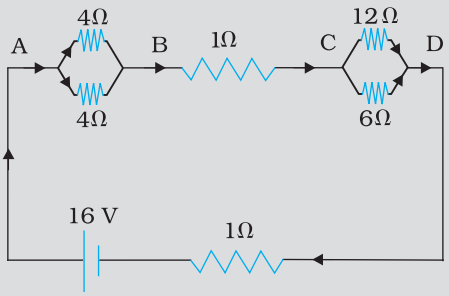
वायुमंडलीय विद्युत, विद्युत आवेशों के पृथक्करण के कारण उत्पन्न होती है। आयनमंडल तथा चुंबकमंडल में सौर पार्थिव पारस्परिक क्रिया से प्रबल विद्युत धारा पैदा होती है। निचले वायुमंडल में धारा दुर्बल होती है तथा तड़ित झंझावत द्वारा पोषित की जाती है।

बादलों में बर्फ के कण होते हैं जो विकसित होते हैं, टकराते हैं, टूटते हैं तथा टुकड़े-टुकड़े होकर पृथक हो जाते हैं। छोटे वाले कण धनात्मक आवेश तथा बड़े वाले ऋणात्मक आवेश प्राप्त करते हैं। ये आवेशित कण बादलों के ऊर्ध्ववाह एवं गुरुत्व के कारण पृथक हो जाते हैं। बादल के ऊपरी भाग धनात्मक तथा मध्य भाग ऋणात्मक आवेशित हो जाते हैं जिसके कारण द्विध्रुव की संरचना होती है। कभी-कभी बादलों के तल पर एक अत्यंत दुर्बल धनावेश पाए जाते हैं। तड़ित झंझावात की परिवृद्धि के समय धरती धनावेशित हो जाती है। साथ ही, अंतरिक्ष तथा रेडियोधर्मी विकिरणें वायु को धन तथा ऋण आयनों में आयनित करती हैं और हवा वैद्युत चालक (दुर्बल रूप से) हो जाती है। धरती तथा बादल के मध्य के अतिरिक्त आवेशों का पृथक्करण बादल के अंदर भी विशाल मात्रा में विद्युत विभव उत्पन्न करता है। यह दसों लाख वोल्ट के बराबर हो सकता है और अंततः वायु में विद्युत प्रतिरोध, भंग हो जाता है तथा तड़ित स्फुर क्षणदीप्ति प्रारंभ हो जाती है एवं हज़ारों ऐम्पियर की धारा प्रवाहित होती है। विद्युत क्षेत्र 10^5 V/m की कोटि का होता है। एक तड़ित स्फुर क्षणदीप्ति औसत रूप से चार वज्रपातों की शृंखलाओं से संगठित होता है तथा प्रत्येक स्फुर क्षणदीप्ति की अवधि लगभग 30 s होती है। प्रति वज्रपात का औसत शीर्ष सामर्थ्य लगभग 10^{12} W होता है।

शुष्क मौसम में भी वायुमंडल में आवेश होते हैं। शुष्क मौसम का विद्युत क्षेत्र, आयनमंडल से धरती के पृष्ठ पर धारा प्रवाह (जो कि पीकोऐम्पियर प्रति वर्गमीटर की कोटि का होता है) के अतिरिक्त धरती पर पृष्ठीय आवेश घनत्व के अस्तित्व तथा वायुमंडलीय चालकता के कारण उत्पन्न होता है। धरती पर पृष्ठीय आवेश ऋणात्मक होता है; विद्युत क्षेत्र अधोमुखी निर्दिष्ट होता है। धरती पर औसत विद्युत क्षेत्र लगभग 120 V/m होता है जो -1.2×10^{-9} C/m^2 पृष्ठीय आवेश घनत्व के संगत है। धरती के समस्त पृष्ठ सतह पर, कुल ऋणात्मक आवेश की मात्रा लगभग 600 kC है। वायुमंडल में बराबर मात्रा में धनात्मक आवेश होते हैं। इस विद्युत क्षेत्र को हम अपने दैनिक जीवन में अनुभव नहीं कर पाते। इसका कारण यह है कि वास्तव में हमारे शरीर सहित, सभी वस्तुएँ वायु की तुलना में चालक हैं।

© NCERT not to be republished

उदाहरण 3.5 चित्र 3.17 में दिखाए गए अनुसार 1 Ω आंतरिक प्रतिरोध के 16 V की एक बैटरी से प्रतिरोधों के एक नेटवर्क को जोड़ा गया है। (a) नेटवर्क के तुल्य प्रतिरोध परिकलित कीजिए। (b) प्रत्येक प्रतिरोधक में धारा का मान ज्ञात कीजिए तथा (c) वोल्टता पात $V_{AB,}$ V_{BC} तथा V_{CD} ज्ञात कीजिए।



चित्र 3.19

हल

(a) नेटवर्क श्रेणी तथा पार्श्वक्रम में संबद्ध प्रतिरोधकों का एक सरल संयोजन है। पहले 4Ω के पार्श्वक्रम में दो प्रतिरोधों का समतुल्य प्रतिरोध = [(4 × 4)/(4 + 4)] Ω = 2 Ω है।
इसी प्रकार, 12 Ω तथा 6 Ω के पार्श्वक्रम में संबद्ध प्रतिरोधकों का समतुल्य प्रतिरोध है [(12 × 6)/(12 + 6)] Ω = 4 Ω
इन दोनों तुल्य प्रतिरोधों (2 Ω तथा 4 Ω) को 1 Ω प्रतिरोधक के साथ श्रेणीक्रम में संयोजित करके नेटवर्क का समतुल्य प्रतिरोध R ज्ञात कर लेते हैं, अर्थात

$$R = 2\ \Omega + 4\ \Omega + 1\ \Omega = 7\ \Omega$$

(b) परिपथ में कुल धारा

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r} = \frac{16V}{(7+1)W} = 2A$$

A व B के मध्य प्रतिरोधकों पर विचार कीजिए। यदि 4 Ω के प्रतिरोधकों में से किसी एक में धारा I_1 है तथा दूसरे में I_2 है तो

$$I_1 \times 4 = I_2 \times 4$$

अर्थात $I_1 = I_2$ जो भुजाओं की सममिति से भी स्पष्ट है। किंतु $I_1 + I_2 = I = 2$ A। इसलिए $I_1 = I_2 = 1$ A अर्थात प्रत्येक 4 Ω प्रतिरोधक में धारा 1 A है। बिंदुओं B तथा C के बीच संयोजित 1 Ω के प्रतिरोधक से प्रवाहित होने वाली धारा का मान 2A है।
पुन: C व D के मध्य प्रतिरोधकों पर विचार कीजिए। यदि 12 Ω प्रतिरोधक में धारा I_3 तथा 6 Ω प्रतिरोधक में धारा I_4 हो, तो

$$I_3 \times 12 = I_4 \times 6, \text{ अर्थात } I_4 = 2I_3$$

किंतु $I_3 + I_4 = I = 2$ A

इस प्रकार $I_3 = \left(\frac{2}{3}\right)$ A, $I_4 = \left(\frac{4}{3}\right)$ A

अर्थात 12 Ω प्रतिरोधक में धारा (2/3) A जबकि 6 Ω प्रतिरोधक में धारा (4/3) A है।

(c) AB के मध्य वोल्टता पात

$$V_{AB} = I_1 \times 4\ \Omega = 1\ \text{A} \times 4\ \Omega = 4\ \text{V}$$

जिसे A व B के मध्य संपूर्ण धारा को A व B के मध्य समतुल्य प्रतिरोध के गुणनफल से भी प्राप्त कर सकते हैं। अर्थात

उदाहरण 3.5

© NCERT not to be republished

$V_{AB} = 2\ A \times 2\ \Omega = 4\ V$

BC के मध्य वोल्टता पात

$V_{BC} = 2\ A \times 1\ \Omega = 2\ V$

अंत में, CD के मध्य वोल्टता पात

$$V_{CD} = 12\ \Omega \times I_3 = 12\ \Omega \times \left(\frac{2}{3}\right) A = 8\ V$$

जिसे C व D के मध्य संपूर्ण धारा को C व D के मध्य समतुल्य प्रतिरोध के गुणनफल से भी प्राप्त कर सकते हैं। अर्थात

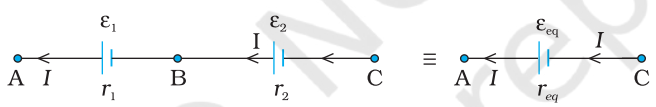
$$V_{CD} = 2\ A \times 4\ \Omega = 8\ V$$

ध्यान दीजिए कि A D के मध्य कुल वोल्टता पात $4\ V + 2\ V + 8\ V = 14\ V$ है। इस प्रकार से बैटरी के सिरों के मध्य वोल्टता 14 V है जबकि विद्युत वाहक बल 16 V है। वोल्टता में क्षति (= 2 V) बैटरी के आंतरिक प्रतिरोध =1 Ω के द्वारा होती है, $2\ A \times 1\ \Omega = 2\ V$।

उदाहरण 3.5

3.12 श्रेणी तथा पार्श्वक्रम में सेल

प्रतिरोधकों की भाँति, विद्युत परिपथ में सेलों को भी संयोजित किया जा सकता है। प्रतिरोधकों की ही भाँति परिपथ में धारा तथा विभवांतर के परिकलन के लिए सेलों के संयोजन को एक तुल्य सेल से प्रतिस्थापित किया जा सकता है।



चित्र 3.20 विद्युत वाहक बल ε_1 तथा ε_2 के दो सेल श्रेणीक्रम में संयोजित हैं। r_1 तथा r_2 उनके आंतरिक प्रतिरोध हैं। A तथा C के मध्य संबंधन के लिए संयोजन को विद्युत वाहक बल ε_{eq} तथा आंतरिक प्रतिरोध r_{eq} के एक सेल के जैसा समझा जा सकता है।

पहले, श्रेणीक्रम में दो सेलों पर विचार करें (चित्र 3.20), जहाँ प्रत्येक के एक टर्मिनल को मुक्त छोड़कर, दोनों सेलों के एक टर्मिनल एक दूसरे से संयोजित हैं। ε_1, ε_2 दोनों सेलों के विद्युत वाहक बल हैं, तथा r_1, r_2 क्रमशः उनके आंतरिक प्रतिरोध हैं।

चित्र 3.20 में दर्शाए अनुसार मानिए बिंदु A, B तथा C पर, विभव क्रमशः V(A), V(B) तथा V(C) हैं। तब V(A) – V(B) पहले सेल के धनात्मक तथा ऋणात्मक टर्मिनल के मध्य विभवांतर है। समीकरण (3.57) में इसे हमने पहले ही परिकलित किया है, अतः

$$V_{AB} \equiv V(A) - V(B) = \varepsilon_1 - I r_1 \qquad (3.60)$$

इसी प्रकार

$$V_{BC} \equiv V(B) - V(C) = \varepsilon_2 - I r_2 \qquad (3.61)$$

अतः संयोजन के टर्मिनल A तथा C के मध्य विभवांतर

$$V_{AC} \equiv V(A) - V(C) = \left[V(A) - V(B)\right] + \left[V(B) - V(C)\right]$$

$$= (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) - I(r_1 + r_2) \qquad (3.62)$$

© NCERT not to be republished

यदि हम संयोजन को A तथा C के मध्य किसी एकल सेल से प्रतिस्थापित करना चाहें जिसका विद्युत वाहक बल ε_{eq} तथा आंतरिक प्रतिरोध r_{eq} हो, तब हमें प्राप्त होता है

$$V_{AC} = \varepsilon_{eq} - Ir_{eq} \quad (3.63)$$

समीकरणों (3.62) तथा (3.63) को संयोजित करने पर

$$\varepsilon_{eq} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (3.64)$$

तथा $r_{eq} = r_1 + r_2$ (3.65)

चित्र 3.20 में हमने पहले सेल के ऋणात्मक इलैक्ट्रोड को दूसरे सेल के धनात्मक इलैक्ट्रोड से संबद्ध किया है। इसके स्थान पर यदि हम दोनों सेलों के ऋणात्मक टर्मिनलों को संबद्ध करें, तो समीकरण (3.61) से $V_{BC} = -\varepsilon_2 - Ir_2$

और हमें प्राप्त होता है:

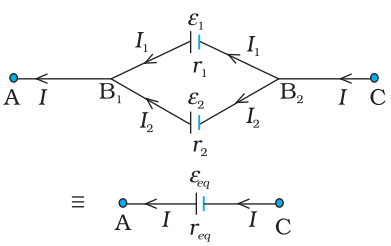
$$\varepsilon_{eq} = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \quad (\varepsilon_1 > \varepsilon_2) \quad (3.66)$$

स्पष्टत: श्रेणी संयोजन के नियम को सेलों की किसी भी संख्या के लिए विस्तारित किया जा सकता है:

(i) n सेलों के श्रेणी संयोजन का तुल्य विद्युत वाहक बल उनके व्यष्टिगत विद्युत वाहक बलों का योग मात्र है, तथा

(ii) n सेल के श्रेणी संयोजन का तुल्य आंतरिक प्रतिरोध उनके आंतरिक प्रतिरोधों का योग मात्र है।

ऐसा तब है, जब धारा प्रत्येक सेल के धनात्मक इलैक्ट्रोड से निकलती है। यदि इस संयोजन में धारा किसी सेल के ऋणात्मक इलैक्ट्रोड से निकले तो ε_{eq} के व्यंजक में, सेल का विद्युत वाहक बल ऋणात्मक चिह्न के साथ सम्मिलित होता है, जैसा कि समीकरण (3.66) में हुआ है।



चित्र 3.21 दो सेलों का पार्श्व संयोजन A तथा C के बीच इस संयोजन को आंतरिक प्रतिरोध r_{eq} तथा विद्युत वाहक बल ε_{eq} (जिनके मान समीकरण (3.73 तथा (3.74) में दिए गए हैं) के किसी एकल सेल से प्रतिस्थापित कर सकते हैं।

अब हम सेलों के पार्श्व संयोजन पर विचार करते हैं। I_1 तथा I_2 सेल के धनात्मक इलैक्ट्रोड से निकलने वाली धाराएँ हैं। दो विद्युत धाराएँ I_1 तथा I_2 बिंदु B_1 पर प्रवेश करती हैं जबकि इस बिंदु से I धारा बाहर निकलती है।

चूँकि उतने ही आवेश अन्दर प्रवाहित होते हैं जितने कि बाहर, हमें प्राप्त होता है

$$I = I_1 + I_2 \quad (3.67)$$

मान लीजिए बिंदुओं B_1 तथा B_2 पर विभव क्रमश: $V(B_1)$ तथा $V(B_2)$ हैं। तब पहले सेल पर विचार करने पर इसके टर्मिनलों के मध्य विभवांतर $V(B_1) - V(B_2)$ होगा। अत: समीकरण (3.57) से

$$V \equiv V(B_1) - V(B_2) = \varepsilon_1 - I_1 r_1 \quad (3.68)$$

बिंदु B_1 तथा B_2 इसी प्रकार ठीक-ठीक दूसरे सेल से भी संबद्ध हैं। अत: यहाँ दूसरे सेल पर विचार करने से हमें प्राप्त होता है

$$V \equiv V(B_1) - V(B_2) = \varepsilon_2 - I_2 r_2 \quad (3.69)$$

पिछले तीनों समीकरणों को संयोजित करने पर

$$I = I_1 + I_2$$

$$= \frac{\varepsilon_1 - V}{r_1} + \frac{\varepsilon_2 - V}{r_2} = \left(\frac{\varepsilon_1}{r_1} + \frac{\varepsilon_2}{r_2}\right) - V\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right) \quad (3.70)$$

इस प्रकार V का मान है

$$V = \frac{\varepsilon_1 r_2 + \varepsilon_2 r_1}{r_1 + r_2} - I\frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \quad (3.71)$$

© NCERT not to be republished

यदि सेलों के इस संयोजन को हम बिंदु B_1 और B_2 के बीच किसी ऐसे एकल सेल से प्रतिस्थापित करें जिसका विद्युत वाहक बल ε_{eq} तथा आंतरिक प्रतिरोध r_{eq} हो तो हमें प्राप्त होता है

$$V = \varepsilon_{eq} - I\, r_{eq} \tag{3.72}$$

समीकरण (3.71) तथा (3.72) समान होने चाहिए, अत:

$$\varepsilon_{eq} = \frac{\varepsilon_1 r_2 + \varepsilon_2 r_1}{r_1 + r_2} \tag{3.73}$$

$$r_{eq} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \tag{3.74}$$

इन समीकरणों को हम और सरल रूप में तरीके से प्रस्तुत कर सकते हैं

$$\frac{1}{r_{eq}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \tag{3.75}$$

$$\frac{\varepsilon_{eq}}{r_{eq}} = \frac{\varepsilon_1}{r_1} + \frac{\varepsilon_2}{r_2} \tag{3.76}$$

चित्र (3.21) में हमने दोनों टर्मिनलों को एक साथ तथा इसी प्रकार दोनों ऋण टर्मिनलों को भी एक साथ संबद्ध किया है जिससे विद्युत धाराएँ I_1 तथा I_2 धन टर्मिनलों से बाहर निकलती हैं। यदि दूसरे का ऋणात्मक टर्मिनल पहले के धनात्मक टर्मिनल से संबद्ध कर दिया जाए, तब भी समीकरण (3.75) तथा (3.76) $\varepsilon_2 \to -\varepsilon_2$ के साथ मान्य होंगे।

समीकरण (3.75) तथा (3.76) को आसानी से विस्तारित किया जा सकता है। यदि हमारे पास n सेल हैं जिनके विद्युत वाहक बल $\varepsilon_1, \ldots \varepsilon_n$ तथा आंतरिक प्रतिरोध $r_1, \ldots r_n$ हैं और वे पार्श्व संबंधन में हैं तो यह संयोजन उस एकल सेल के तुल्य होगा जिसका विद्युत वाहक बल ε_{eq} तथा आंतरिक प्रतिरोध r_{eq} है जिससे कि

$$\frac{1}{r_{eq}} = \frac{1}{r_1} + \cdots + \frac{1}{r_n} \tag{3.77}$$

$$\frac{\varepsilon_{eq}}{r_{eq}} = \frac{\varepsilon_1}{r_1} + \cdots + \frac{\varepsilon_n}{r_n} \tag{3.78}$$

3.13 किरखोफ के नियम

विद्युत परिपथों में कभी-कभी कई प्रतिरोधक एवं सेल जटिल ढंग से संबद्ध होते हैं। श्रेणी एवं पार्श्व संयोजन के लिए जो सूत्र हमने पहले व्युत्पन्न किए हैं, वे परिपथ के सभी विद्युत धाराओं तथा विभवांतरों के लिए हमेशा पर्याप्त नहीं होते। दो नियम, जिन्हें किरखोफ के नियम कहते हैं, विद्युत परिपथों के विश्लेषण में बहुत उपयोगी होते हैं।

दिए गए परिपथ में हम प्रत्येक प्रतिरोधक में प्रवाहित धारा को किसी प्रतीक जैसे I से नामांकित करते हुए और तीर के चिह्न द्वारा प्रतिरोध के अनुदिश धारा के प्रवाह को निर्दिष्ट करते हुए आगे बढ़ते हैं। यदि अंतत: I धनात्मक निर्धारित होता है तो प्रतिरोधक में विद्युत धारा की वास्तविक दिशा, तीर की दिशा में है। यदि यह ऋणात्मक निकलता है, तो वास्तव में विद्युत धारा तीर की दिशा के विपरीत प्रवाहित हो रही है। इसी प्रकार, प्रत्येक स्रोत (अर्थात सेल या विद्युत शक्ति का कोई दूसरा स्रोत) के लिए धनात्मक तथा ऋणात्मक इलैक्ट्रोड को, सेल में प्रवाह हो रही धारा के संकेत के



गुस्ताव रॉबर्ट किरखोफ (1824 – 1887) जर्मनी के भौतिकविज्ञानी हीडलबर्ग एवं बर्लिन में प्रोफ़ेसर रहे। मुख्यत: स्पेक्ट्रमिकी के विकास के लिए जाने जाते हैं। उन्होंने गणितीय भौतिकी में भी काफी महत्वपूर्ण योगदान किया जिसमें परिपथों के लिए प्रथम एवं द्वितीय नियम शामिल हैं।

© NCERT not to be republished

अलावा एक निर्देशित तीर से चिह्नित करते हैं। यह हमें धनात्मक टर्मिनल P तथा ऋणात्मक टर्मिनल N के बीच विभवांतर बताएगा, $V = V(P) - V(N) = \varepsilon - I r$ [समीकरण (3.57), I यहाँ सेल के अंदर N से होकर P की ओर प्रवाहित होने वाली विद्युत धारा है]। यदि सेल से होकर बहने वाली धारा को चिह्नित करते हुए हम P से N की ओर बढ़ते हैं तो स्पष्टत:

$$V = \varepsilon + I r \qquad (3.79)$$

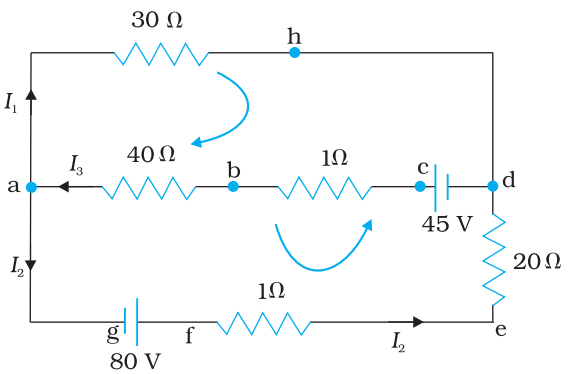
चिह्नों को बनाने कि प्रक्रिया को स्पष्ट करने के बाद अब हम नियमों तथा उपपत्तियों को अभिव्यक्त करेंगे :

(a) संधि नियम–किसी संधि पर संधि से प्रवेश करने वाली विद्युत धाराओं का योग इस संधि से निकलने वाली विद्युत धाराओं के योग के बराबर होता है (चित्र 3.22)।

इस नियम का प्रमाण इस तथ्य से समझते हैं कि जब विद्युत धारा स्थायी होती है, किसी संधि या चालक के किसी बिंदु पर आवेश संचित नहीं होता है। अत: प्रवेश करने वाली कुल विद्युत धाराएँ (जो कि संधि में आवेश के प्रवाह की दर है) बाहर निकलने वाली कुल विद्युत धाराओं के बराबर होती हैं।

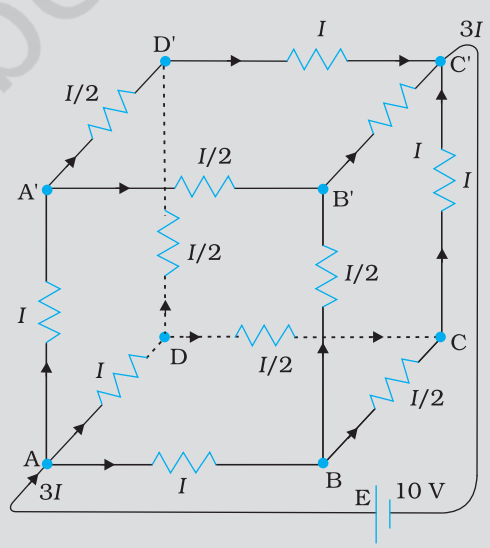
(b) पाश (लूप) नियम–प्रतिरोधकों तथा सेलों से सम्मिलित किसी बंद पाश के चारों ओर विभव में परिवर्तनों का बीजगणितीय योग शून्य होता है (चित्र 3.22)।

यह नियम भी सुस्पष्ट है, क्योंकि विद्युत विभव बिंदु की अवस्थिति पर निर्भर करता है। अत: किसी बिंदु से प्रस्थान कर यदि हम वापस उसी बिंदु पर आते हैं, तो कुल परिवर्तन शून्य होने चाहिए। एक बंद पाश में हम प्रस्थान बिंदु पर वापस आ जाते हैं, यह नियम इसीलिए है।



चित्र 3.22 संधि a पर निकलने वाली विद्युत धारा $I_1 + I_2$ तथा प्रवेश करने वाली विद्युत धारा I_3 है। संधि के नियमानुसार $I_3 = I_1 + I_2$. बिंदु h पर प्रवेश करने वाली धारा I_1 है। h से निकलने वाली भी एक ही धारा है और संधि नियम से, ये भी I_1 होगा। दो पाशों 'ahdcba' तथा 'ahdefga' के लिए पाश नियम प्रदत्त करते हैं $-30I_1 - 41I_3 + 45 = 0$ तथा $-30I_1 + 21I_2 - 80 = 0$

उदाहरण 3.6 10 V तथा नगण्य आंतरिक प्रतिरोध की बैटरी एक घनीय परिपथ जाल (नेटवर्क) के विकर्णत: सम्मुख कोनों से जुड़ी है। परिपथ जाल में 1 Ω प्रतिरोध के 12 प्रतिरोधक हैं (चित्र 3.23)। परिपथ जाल का समतुल्य प्रतिरोध तथा घन के प्रत्येक किनारे के अनुदिश विद्युत धारा ज्ञात कीजिए।



चित्र 3.23

उदाहरण 3.6

© NCERT not to be republished

हल परिपथ जाल को प्रतिरोधकों के सरल श्रेणी एवं पार्श्व संयोजन में परिवर्त्य नहीं किया जा सकता तथापि प्रश्न में स्पष्ट सममिति है जिसके उपयोग द्वारा परिपथ जाल के समतुल्य प्रतिरोध को ज्ञात किया जा सकता है।

AA′, AD तथा AB पथों को परिपथ जाल में सममितीय विधि से रखा गया है। इसलिए प्रत्येक में समान विद्युत धारा, मान लीजिए I प्रवाहित होनी चाहिए। इसके अतिरिक्त A′, B व D सिरों पर आगत धारा I को दो समान निर्गत शाखाओं में टूटना चाहिए। इस प्रकार, घन के सभी 12 किनारों में धारा को सरलतापूर्वक I के पद में लिख सकते हैं। इसमें किरखोफ के प्रथम नियम तथा प्रश्न की सममिति का उपयोग करते हैं।

आगे एक बंद पाश जैसे ABCC′EA लीजिए और उस पर किरखोफ का द्वितीय नियम लागू कीजिए :

$-IR - (1/2)IR - IR + \varepsilon = 0$

यहाँ प्रत्येक किनारे का प्रतिरोध R है तथा बैटरी का विद्युत वाहक बल ε है।

इस प्रकार,

$$\varepsilon = \frac{5}{2} I R$$

परिपथ जाल (नेटवर्क) का समतुल्य प्रतिरोध R_{eq} निम्नवत् है:

$$R_{eq} = \frac{\varepsilon}{3I} = \frac{5}{6} R$$

$R = 1\ \Omega$ के लिए $R_{eq} = (5/6)\ \Omega$ तथा $\varepsilon = 10$ V के लिए, परिपथ जाल (नेटवर्क) में कुल धारा है

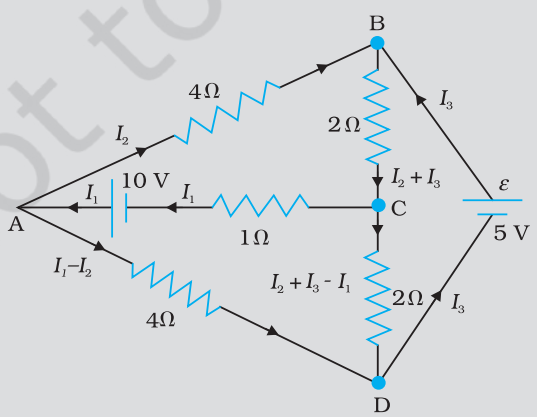
$3I = 10\ \text{V}/(5/6)\ \Omega = 12$ A अर्थात $I = 4$ A

प्रत्येक किनारे में प्रवाहित होने वाली धारा को अब चित्र 3.23 से जाना जा सकता है।

उदाहरण 3.6

इस बात पर ध्यान दिया जाना चाहिए कि परिपथ नेटवर्क की सममिति के कारण उदाहरण 3.6 में किरखोफ के नियमों की विशाल शक्ति का उपयोग नहीं किया गया है। एक सामान्य परिपथ नेटवर्क में सममिति के कारण इस प्रकार का सरलीकरण नहीं होता। इसलिए संधियों एवं बंद पाशों में (इनकी संख्या उतनी होनी चाहिए जितनी कि नेटवर्क में अज्ञात राशियाँ हैं) किरखोफ के नियमों के उपयोग द्वारा समस्या को हल कर सकते हैं। यह उदाहरण 3.7 में स्पष्ट किया गया है।

उदाहरण 3.7 चित्र 3.24 में दिखलाए गए नेटवर्क की प्रत्येक शाखा में धारा ज्ञात कीजिए।



चित्र 3.24

उदाहरण 3.7

© NCERT not to be republished

भौतिकी
किरखोफ के नियमों के अनुप्रयोग के अनुकार
http://www.phys.hawaii.edu/~teb/optics/java/kirch3/

उदाहरण 3.7

हल

नेटवर्क की प्रत्येक शाखा के लिए एक अज्ञात धारा निर्धारित की गयी है जिसे किरखोफ के नियम को लागू कर ज्ञात करना है। प्रारंभ में ही अज्ञातों की संख्या कम करने के लिए प्रत्येक शाखा में अज्ञात विद्युत धारा को निर्दिष्ट करने हेतु किरखोफ के प्रथम नियम का उपयोग करते हैं। इस प्रकार, हमारे पास तीन अज्ञात धाराएँ I_1, I_2 तथा I_3 हैं जिन्हें तीन विभिन्न बंद पाशों में किरखोफ के द्वितीय नियम के उपयोग से ज्ञात कर सकते हैं।

बंद पाश ADCA में किरखोफ के द्वितीय नियम के उपयोग से हमें निम्नलिखित व्यंजक प्राप्त होता है–

$$10 - 4(I_1 - I_2) + 2(I_2 + I_3 - I_1) - I_1 = 0 \qquad [3.80\ (a)]$$

अर्थात $7I_1 - 6I_2 - 2I_3 = 10$

बंद पाश ABCA के लिए हमें प्राप्त होता है

$$10 - 4I_2 - 2(I_2 + I_3) - I_1 = 0$$

अर्थात $I_1 + 6I_2 + 2I_3 = 10 \qquad [3.80\ (b)]$

बंद पाश BCDEB के लिए हमें प्राप्त है

$$5 - 2(I_2 + I_3) - 2(I_2 + I_3 - I_1) = 0$$

अर्थात $2I_1 - 4I_2 - 4I_3 = -5 \qquad [3.80\ (c)]$

समीकरण (a), (b) व (c) तीन युगपत समीकरण हैं जिनमें तीन राशियाँ अज्ञात हैं, इन्हें सामान्य विधि से हल किया जा सकता है। इस प्रकार,

$$I_1 = 2.5\text{A}, \quad I_2 = \frac{5}{8}\ \text{A}, \quad I_3 = 1\frac{7}{8}\ \text{A}$$

परिपथ जाल की विभिन्न शाखाओं में धाराएँ इस प्रकार हैं:

$$\text{AB} : \frac{5}{8}\ \text{A}, \quad \text{CA} : 2\frac{1}{2}\ \text{A}, \quad \text{DEB} : 1\frac{7}{8}\ \text{A}$$

$$\text{AD} : 1\frac{7}{8}\ \text{A}, \quad \text{CD} : 0\ \text{A}, \quad \text{BC} : 2\frac{1}{2}\ \text{A}$$

यह आसानी से सत्यापित किया जा सकता है कि यदि किरखोफ के नियम को शेष बंद पाशों में उपयोग किया जाए तो हमें कोई अन्य स्वतंत्र समीकरण नहीं प्राप्त होगा अर्थात धाराओं के उपरोक्त मान नेटवर्क के हर बंद पाश के लिए द्वितीय नियम को संतुष्ट करेंगे। उदाहरण के तौर पर बंद परिपथ BADEB के लिए कुल वोल्टता पात

$$5\ \text{V} + \left(\frac{5}{8} \times 4\right)\text{V} - \left(\frac{15}{8} \times 4\right)\text{V}$$

शून्य होगा, जैसा कि किरखोफ के द्वितीय नियम द्वारा अपेक्षित है।

3.14 व्हीटस्टोन सेतु

किरखोफ के एक अनुप्रयोग के रूप में चित्र 3.25 में दिखाए परिपथ पर विचार कीजिए, जो कि व्हीटस्टोन सेतु कहलाता है। सेतु में चार प्रतिरोधक R_1, R_2, R_3 तथा R_4 होते हैं। विकर्णत: विपरीत बिंदुओं (चित्र में A तथा C) के एक युग्म से कोई विद्युत स्रोत संबद्ध है। यह (अर्थात AC) बैटरी भुजा कहलाती है। दूसरे दो शीर्ष बिंदुओं, B तथा D के मध्य एक गैल्वेनोमीटर (जो विद्युत धारा के संसूचन की एक युक्ति है) संबद्ध है। यह लाइन, जिसे चित्र में BD से दिखाया गया है, गैल्वेनोमीटर भुजा कहलाती है।

सरलता के लिए हम कल्पना करते हैं कि सेल में कोई आंतरिक प्रतिरोध नहीं है। सामान्यत: G से होकर विद्युत धारा I_g तथा सभी प्रतिरोधकों से होकर भी धारा प्रवाहित होगी। उस संतुलित सेतु का उदाहरण एक विशेष महत्व रखता है जिसमें प्रतिरोधक ऐसे हों कि $I_g = 0$। हम आसानी से ऐसी संतुलन अवस्था प्राप्त कर सकते हैं जिससे G से होकर कोई धारा प्रवाहित नहीं होती। ऐसे प्रकरण में, संधि D तथा B के लिए (चित्र देखिए) किरखोफ के संधि नियम को अनुप्रयुक्त करने

© NCERT not to be republished

पर हमें संबंध $I_1 = I_3$ तथा $I_2 = I_4$ तुरंत प्राप्त हो जाते हैं। उसके बाद, हम बंद पाशों ADBA तथा CBDC पर किरखोफ के पाश नियम को अनुप्रयुक्त करते हैं। पहले पाश से प्राप्त होता है

$$-I_1 R_1 + 0 + I_2 R_2 = 0 \qquad (I_g = 0) \qquad (3.81)$$

तथा $I_3 = I_1$, $I_4 = I_2$ को उपयोग करने पर द्वितीय पाश से प्राप्त होता है

$$I_2 R_4 + 0 - I_1 R_3 = 0 \qquad (3.82)$$

समीकरण (3.81) से हम प्राप्त करते हैं

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

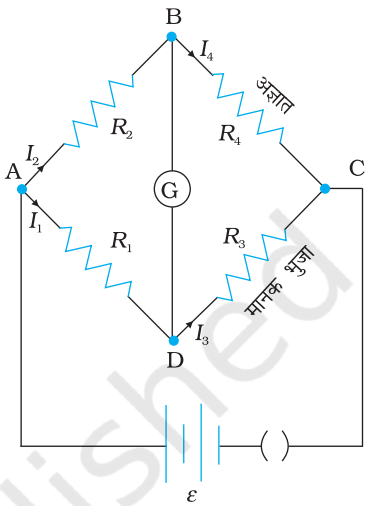
जबकि समीकरण (3.82) से हम प्राप्त करते हैं

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_4}{R_3}$$

अत: हम प्रतिबंध प्राप्त करते हैं।

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3} \qquad [3.83(a)]$$

चार प्रतिरोधकों में संबंध दिखलाने वाले समीकरण [3.83(a)] को गैल्वेनोमीटर में शून्य अथवा नगण्य विक्षेप के लिए *संतुलन प्रतिबंध* कहते हैं।



चित्र 3.25 व्हीटस्टोन सेतु

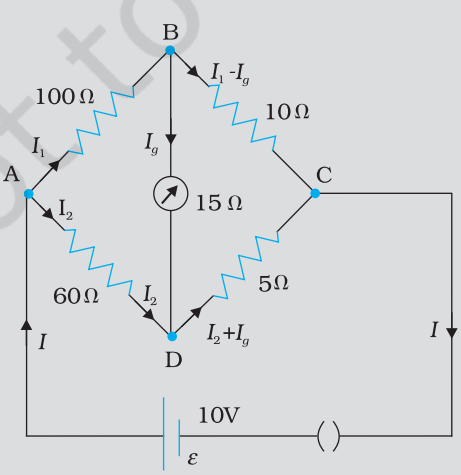
व्हीटस्टोन सेतु तथा इसका संतुलन प्रतिबंध अज्ञात प्रतिरोध के निर्धारण के लिए एक प्रायोगिक विधि देता है। कल्पना कीजिए कि हमारे पास कोई अज्ञात प्रतिरोध है जिसे हम चौथी भुजा में लगाते हैं; इस प्रकार R_4 ज्ञात नहीं है। ज्ञात प्रतिरोधकों R_1 तथा R_2 को सेतु की पहली तथा दूसरी भुजा में रखते हुए, हम R_3 को तब तक परिवर्तित करते जाते हैं जब तक गैल्वेनोमीटर नगण्य विक्षेप नहीं दिखलाता है। सेतु तब संतुलित है तथा संतुलन प्रतिबंध से अज्ञात प्रतिरोध R_4 का मान प्राप्त होता है,

$$R_4 = R_3 \cdot \frac{R_2}{R_1} \qquad [3.83(b)]$$

इस सिद्धांत को उपयोग करने वाली प्रायोगिक युक्ति *मीटर सेतु* कहलाती है। इसकी विवेचना अगले अनुच्छेद में की जाएगी।

उदाहरण 3.8 व्हीटस्टोन सेतु की चार भुजाओं (चित्र 3.26) के प्रतिरोध निम्नवत हैं:

AB = 100 Ω, BC = 10 Ω, CD = 5 Ω तथा DA = 60 Ω।



चित्र 3.26

उदाहरण 3.8

© NCERT not to be republished

उदाहरण 3.8

15 Ω प्रतिरोध के एक गैल्वेनोमीटर को BD के बीच जोड़ा गया है। गैल्वेनोमीटर से प्रवाहित होने वाली धारा को परिकलित कीजिए। AC के मध्य 10 V विभवांतर है।

हल

पाश BADB पर विचार करने पर

$$100\,I_1 + 15\,I_g - 60\,I_2 = 0$$

अथवा $20\,I_1 + 3\,I_g - 12\,I_2 = 0$ [3.84(a)]

पाश BCDB पर विचार करने पर

$$10\,(I - I_g) - 15\,I_g - 5\,(I_2 + I_g) = 0$$

$$10\,I_1 - 30\,I_g - 5\,I_2 = 0$$

$$2\,I_1 - 6\,I_g - I_2 = 0 \qquad [3.84(b)]$$

पाश ADCEA पर विचार करने पर

$$60\,I_2 + 5\,(I_2 + I_g) = 10$$

$$65\,I_2 + 5\,I_g = 10$$

$$13\,I_2 + I_g = 2 \qquad [3.84(c)]$$

समीकरण [3.84(b)] को 10 से गुणा करने पर

$$20\,I_1 - 60\,I_g - 10\,I_2 = 0 \qquad [3.84(d)]$$

समीकरणों [3.84(d)] व [3.84 (a)] से हमें निम्नलिखित व्यंजक प्राप्त होता है

$$63\,I_g - 2\,I_2 = 0$$

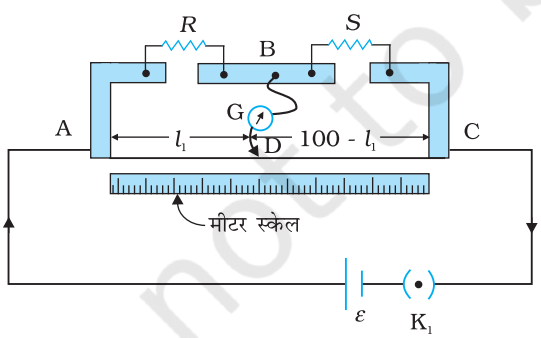
$$I_2 = n\frac{6.0\times10^{23}}{63.5}\times 9.0\times10^{6}\ I_g = 31.5 I_g \qquad [3.84(e)]$$

I_2 के मान को समीकरण [3.84(c)] में स्थानापन्न करने पर

$$13\,(31.5 I_g) + I_g = 2$$

$$410.5\,I_g = 2$$

$$I_g = 4.87\ \text{mA}$$



चित्र 3.27 एक मीटर सेतु तार AC एक मीटर लंबा है। R एक प्रतिरोध है जिसका मापन करना है तथा S एक मापक प्रतिरोध है।

3.15 मीटर सेतु

मीटर सेतु को चित्र 3.27 में दिखाया गया है। यह एक मीटर लंबे एकसमान अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल वाले तार से निर्मित होता है जिसे लंबवत धातु की दो मोटी पट्टिकाओं के मध्य कस दिया जाता है, जैसा कि दिखाया गया है। धात्विक पट्टिका में दो रिक्तियाँ होती हैं जिनके मध्य प्रतिरोधकों को संयोजित किया जा सकता है। अंत्य बिंदु जहाँ तार कसे रहते हैं, एक कुंजी द्वारा सेल से जुड़े रहते हैं। गैल्वेनोमीटर का एक सिरा रिक्तियों के मध्य बीचोबीच धात्विक पट्टिका से जुड़ा रहता है। गैल्वेनोमीटर का दूसरा सिरा जॉकी से जुड़ा रहता है। जॉकी, तत्वत: एक धात्विक छड़ होती है जिसका एक सिरा क्षुर-धार होता है तथा जिसे विद्युत संयोजन बनाने के लिए तार के ऊपर सरका सकते हैं।

R एक अज्ञात प्रतिरोध है जिसका मान हम ज्ञात करना चाहते हैं। इसे दोनों में से किसी एक रिक्ति में संयोजित कर देते हैं। दूसरी रिक्ति के मध्य एक मानक ज्ञात प्रतिरोध S संयोजित करते हैं।

© NCERT not to be republished

जॉकी के तार पर किसी बिंदु D जो कि सिरे A से l cm की दूरी पर है, स्पर्श करते हैं। जॉकी को तार के अनुदिश सरका सकते हैं। तार के AD भाग का प्रतिरोध $R_{cm}l$ है जहाँ R_{cm} तार का प्रति एकांक cm प्रतिरोध है। इस प्रकार DC भाग का प्रतिरोध $R_{cm}(100-l)$ है।

चार भुजाएँ AB, BC, DA तथा CD [जिनके प्रतिरोध क्रमशः R, S, $R_{cm}\,l$ तथा R_{cm} $(100-l)$ हैं] स्पष्टतः, AC बैटरी भुजा तथा BD गैल्वेनोमीटर भुजा के साथ एक व्हीटस्टोन सेतु का निर्माण करते हैं। यदि जॉकी को तार के अनुदिश सरकाया जाता है तो एक स्थान (संतुलन बिंदु) ऐसा आएगा जहाँ गैल्वेनोमीटर कोई धारा नहीं दर्शाएगा। मान लीजिए कि संतुलन बिंदु पर सिरे से जॉकी की दूरी $l = l_1$ है, तब संतुलन बिंदु पर सेतु के चार प्रतिरोधों के मान R, S, $R_{cm}\,l_1$ तथा $R_{cm}(100-l_1)$ हैं। संतुलन प्रतिबंध के लिए समीकरण [3.83(a)] के अनुसार

$$\frac{R}{S}=\frac{R_{cm}\,l_1}{R_{cm}\,(100-l_1)}=\frac{l_1}{100-l_1} \tag{3.85}$$

अतः जैसे ही हम l_1 का मान ज्ञात करते हैं, मानक ज्ञात प्रतिरोध S के पदों में अज्ञात प्रतिरोध R का मान प्राप्त हो जाता है।

$$R=S\,\frac{l_1}{100-l_1} \tag{3.86}$$

S के विभिन्न मानों को चुनने पर हमें l_1 के विभिन्न मान प्राप्त होते हैं और हर बार R का परिकलन करते हैं। निस्संदेह l_1 के मापन में त्रुटि के परिणामस्वरूप R में त्रुटि आ जाएगी। यह दिखाया जा सकता है कि संतलुन बिंदु को सेतु के तार के मध्य के समीप अर्थात l_1 को 50 cm के निकट रखकर समायोजित करने से (इसके लिए S का उचित चुनाव करना आवश्यक है) R में प्रतिशत त्रुटि को न्यूनतम किया जा सकता है।

उदाहरण 3.9 चित्र 3.27 में दर्शाए गए मीटर सेतु में बिंदु A से 33.7 cm की दूरी पर शून्य विक्षेप बिंदु प्राप्त होता है। S प्रतिरोध के पार्श्व में 12 Ω के एक अन्य प्रतिरोध संयोजित करने पर शून्य विक्षेप बिंदु 51.9 cm की दूरी पर प्राप्त होता है। R तथा S के मान परिकलित कीजिए।

हल प्रथम शून्य विक्षेप बिंदु से;

$$\frac{R}{S}=\frac{33.7}{66.3} \tag{3.87}$$

प्रतिरोध S के पार्श्व में 12Ω का प्रतिरोध संयोजित करने पर कुल प्रतिरोध S से S_{eq} हो जाता है,

जहाँ $S_{eq}=\dfrac{12S}{S+12}$

तथा नए संतुलन प्रतिबंध से हमें प्राप्त होता है

$$\frac{51.9}{48.1}=\frac{R}{S_{eq}}=\frac{R(S+12)}{12S} \tag{3.88}$$

समीकरण (3.87) से R/S का मान रखने पर

$$\frac{51.9}{48.1}=\frac{S+12}{12}\cdot\frac{33.7}{66.3}$$

S = 13.5Ω समीकरण (3.87) में S का मान रखने पर, R = 6.86 Ω

उदाहरण 3.9

© NCERT not to be republished

3.16 पोटेंशियोमीटर (विभवमापी)

यह एक सर्वतोमुखी उपकरण है। मौलिक रूप से यह एकसमान तार का एक लंबा टुकड़ा है, बहुधा तार की लंबाई कुछ मीटर होती है जिसे किसी मानक सेल (B) के सिरों से संबद्ध करते हैं। वास्तविक बनावट में तार को कभी-कभी एक साथ अगल-बगल रख कर कई टुकड़ों में काट दिया जाता है तथा सिरों पर एक मोटी धात्विक पट्टी जोड़ दी जाती है (चित्र 3.28) । चित्र में तार A से C तक फैली हुई है। छोटा ऊर्ध्वाकार हिस्सा धातु की मोटी पट्टी है जो तार के विभिन्न खंडों को जोड़ती है।

तार से होकर कोई धारा I प्रवाहित होती है जो परिपथ में एक धारा नियंत्रक द्वारा परिवर्तित की जा सकती है। चूँकि तार एकसमान है अत: अंत्य A तथा A से l की दूरी पर स्थित किसी बिंदु के बीच विभवांतर

$$\varepsilon(l) = \phi l \qquad (3.89)$$

जहाँ ϕ, प्रति एकांक लंबाई वोल्टता पात है।

चित्र 3.28 (a) दो सेलों के विद्युत वाहक बल ε_1 तथा ε_2 की तुलना के लिए पोटेंशियोमीटर का अनुप्रयोग दिखाता है। बिंदु 1, 2, 3 द्विगामी कुंजी की रचना करते हैं। पहले कुंजी की उस स्थिति पर विचार करें जहाँ 1 और 3 संयोजित हैं जिससे कि गैल्वेनोमीटर ε_1 से संबद्ध है। जॉकी को तार के अनुदिश तब तक सरकाया जाता है जब तक A से l_1 की दूरी पर, किसी बिंदु N_1 पर, गैल्वेनोमीटर में कोई विक्षेप नहीं होता है। बंद पाश $AN_1 G 31A$ पर किरखोफ का नियम लागू करने पर हम प्राप्त करते हैं

$$\phi l_1 + 0 - \varepsilon_1 = 0 \qquad (3.90)$$

इसी प्रकार यदि दूसरे विद्युत वाहक बल ε_2 के लिए तार की लंबाई $AN_2 = l_2$ पर संतुलित होता है तो

$$\phi l_2 + 0 - \varepsilon_2 = 0 \qquad (3.91)$$

पिछले दो समीकरणों से

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{l_1}{l_2} \qquad (3.92)$$

इस प्रकार की सरल प्रायोगिक व्यवस्था से दो स्रोतों ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$) के विद्युत वाहक बल की तुलना कर सकते हैं। व्यवहार में, दोनों में से एक सेल का चुनाव मानक सेल के रूप में किया जाता है। इस मानक सेल का जिसका विद्युत वाहक बल उच्च कोटि की परिशुद्धता से ज्ञात करते हैं। तब समीकरण (3.92) से दूसरे सेल के विद्युत वाहक बल को आसानी से परिकलित किया जा सकता है।

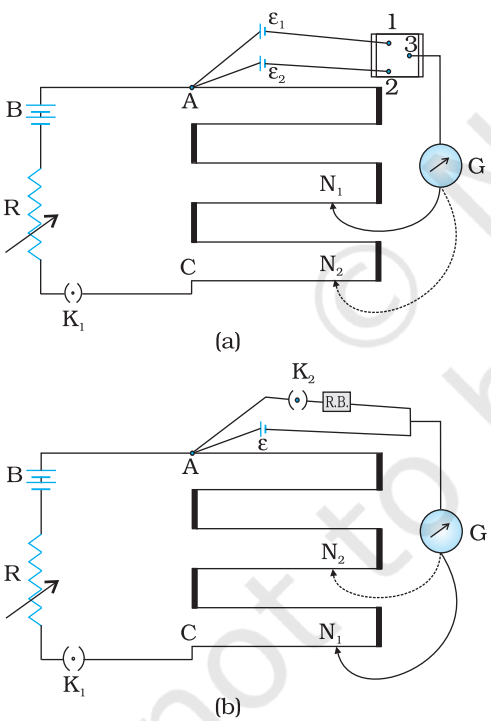
विभवमापी को हम किसी सेल के आंतरिक प्रतिरोध के मापन के लिए भी उपयोग कर सकते हैं [चित्र 3.28 (b)] । इसके लिए सेल (emf ε), जिसका आंतरिक प्रतिरोध (r) ज्ञात करना है, को एक कुंजी K_2 को खुला रख कर, लंबाई $AN_1 = l_1$ पर संतुलन प्राप्त करते हैं। तब,

$$\varepsilon = \phi l_1 \qquad [3.93(a)]$$

जब K_2 को बंद करते हैं तो सेल प्रतिरोध बॉक्स (R) से होकर एक धारा I प्रेषित करता है। यदि V सेल का टर्मिनल विभवांतर है तथा संतुलन बिंदु लंबाई $AN_2 = l_2$ पर प्राप्त होता है,

$$V = \phi l_2 \qquad [3.93(b)]$$

अत: हम पाते हैं, $\varepsilon/V = l_1/l_2$ [3.94(a)]



चित्र 3.28 एक पोटेंशियोमीटर, G एक गैल्वनोमीटर तथा R एक धारा नियंत्रक है। 1, 2, 3 द्विमार्गी कुंजी के सिरे हैं (a) दो सेल के विद्युत वाहक बलों की तुलना के लिए परिपथ (b) सेल का आंतरिक प्रतिरोध ज्ञात करने के लिए परिपथ।

© NCERT not to be republished

किंतु, $\varepsilon = I\,(r + R)$ तथा $V = IR$. हमें प्राप्त होता है

$$\varepsilon/V = (r+R)/R \qquad [3.94(b)]$$

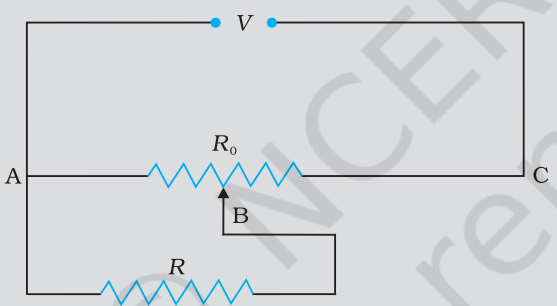
समीकरण [3.94(a)] तथा [3.94(b)] से हम प्राप्त करते हैं

$$(R+r)/R = l_1/l_2$$

$$r = R\left(\frac{l_1}{l_2} - 1\right) \qquad (3.95)$$

समीकरण (3.95) का उपयोग करके हम दिए गए सेल के आंतरिक प्रतिरोध ज्ञात कर सकते हैं। पोटेंशियोमीटर को उपयोग करने का एक लाभ यह है कि यह मापन किए जा रहे विभव स्रोत से कोई *धारा* प्राप्त नहीं करता है। इसलिए इसके द्वारा किए गए मापन स्रोत के आंतरिक प्रतिरोध द्वारा प्रभावी नहीं होते।

उदाहरण 3.10 $R\ \Omega$ का कोई प्रतिरोध एक पोटेंशियोमीटर से विद्युत धारा प्राप्त कर रहा है पोटेंशियोमीटर का कुल प्रतिरोध $R_0\ \Omega$ है (चित्र 3.29)। पोटेंशियोमीटर को वोल्टता V की आपूर्ति की गयी है। जब सर्पी संपर्क (सरकने वाला भाग या स्लाइड) पोटेंशियोमीटर के तार के मध्य में हो तो R के सिरों पर वोल्टता के लिए व्यंजक प्राप्त कीजिए।



चित्र 3.29

हल

जब जॉकी पोटेंशियोमीटर के तार के मध्य में है तो इस तार की आधी लंबाई का कुल प्रतिरोध $(R_0/2)$ होगा। अब चूँकि A व B के बीच R_0 तथा R पार्श्वक्रम में हैं, अतः उनके बीच का तुल्य प्रतिरोध R_1 बिंदुओं A व B के मध्य केवल उसके आधे बीच का कुल प्रतिरोध $(R_0/2)$ होगा। R_1 निम्नलिखित व्यंजक द्वारा दिया जाएगा,

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R} + \frac{1}{(R_0/2)}$$

$$R_1 = \frac{R_0 R}{R_0 + 2R}$$

इस प्रकार A व C के मध्य कुल प्रतिरोध A व B के मध्य तथा B व C के मध्य के प्रतिरोधों के योग के बराबर होगा अर्थात यह $R_1 + R_0/2$ होगा।

पोटेंशियोमीटर से प्रवाहित होने वाली धारा निम्नलिखित होगी

$$I = \frac{V}{R_1 + R_0/2} = \frac{2V}{2R_1 + R_0}$$

पोटेंशियोमीटर से ली गयी वोल्टता V_1 धारा I तथा प्रतिरोध R_1 के गुणनफल के बराबर होती है

$$V_1 = I\,R_1 = \left(\frac{2V}{2R_1 + R_0}\right) \times R_1$$

उदाहरण 3.10

© NCERT not to be republished

उदाहरण 3.10

R_1 का मान रखने पर हमें निम्नलिखित मान मिलता है

$$V_1 = \frac{2V}{2\left(\frac{R_0 \times R}{R_0 + 2R}\right) + R_0} \times \frac{R_0 \times R}{R_0 + 2R}$$

$$V_1 = \frac{2VR}{2R + R_0 + 2R} \quad \text{अथवा} \quad V_1 = \frac{2VR}{R_0 + 4R}$$

सारांश

1. किसी चालक के दिए गए क्षेत्रफल से प्रवाहित *धारा* उस क्षेत्रफल से प्रति एकांक समय में गुज़रने वाला नेट आवेश होता है।
2. एक स्थायी धारा बनाए रखने के लिए हमें एक बंद परिपथ चाहिए जिसमें एक बाह्य स्रोत विद्युत आवेश को निम्न से उच्च स्थितिज ऊर्जा की ओर प्रवाहित कराता है। आवेश को निम्न से उच्च स्थितिज ऊर्जा (अर्थात स्रोत के एक टर्मिनल से दूसरे तक) की ओर ले जाने में स्रोत द्वारा प्रति एकांक आवेश पर किया गया कार्य स्रोत का विद्युत वाहक बल (electromotive force) या *emf* कहलाता है। ध्यान दीजिए कि emf एक बल नहीं है, बल्कि यह खुले परिपथ में स्रोत के दोनों टर्मिनलों के बीच वोल्टता का अंतर है।
3. *ओम का नियम*– किसी चालक में प्रवाहित धारा I उसके सिरों के बीच विभवांतर V के अनुक्रमानुपातिक है अर्थात $V \propto I$ अथवा $V = RI$, जहाँ R को चालक का *प्रतिरोध* कहते हैं। प्रतिरोध का मात्रक ओम है– $1\ \Omega = 1\ \text{V A}^{-1}$
4. चालक के *प्रतिरोध* R, संबंध
$$R = \frac{\rho l}{A}$$
के द्वारा चालक की लंबाई और अनुप्रस्थ काट पर निर्भर है, जहाँ ρ, जिसे *प्रतिरोधकता* कहते हैं, पदार्थ का गुण है जो ताप और दाब पर निर्भर करता है।
5. पदार्थों की *विद्युत प्रतिरोधकता* विस्तृत परिसर में परिवर्तित होती है। धातुओं की प्रतिरोधकता कम ($10^{-8}\ \Omega\ \text{m}$ से $10^{-6}\ \Omega\ \text{m}$ परिसर में) होती है। विद्युतरोधी जैसे काँच या रबर की प्रतिरोधकता 10^{22} से 10^{24} गुना होती है, लघुगणकीय पैमाने पर, अर्द्धचालकों जैसे Si और Ge की प्रतिरोधकता उसके मध्य परिसर में होती है।
6. अधिकतर पदार्थों में धारा के वाहक इलेक्ट्रॉन होते हैं, कुछ स्थितियों उदाहरणार्थ, आयनी क्रिस्टलों और विद्युत अपघट्य, में धारा वहन धनायनों तथा ऋणायनों द्वारा होता है।
7. *धारा घनत्व* **j** प्रति सेकंड प्रति एकांक प्रवाह के अभिलंब, क्षेत्रफल से प्रवाहित आवेश की मात्रा देता है
$$\mathbf{j} = nq\mathbf{v}_d$$
जहाँ n आवेश वाहकों, जिनमें प्रत्येक का आवेश q है, की संख्या घनत्व (प्रति एकांक आयतन में संख्या) तथा आवेश वाहकों का *अपवाह वेग* $\mathbf{v}_d$ है। इलेक्ट्रॉन के लिए $q = -e$ है। यदि **j** एक अनुप्रस्थ काट **A** के अभिलंब है और क्षेत्रफल पर एकसमान है तो क्षेत्रफल में धारा का परिमाण I $(= nev_d A)$ है।
8. $E = V/l$, $I = nev_d A$ और ओम के नियम का उपयोग करते हुए निम्न व्यंजक प्राप्त होता है

© NCERT not to be republished

$$\frac{eE}{m} = \rho \frac{ne^2}{m} v_d$$

यदि हम मान लें कि इलेक्ट्रॉन धातु के आयनों से संघट्ट करते (टकराते) हैं जो उन्हें यादृच्छिकत: विक्षेपित कर देते हैं तो बाह्य बल E के कारण धातु में इलेक्ट्रॉनों पर लगने वाले *बल* eE और अपवाह वेग v_d (त्वरण नहीं) में आनुपातिकता को समझा जा सकता है। यदि ऐसे संघट्ट औसत काल अंतराल τ में होते हैं तो

$$v_d = a\tau = eE\tau/m$$

जहाँ a इलेक्ट्रॉन का त्वरण है। अत:

$$\rho = \frac{m}{ne^2\tau}$$

9. उस ताप परिसर में जिसमें प्रतिरोधकता ताप के साथ रैखिक रूप से बढ़ती है, *प्रतिरोधकता के ताप* गुणांक α को प्रति एकांक ताप वृद्धि से प्रतिरोधकता में भिन्नात्मक वृद्धि के रूप में परिभाषित किया जाता है।
10. ओम के नियम का पालन बहुत से पदार्थ करते हैं परंतु यह प्रकृति का मूलभूत नियम नहीं है। यह असफल है यदि
    (a) V अरैखिक रूप से I पर निर्भर है।
    (b) V के उसी परम मान के लिए V और I में संबंध V के चिह्न पर निर्भर है।
    (c) V और I में संबंध अद्वितीय नहीं है।
    (a) का एक उदाहरण यह है कि जब ρ, I के साथ बढ़ता है (यद्यपि ताप को स्थिर रखते हैं)। एक दिष्टकारी (rectifier) (a) तथा (b) लक्षणों को संयोजित करता है। Ga As (c) लक्षण को दर्शाता है।
11. जब ε विद्युत वाहक बल के एक स्रोत को बाह्य प्रतिरोध R से संयोजित किया जाता है तो R पर वोल्टता $V_{\text{बाह्य}}$ निम्न द्वारा दी जाती है

$$V_{\text{बाह्य}} = IR = \frac{\varepsilon}{R+r} R$$

जहाँ r, स्रोत का आंतरिक प्रतिरोध है।
12. (a) श्रेणी में संयोजित n प्रतिरोधों का कुल प्रतिरोध R

$$R = R_1 + R_2 + ... + R_n$$

(b) पार्श्व में संयोजित n प्रतिरोधों का कुल प्रतिरोध R

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + ... + \frac{1}{R_n}$$

द्वारा दिया जाता है।
13. *किरखोफ के नियम–*
    (a) *प्रथम नियम (संधि नियम)–* परिपथ के अवयवों की किसी संधि पर आगत धाराओं का योग निर्गत धाराओं के योग के तुल्य होना चाहिए।
    (b) *द्वितीय नियम [पाश नियम]–* किसी बंद पाश (लूप) के चारों ओर विभव में परिवर्तन का बीजगणितीय योग शून्य होना चाहिए।
14. *व्हीटस्टोन सेतु* जैसा कि पाठ्यपुस्तक में दिखाया गया है, चार प्रतिरोधों – R_1, R_2, R_3, R_4 का विन्यास है तथा शून्य विक्षेप अवस्था में

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

द्वारा यदि तीन प्रतिरोध ज्ञात हों तो चौथे प्रतिरोध के अज्ञात मान को निर्धारित किया जा सकता है।
15. *पोटेंशियोमीटर* विभवों की तुलना करने वाली एक युक्ति है। चूँकि इस विधि में कोई धारा प्रवाहित न होने वाली स्थिति होती है, यह युक्ति विभवांतर मापने; किसी सेल का आंतरिक प्रतिरोध मापने तथा दो स्रोतों के विद्युत वाहक बल emf की तुलना करने में प्रयुक्त होता है।

© NCERT not to be republished

भौतिक राशि	प्रतीक	विमा	मात्रक	टिप्पणी
विद्युत धारा	I	[A]	A	SI आधारी मात्रक
आवेश	Q, q	[T A]	C	
वोल्टता, विद्युत विभवांतर	V	$[M L^2 T^{-3} A^{-1}]$	V	कार्य/आवेश
विद्युत वाहक बल	ε	$[M L^2 T^{-3} A^{-1}]$	V	कार्य/आवेश
प्रतिरोध	R	$[M L^2 T^{-3} A^{-2}]$	Ω	$R = V/I$
प्रतिरोधकता	ρ	$[M L^3 T^{-3} A^{-2}]$	Ω m	$R = \rho l/A$
वैद्युत चालकता	σ	$[M^{-1} L^{-3} T^3 A^2]$	S	$\sigma = 1/\rho$
विद्युत क्षेत्र	**E**	$[M L T^{-3} A^{-1}]$	V m^{-1}	$\frac{\text{विद्युत बल}}{\text{आवेश}}$
अपवाह चाल	v_d	$[L T^{-1}]$	m s^{-1}	$v_d = \frac{e E \tau}{m}$
विश्रांति काल	τ	[T]	s	
धारा घनत्व	**j**	$[L^{-2} A]$	A m^{-2}	धारा/क्षेत्रफल
गतिशीलता	μ	$[M L^3 T^{-4} A^{-1}]$	$m^2 V^{-1} s^{-1}$	v_d / E

विचारणीय विषय

1. यद्यपि हम धारा की दिशा को परिपथ में एक तीर से दर्शाते हैं परंतु यह एक अदिश राशि है। धाराएँ सदिश योग के नियम का पालन नहीं करतीं। धारा एक अदिश है, इसे इसकी परिभाषा से भी समझ सकते हैं : किसी अनुप्रस्थ काट से प्रवाहित विद्युत धारा I दो सदिशों के अदिश गुणनफल द्वारा व्यक्त की जाती है

$$I = \mathbf{j} \cdot \Delta\mathbf{S}$$

जहाँ **j** तथा $\Delta\mathbf{S}$ सदिश हैं।

2. पाठ्य में प्रदर्शित किसी प्रतिरोधक और किसी डायोड के V-I वक्र पर ध्यान दीजिए। प्रतिरोधक ओम के नियम का पालन करता है जबकि डायोड नहीं करता है। यह दृढ़कथन कि $V = IR$ ओम के नियम का प्रकथन है, सत्य नहीं है। यह समीकरण प्रतिरोध को परिभाषित करता है और इसे सभी चालक युक्तियों में प्रयुक्त कर सकते हैं चाहे वह ओम के नियम का पालन करती हैं या नहीं। ओम का नियम दावा करता है कि V तथा I के बीच ग्राफ रैखिक है अर्थात R, V पर निर्भर नहीं करता है। ओम के नियम का समीकरण

$$\mathbf{E} = \rho\,\mathbf{j}$$

ओम के नियम के दूसरे प्रकथन की ओर ले जाता है, अर्थात कोई चालक पदार्थ तभी ओम के नियम का पालन करता है जब उस पदार्थ की प्रतिरोधकता लगाए गए विद्युत क्षेत्र के परिमाण और दिशा पर निर्भर नहीं करती।

3. समांगी चालक जैसे सिल्वर या अर्द्धचालक जैसे शुद्ध जर्मेनियम या अशुद्धियुक्त जर्मेनियम विद्युत क्षेत्र के मान के कुछ परिसर में ओम के नियम का पालन करते हैं। यदि क्षेत्र अति प्रबल है तो इन सभी उदाहरणों में ओम के नियम का पालन नहीं होगा।

© NCERT not to be republished

4. विद्युत क्षेत्र **E** में इलेक्ट्रॉन की गति (i) यादृच्छिक संघट्टों के कारण (ii) **E** के कारण उत्पन्न गतियों के योग के बराबर है। यादृच्छिक संघट्टों के कारण गति का औसत शून्य हो जाता है और v_d (अपवाह चाल) में योगदान नहीं करता (देखिए अध्याय 11, कक्षा XI की पाठ्यपुस्तक)। इस प्रकार इलेक्ट्रॉन की अपवाह चाल v_d केवल इलेक्ट्रॉन पर लगाए गए विद्युत क्षेत्र के कारण ही है।
5. संबंध $\mathbf{j} = \rho \mathbf{v}$ प्रत्येक प्रकार के आवेश वाहक पर अलग-अलग प्रयुक्त होना चाहिए। किसी चालक तार में कुल धारा तथा धारा घनत्व धन और ऋण दोनों प्रकार के आवेशों से उत्पन्न होती है।

$$\mathbf{j} = \rho_+ \mathbf{v}_+ + \rho_- \mathbf{v}_-$$
$$\rho = \rho_+ + \rho_-$$

एक उदासीन तार जिसमें धारा प्रवाहित हो रही है, में

$$\rho_+ = -\rho_-$$

इसके अतिरिक्त, $\mathbf{v}_+ \sim 0$ है जिसके कारण हमें प्राप्त होता है

$$\rho = 0$$
$$\mathbf{j} = \rho_- \mathbf{v}$$

इस प्रकार संबंध $\mathbf{j} = \rho \mathbf{v}$ कुल धारा आवेश घनत्व पर लागू नहीं होता।
6. किरखोफ का संधि नियम आवेश संरक्षण नियम पर आधारित है : किसी संधि पर निर्गत धाराओं का योग संधि पर आगत धाराओं के योग के तुल्य होता है। तारों को मोड़ने या पुन: अभिविन्यसित करने के कारण किरखोफ के संधि नियम की वैधता नहीं बदलती।

अभ्यास

3.1 किसी कार की संचायक बैटरी का विद्युत वाहक बल 12 V है। यदि बैटरी का आंतरिक प्रतिरोध 0.4 Ω हो, तो बैटरी से ली जाने वाली अधिकतम धारा का मान क्या है?

3.2 10 V विद्युत वाहक बल वाली बैटरी जिसका आंतरिक प्रतिरोध 3 Ω है, किसी प्रतिरोधक से संयोजित है। यदि परिपथ में धारा का मान 0.5 A हो, तो प्रतिरोधक का प्रतिरोध क्या है? जब परिपथ बंद है तो सेल की टर्मिनल वोल्टता क्या होगी?

3.3 (a) 1 Ω, 2 Ω और 3 Ω के तीन प्रतिरोधक श्रेणी में संयोजित हैं। प्रतिरोधकों के संयोजन का कुल प्रतिरोध क्या है?

(b) यदि प्रतिरोधकों का संयोजन किसी 12 V की बैटरी जिसका आंतरिक प्रतिरोध नगण्य है, से संबद्ध है, तो प्रत्येक प्रतिरोधक के सिरों पर वोल्टता पात ज्ञात कीजिए।

3.4 (a) 2 Ω, 4 Ω और 5 Ω के तीन प्रतिरोधक पार्श्व में संयोजित हैं। संयोजन का कुल प्रतिरोध क्या होगा?

(b) यदि संयोजन को 20 V के विद्युत वाहक बल की बैटरी जिसका आंतरिक प्रतिरोध नगण्य है, से संबद्ध किया जाता है, तो प्रत्येक प्रतिरोधक से प्रवाहित होने वाली धारा तथा बैटरी से ली गई कुल धारा का मान ज्ञात कीजिए।

3.5 कमरे के ताप (27.0 °C) पर किसी तापन-अवयव का प्रतिरोध 100 Ω है। यदि तापन-अवयव का प्रतिरोध 117 Ω हो तो अवयव का ताप क्या होगा? प्रतिरोधक के पदार्थ का ताप-गुणांक $1.70 \times 10^{-4}\ °C^{-1}$ है।

3.6 15 मीटर लंबे एवं $6.0 \times 10^{-7}\ m^2$ अनुप्रस्थ काट वाले तार से उपेक्षणीय धारा प्रवाहित की गई और इसका प्रतिरोध 5.0 Ω मापा गया। प्रायोगिक ताप पर तार के पदार्थ की प्रतिरोधकता क्या होगी?

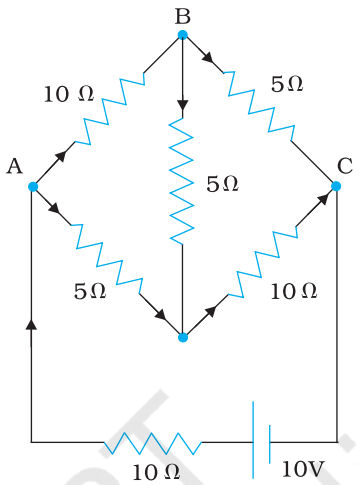
3.7 सिल्वर के किसी तार का 27.5 °C पर प्रतिरोध 2.1 Ω और 100 °C पर प्रतिरोध 2.7 Ω है। सिल्वर की प्रतिरोधकता ताप-गुणांक ज्ञात कीजिए।

3.8 निक्रोम का एक तापन-अवयव 230 V की सप्लाई से संयोजित है और 3.2 A की प्रारंभिक धारा लेता है जो कुछ सेकंड में 2.8 A पर स्थायी हो जाती है। यदि कमरे का ताप 27.0 °C है तो

© NCERT not to be republished

तापन-अवयव का स्थायी ताप क्या होगा? दिए गए ताप-परिसर में निक्रोम का औसत प्रतिरोध का ताप-गुणांक $1.70 \times 10^{-4}\ °C^{-1}$ है।

3.9 चित्र 3.30 में दर्शाए नेटवर्क की प्रत्येक शाखा में प्रवाहित धारा ज्ञात कीजिए।



चित्र 3.30

3.10 (a) किसी मीटर-सेतु में [चित्र 3.27] जब प्रतिरोधक $S = 12.5\Omega$ हो तो संतुलन बिंदु, सिरे A से 39.5 cm की लंबाई पर प्राप्त होता है। R का प्रतिरोध ज्ञात कीजिए। व्हीटस्टोन सेतु या मीटर सेतु में प्रतिरोधकों के संयोजन के लिए मोटी कॉपर की पत्तियाँ क्यों प्रयोग में लाते हैं?

(b) R तथा S को अंतर्बदल करने पर उपरोक्त सेतु का संतुलन बिंदु ज्ञात कीजिए।

(c) यदि सेतु के संतुलन की अवस्था में गैल्वेनोमीटर और सेल को अंतर्बदल कर दिया जाए तब क्या गैल्वेनोमीटर कोई धारा दर्शाएगा?

3.11 8 V विद्युत वाहक बल की एक संचायक बैटरी जिसका आंतरिक प्रतिरोध 0.5 Ω है, को श्रेणीक्रम में 15.5 Ω के प्रतिरोधक का उपयोग करके 120 V के dc स्रोत द्वारा चार्ज किया जाता है। चार्ज होते समय बैटरी की टर्मिनल वोल्टता क्या है? चार्जकारी परिपथ में प्रतिरोधक को श्रेणीक्रम में संबद्ध करने का क्या उद्देश्य है?

3.12 किसी पोटेंशियोमीटर व्यवस्था में, 1.25 V विद्युत वाहक बल के एक सेल का संतुलन बिंदु तार के 35.0 cm लंबाई पर प्राप्त होता है। यदि इस सेल को किसी अन्य सेल द्वारा प्रतिस्थापित कर दिया जाए तो संतुलन बिंदु 63.0 cm पर स्थानांतरित हो जाता है। दूसरे सेल का विद्युत वाहक बल क्या है?

3.13 किसी ताँबे के चालक में मुक्त इलेक्ट्रॉनों का संख्या घनत्व उदाहरण 3.1 में $8.5 \times 10^{28}\ m^3$ आकलित किया गया है। 3 m लंबे तार के एक सिरे से दूसरे सिरे तक अपवाह करने में इलेक्ट्रॉन कितना समय लेता है? तार की अनुप्रस्थ-काट $2.0 \times 10^{-6}\ m^2$ है और इसमें 3.0 A धारा प्रवाहित हो रही है।

अतिरिक्त अभ्यास

3.14 पृथ्वी के पृष्ठ पर ऋणात्मक पृष्ठ-आवेश घनत्व $10^{-9}\ C\ cm^{-2}$ है। वायुमंडल के ऊपरी भाग और पृथ्वी के पृष्ठ के बीच 400 kV विभवांतर (नीचे के वायुमंडल की कम चालकता के कारण) के परिणामत: समूची पृथ्वी पर केवल 1800 A की धारा है। यदि वायुमंडलीय विद्युत

© NCERT not to be republished

क्षेत्र बनाए रखने हेतु कोई प्रक्रिया न हो तो पृथ्वी के पृष्ठ को उदासीन करने हेतु (लगभग) कितना समय लगेगा? (व्यावहारिक रूप में यह कभी नहीं होता है क्योंकि विद्युत आवेशों की पुनः पूर्ति की एक प्रक्रिया है यथा पृथ्वी के विभिन्न भागों में लगातार तड़ित झंझा एवं तड़ित का होना)। (पृथ्वी की त्रिज्या = 6.37×10^6 m)।

3.15 (a) छः लेड एसिड संचायक सेलों को जिनमें प्रत्येक का विद्युत वाहक बल 2 V तथा आंतरिक प्रतिरोध 0.015 Ω है, के संयोजन से एक बैटरी बनाई जाती है। इस बैटरी का उपयोग 8.5 Ω प्रतिरोधक जो इसके साथ श्रेणी संबद्ध है, में धारा की आपूर्ति के लिए किया जाता है। बैटरी से कितनी धारा ली गई है एवं इसकी टर्मिनल वोल्टता क्या है?

(b) एक लंबे समय तक उपयोग में लाए गए संचायक सेल का विद्युत वाहक बल 1.9 V और विशाल आंतरिक प्रतिरोध 380 Ω है। सेल से कितनी अधिकतम धारा ली जा सकती है? क्या सेल से प्राप्त यह धारा किसी कार की प्रवर्तक-मोटर को स्टार्ट करने में सक्षम होगी?

3.16 दो समान लंबाई की तारों में एक ऐलुमिनियम का और दूसरा कॉपर का बना है। इनके प्रतिरोध समान हैं। दोनों तारों में से कौन-सा हलका है? अतः समझाइए कि ऊपर से जाने वाली बिजली केबिलों में ऐलुमिनियम के तारों को क्यों पसंद किया जाता है? ($\rho_{Al} = 2.63 \times 10^{-8}$ Ωm, $\rho_{Cu} = 1.72 \times 10^{-8}$ Ωm, Al का आपेक्षिक घनत्व = 2.7, कॉपर का आपेक्षिक घनत्व = 8.9)

3.17 मिश्रातु मैंगनिन के बने प्रतिरोधक पर लिए गए निम्नलिखित प्रेक्षणों से आप क्या निष्कर्ष निकाल सकते हैं?

धारा A	वोल्टता V	धारा A	वोल्टता V
0.2	3.94	3.0	59.2
0.4	7.87	4.0	78.8
0.6	11.8	5.0	98.6
0.8	15.7	6.0	118.5
1.0	19.7	7.0	138.2
2.0	39.4	8.0	158.0

3.18 निम्नलिखित प्रश्नों के उत्तर दीजिए–

(a) किसी असमान अनुप्रस्थ काट वाले धात्विक चालक से एकसमान धारा प्रवाहित होती है। निम्नलिखित में से चालक में कौन-सी अचर रहती है–धारा, धारा घनत्व, विद्युत क्षेत्र, अपवाह चाल।

(b) क्या सभी परिपथीय अवयवों के लिए ओम का नियम सार्वत्रिक रूप से लागू होता है? यदि नहीं, तो उन अवयवों के उदाहरण दीजिए जो ओम के नियम का पालन नहीं करते।

(c) किसी निम्न वोल्टता संभरण जिससे उच्च धारा देनी होती है, का आंतरिक प्रतिरोध बहुत कम होना चाहिए, क्यों?

(d) किसी उच्च विभव (H.T) संभरण, मान लीजिए 6 kV, का आंतरिक प्रतिरोध अत्यधिक होना चाहिए, क्यों?

3.19 सही विकल्प छाँटिए–

(a) धातुओं की मिश्रातुओं की प्रतिरोधकता प्रायः उनकी अवयव धातुओं की अपेक्षा (अधिक/कम) होती है।

(b) आमतौर पर मिश्रातुओं के प्रतिरोध का ताप-गुणांक, शुद्ध धातुओं के प्रतिरोध के ताप-गुणांक से बहुत कम/अधिक होती है।

(c) मिश्रातु मैंगनिन की प्रतिरोधकता ताप में वृद्धि के साथ लगभग (स्वतंत्र है/तेजी से बढ़ती है)।

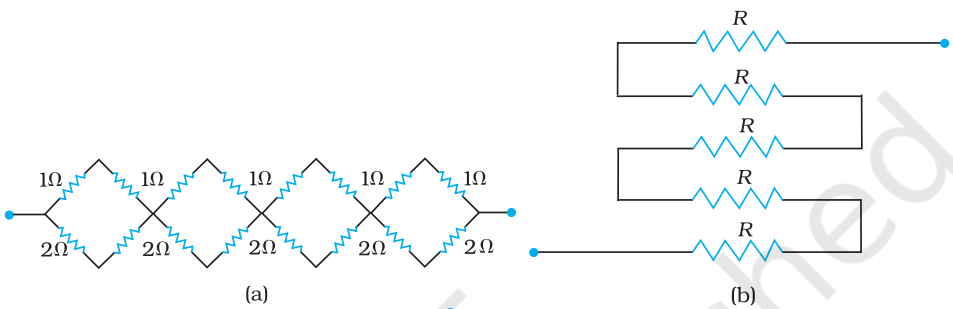
(d) किसी प्रारूपी विद्युतरोधी (उदाहरणार्थ, अंबर) की प्रतिरोधकता किसी धातु की प्रतिरोधकता की तुलना में ($10^{22}/10^{23}$) कोटि के गुणक से बड़ी होती है।

© NCERT not to be republished

3.20 (a) आपको R प्रतिरोध वाले n प्रतिरोधक दिए गए हैं। (i) अधिकतम (ii) न्यूनतम प्रभावी प्रतिरोध प्राप्त करने के लिए आप इन्हें किस प्रकार संयोजित करेंगे? अधिकतम और न्यूनतम प्रतिरोधों का अनुपात क्या होगा?

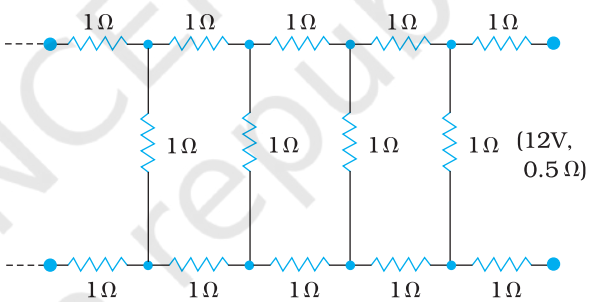
(b) यदि 1 Ω, 2 Ω, 3 Ω के तीन प्रतिरोध दिए गए हों तो उनको आप किस प्रकार संयोजित करेंगे कि प्राप्त तुल्य प्रतिरोध हों : (i) (11/3) Ω (ii) (11/5) Ω, (iii) 6 Ω, (iv) (6/11) Ω ?

(c) चित्र 3.31 में दिखाए गए नेटवर्कों का तुल्य प्रतिरोध प्राप्त कीजिए।



चित्र 3.31

3.21 किसी 0.5 Ω आंतरिक प्रतिरोध वाले 12 V के एक संभरण (supply) से चित्र 3.32 में दर्शाए गए अनंत नेटवर्क द्वारा ली गई धारा का मान ज्ञात कीजिए। प्रत्येक प्रतिरोध का मान 1 Ω है।



चित्र 3.32

3.22 चित्र 3.33 में एक पोटेंशियोमीटर दर्शाया गया है जिसमें एक 2.0 V और आंतरिक प्रतिरोध 0.40 Ω का कोई सेल, पोटेंशियोमीटर के प्रतिरोधक तार AB पर वोल्टता पात बनाए रखता है। कोई मानक सेल जो 1.02 V का अचर विद्युत वाहक बल बनाए रखता है (कुछ mA की बहुत सामान्य धाराओं के लिए) तार की 67.3 cm लंबाई पर संतुलन बिंदु देता है। मानक सेल से अति न्यून धारा लेना सुनिश्चित करने के लिए इसके साथ परिपथ में श्रेणी 600 kΩ का एक अति उच्च प्रतिरोध इसके साथ संबद्ध किया जाता है, जिसके संतुलन बिंदु प्राप्त होने के निकट लघुपथित (shorted) कर दिया जाता है। इसके बाद मानक सेल को किसी अज्ञात विद्युत वाहक बल ε के सेल से प्रतिस्थापित कर दिया जाता है जिससे संतुलन बिंदु तार की 82.3 cm लंबाई पर प्राप्त होता है।

(a) ε का मान क्या है?

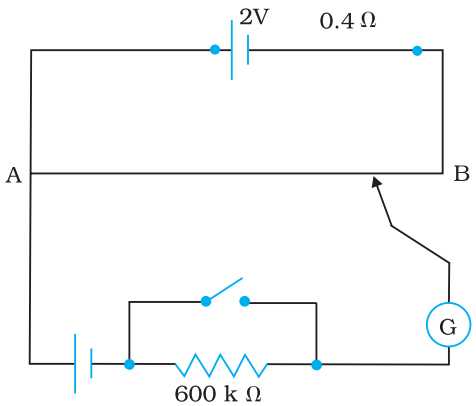
(b) 600 kΩ के उच्च प्रतिरोध का क्या प्रयोजन है?

(c) क्या इस उच्च प्रतिरोध से संतुलन बिंदु प्रभावित होता है?

(d) उपरोक्त स्थिति में यदि पोटेंशियोमीटर के परिचालक सेल का विद्युत वाहक बल 2.0 V के स्थान पर 1.0 V हो तो क्या यह विधि फिर भी सफल रहेगी?

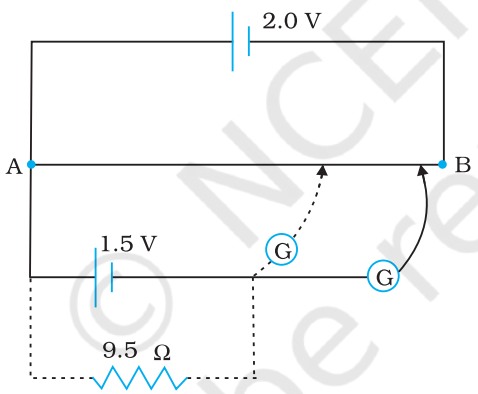
(e) क्या यह परिपथ कुछ mV की कोटि के अत्यल्प विद्युत वाहक बलों (जैसे कि किसी प्रारूपी तापवैद्युत युग्म का विद्युत वाहक बल) के निर्धारण में सफल होगी? यदि नहीं तो आप इसमें किस प्रकार संशोधन करेंगे?

© NCERT not to be republished



चित्र 3.33

3.23 चित्र 3.34 में किसी 1.5 V के सेल का आंतरिक प्रतिरोध मापने के लिए एक 2.0 V का पोटेंशियोमीटर दर्शाया गया है। खुले परिपथ में सेल का संतुलन बिंदु 76.3 cm पर मिलता है। सेल के बाह्य परिपथ में 9.5 Ω प्रतिरोध का एक प्रतिरोधक संयोजित करने पर संतुलन बिंदु पोटेंशियोमीटर के तार की 64.8 cm लंबाई पर पहुँच जाता है। सेल के आंतरिक प्रतिरोध का मान ज्ञात कीजिए।



चित्र 3.34

© NCERT not to be republished

अध्याय 4

गतिमान आवेश और चुंबकत्व

© NCERT not to be republished

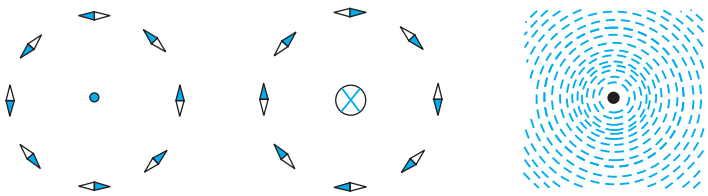
4.1 भूमिका

2000 वर्ष से भी पहले विद्युत तथा चुंबकत्व दोनों ही के बारे में लोगों को ज्ञान था। फिर भी लगभग 200 वर्ष पूर्व, 1820 में* यह स्पष्ट अनुभव किया गया कि इन दोनों में अटूट संबंध है। 1820 की ग्रीष्म ऋतु में, डच भौतिकविज्ञानी हैंस क्रिश्चियन ऑर्स्टेड ने, अपने एक भाषण के दौरान प्रयोग प्रदर्शित करते हुए देखा कि एक सीधे तार में विद्युत धारा प्रवाहित करने पर पास रखी हुई चुंबकीय सुई में सुस्पष्ट विक्षेप प्राप्त होता है। उन्होंने इस परिघटना पर शोध आरंभ किया। उन्होंने पाया कि चुंबकीय सुई तार के अभिलंबवत तल में तार की स्थिति के केंद्रत: वृत्त की स्पर्श रेखा के समांतर संरेखित होती है। इस स्थिति को चित्र 4.1(a) में दर्शाया गया है। पर यह देखने के लिए तार में पर्याप्त धारा प्रवाहित होनी चाहिए और चुंबकीय सुई तार के काफी निकट रखी होनी चाहिए ताकि पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र की उपेक्षा की जा सके। यदि तार में धारा की दिशा विपरीत कर दी जाए तो चुंबकीय सुई भी घूम कर विपरीत दिशा में संरेखित हो जाती है [चित्र 4.1(b) देखिए]। तार में धारा का परिमाण बढ़ाने या सुई को तार के निकट लाने से चुंबकीय सुई का विक्षेप बढ़ जाता है। तार के चारों ओर यदि लौह चूर्ण छिड़कें तो इसके कण तार के चारों ओर संकेंद्री वृत्तों में व्यवस्थित हो जाते हैं [चित्र 4.1(c) देखिए]। इस परिघटना से ऑर्स्टेड ने निष्कर्ष निकाला कि *गतिमान आवेश (धारा) अपने चारों ओर एक चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करते हैं।*

इसके पश्चात प्रयोगों की गति तीव्र हो गई। सन 1864 में विद्युत तथा चुंबकत्व के सर्वमान्य नियमों को जेम्स मैक्सवेल ने एकीकृत करके नए नियम बनाए और यह स्पष्ट अनुभव किया कि

* अध्याय–1 में पृष्ठ 3 पर बॉक्स देखिए।

प्रकाश वास्तव में विद्युत चुंबकीय तरंगें हैं। हर्ट्ज़ ने रेडियो तरंगों की खोज की तथा 19वीं शताब्दी के अंत तक सर जे.सी. बोस तथा मार्कोनी ने इन तरंगों को उत्पन्न किया। 20वीं शताब्दी में विज्ञान तथा प्रौद्योगिकी में आश्चर्यजनक प्रगति हुई है। यह प्रगति विद्युत चुंबकत्व के हमारे बढ़ते ज्ञान तथा विद्युत चुंबकीय तरंगों को उत्पन्न, प्रबर्धित, प्रेषित तथा संसूचित करने वाली युक्तियों की खोज के कारण हुई है।



चित्र 4.1 एक सीधे लंबे धारावाही तार के कारण उत्पन्न चुंबकीय क्षेत्र। तार, कागज़ के तल पर अभिलंबवत है। तार के चारों ओर चुंबकीय सुइयों की एक मुद्रिका बनाई गई है। चुंबकीय सुइयों का अभिविन्यास– (a) जब धारा कागज़ के तल से बाहर की ओर प्रवाहित होती है। (b) जब धारा कागज़ के तल से अंदर की ओर प्रवाहित होती है। (c) लौह चूर्ण कणों का तार के चारों ओर अभिविन्यास। सुइयों के काले सिरे उत्तरी ध्रुव प्रदर्शित करते हैं। यहाँ भू-चुंबकत्व के प्रभाव की उपेक्षा की गई है।

इस अध्याय में हम यह देखेंगे कि चुंबकीय क्षेत्र किस प्रकार आवेशित कणों; जैसे–इलेक्ट्रॉन, प्रोटॉन तथा विद्युत धारावाही तारों पर बल आरोपित करते हैं। हम यह भी सीखेंगे कि विद्युत धाराएँ किस प्रकार चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करती हैं। हम यह देखेंगे कि साइक्लोट्रॉन में किस प्रकार कणों को अति उच्च ऊर्जाओं तक त्वरित किया जा सकता है। हम गैल्वेनोमीटर द्वारा विद्युतधाराओं एवं वोल्टताओं के संसूचन के विषय में भी अध्ययन करेंगे।

इस अध्याय तथा आगे आने वाले चुंबकत्व के अध्यायों में हम निम्नलिखित परिपाटी को अपनाएँगे। कागज़ के तल से बाहर की ओर निर्गत विद्युत धारा अथवा क्षेत्र (विद्युत अथवा चुंबकीय) को एक बिंदु (⊙) द्वारा व्यक्त किया जाता है। कागज़ के तल में भीतर की ओर जाती विद्युत धारा अथवा विद्युत क्षेत्र को एक क्रॉस (⊗)* द्वारा व्यक्त किया जाता है। चित्र 4.1(a) तथा 4.1(b) क्रमशः इन दो स्थितियों के तदनुरूपी हैं।

4.2 चुंबकीय बल

4.2.1 स्रोत और क्षेत्र

किसी चुंबकीय क्षेत्र **B** की अभिधारणा को प्रस्तावित करने से पहले हम संक्षेप में यह दोहराएँगे कि हमने अध्याय 1 के अंतर्गत विद्युत क्षेत्र **E** के विषय में क्या सीखा है। हमने यह देखा है कि दो आवेशों के बीच अन्योन्य क्रिया पर दो चरणों में विचार किया जा सकता है। आवेश Q जोकि विद्युत क्षेत्र का स्रोत है, एक विद्युत क्षेत्र **E** उत्पन्न करता है–



हैंस क्रिश्चियन ऑर्स्टेड (1777–1851) डेनमार्क के भौतिकविज्ञानी एवं रसायनज्ञ, कॉपेनहेगन में प्रोफ़ेसर थे। उन्होंने यह देखा कि किसी चुंबकीय सुई को जब एक ऐसे तार के पास रखा जाता है जिसमें विद्युत धारा प्रवाहित हो रही हो तो उसमें विक्षेप होता है। इस खोज ने वैद्युत एवं चुंबकीय प्रक्रमों के बीच संबंध का पहला आनुभविक प्रमाण प्रस्तुत किया।

हैंस क्रिश्चियन ऑर्स्टेड (1777–1851)

* कोई डाट (बिंदु) आपकी ओर संकेत करते तीर की नोंक जैसा प्रतीत होता है तथा क्रॉस किसी तीर की पंखयुक्त पूँछ जैसा प्रतीत होता है।

© NCERT not to be republished



हेंड्रिक ऐंटून लोरेंज़ (1853 – 1928)

हेंड्रिक ऐंटून लोरेंज़ (1853 – 1928) लोरेंज़ डेनमार्क के सैद्धांतिक भौतिकविज्ञानी, लिडेन में प्रोफ़ेसर थे। उन्होंने विद्युत, चुंबकत्व तथा यांत्रिकी में संबंध की खोज की। प्रकाश उत्सर्जकों पर चुंबकीय क्षेत्र के प्रेक्षित प्रभावों (जीमान प्रभाव) की व्याख्या करने के लिए इन्होंने परमाणु में वैद्युत आवेशों के अस्तित्व होने को अभिगृहीत किया। इसके लिए इन्हें 1902 में नोबेल पुरस्कार प्रदान किया गया। इन्होंने कुछ जटिल उलझन भरे गणितीय तर्कों के आधार पर कुछ रूपांतरण समीकरणों का एक समुच्चय व्युत्पन्न किया जिसे उनके सम्मान में लोरेंज़ रूपांतरण समीकरण कहते हैं। समीकरणों को व्युत्पन्न करते समय इन्हें इस तथ्य के बारे में यह ज्ञात नहीं था कि ये समीकरण काल तथा दिक्स्थान की नयी अभिधारणा पर अवलंबित हैं।

$$\mathbf{E} = Q\,\hat{\mathbf{r}} / (4\pi\varepsilon_0) r^2 \qquad (4.1)$$

यहाँ $\hat{\mathbf{r}}$, $\mathbf{r}$ के अनुदिश एकांक सदिश है तथा क्षेत्र $\mathbf{E}$ एक सदिश क्षेत्र है। कोई आवेश q इस क्षेत्र से अन्योन्य क्रिया करके एक बल $\mathbf{F}$ का अनुभव करता है

$$\mathbf{F} = q\ \mathbf{E} = q Q\,\hat{\mathbf{r}} / (4\pi\varepsilon_0)\, r^2 \qquad (4.2)$$

जैसा कि अध्याय 1 में निर्दिष्ट किया जा चुका है कि विद्युत क्षेत्र $\mathbf{E}$ मात्र शिल्प तथ्य ही नहीं है, परंतु इसकी भौतिक भूमिका भी है। यह ऊर्जा तथा संवेग संप्रेषित कर सकता है तथा यह तत्क्षण ही स्थापित नहीं हो जाता वरन इसके फैलने में परिमित समय लगता है। क्षेत्र की अभिधारणा को फैराडे द्वारा विशेष महत्त्व दिया गया तथा मैक्सवेल ने विद्युत तथा चुंबकत्व को एकीकृत करने में इस अभिधारणा को समावेशित किया। दिक्स्थान में प्रत्येक बिंदु पर निर्भर होने के साथ-साथ यह समय के साथ भी परिवर्तित हो सकता है, अर्थात यह समय का फलन है। इस अध्याय में हम अपनी चर्चा में, यह मानेंगे कि समय के साथ क्षेत्र में परिवर्तन नहीं होता।

किसी विशेष बिंदु पर विद्युत क्षेत्र एक अथवा अधिक आवेशों के कारण हो सकता है। यदि एक से अधिक आवेश हैं तो उनके कारण उत्पन्न क्षेत्र सदिश रूप से संयोजित हो जाते हैं। आप पहले अध्याय में यह सीख ही चुके हैं कि इसे अध्यारोपण का सिद्धांत कहते हैं। एक बार यदि क्षेत्र ज्ञात है तो परीक्षण आवेश पर बल को समीकरण (4.2) द्वारा ज्ञात किया जा सकता है।

जिस प्रकार स्थिर आवेश विद्युत क्षेत्र उत्पन्न करते हैं, विद्युत धाराएँ अथवा गतिमान आवेश (विद्युत क्षेत्र के साथ-साथ) चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करते हैं जिसे $\mathbf{B}(\mathbf{r})$ द्वारा निर्दिष्ट किया जाता है तथा यह भी एक सदिश क्षेत्र है। इसके विद्युत क्षेत्र के समरूप बहुत से मूल गुण हैं। इसे दिक्स्थान के हर बिंदु पर परिभाषित किया जाता है (और साथ ही समय पर निर्भर कर सकता है)। प्रयोगों द्वारा यह पाया गया है कि यह अध्यारोपण के सिद्धांत का पालन करता है। अध्यारोपण का सिद्धांत इस प्रकार है–*बहुत से स्रोतों का चुंबकीय क्षेत्र प्रत्येक व्यष्टिगत स्रोत के चुंबकीय क्षेत्रों का सदिश योग होता है।*

4.2.2 चुंबकीय क्षेत्र, लोरेंज बल

मान लीजिए विद्युत क्षेत्र $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ तथा चुंबकीय क्षेत्र $\mathbf{B}(\mathbf{r})$ दोनों की उपस्थिति में कोई बिंदु आवेश q (वेग $\mathbf{v}$ से गतिमान तथा किसी दिए गए समय t पर $\mathbf{r}$ पर स्थित) विद्यमान है। किसी आवेश q पर इन दोनों क्षेत्रों द्वारा आरोपित बल को इस प्रकार व्यक्त किया जा सकता है–

$$\mathbf{F} = q\,[\mathbf{E}(\mathbf{r}) + \mathbf{v} \times \mathbf{B}(\mathbf{r})] = \mathbf{F}_{\text{विद्युत}} + \mathbf{F}_{\text{चुंबकीय}} \qquad (4.3)$$

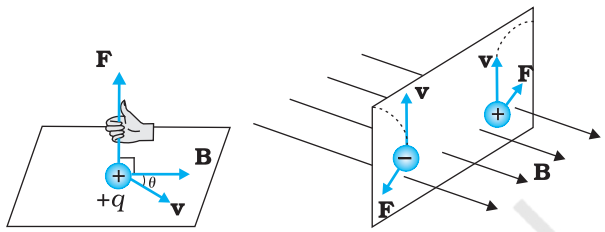
इस बल को सर्वप्रथम एच.ए. लोरेंज ने ऐम्पियर तथा अन्य वैज्ञानिकों द्वारा विस्तृत पैमाने पर किए गए प्रयोगों के आधार पर व्यक्त किया था। इस बल को अब *लोरेंज बल* कहते हैं। विद्युत क्षेत्र के कारण लगने वाले बल के बारे में तो आप विस्तार से अध्ययन कर ही चुके हैं। यदि हम चुंबकीय क्षेत्र के साथ अन्योन्य क्रिया पर ध्यान दें तो हमें निम्नलिखित विशेषताएँ मिलती हैं–

(i) यह q, $\mathbf{v}$ तथा $\mathbf{B}$ (कण के आवेश, वेग तथा चुंबकीय क्षेत्र) पर निर्भर करता है। *ऋणावेश पर लगने वाला बल धनावेश पर लगने वाले बल के विपरीत होता है।*

© NCERT not to be republished

(ii) चुंबकीय बल $q[\mathbf{v} \times \mathbf{B}]$ वेग तथा चुंबकीय क्षेत्र का एक सदिश गुणनफल होता है। सदिश गुणनफल चुंबकीय क्षेत्र के कारण बल को समाप्त (शून्य) कर देता है। यह तब होता है जब बल, वेग तथा चुंबकीय क्षेत्र दोनों के लंबवत होता है (किसी दिशा में)। जब वेग तथा चुंबकीय क्षेत्र की दिशा एक दूसरे के समांतर या प्रतिसमांतर होती है। इसकी दिशा सदिश गुणनफल (क्रास गुणनफल) के लिए चित्र 4.2 में दर्शाए अनुसार पेंच नियम अथवा दक्षिण हस्त नियम द्वारा प्राप्त होती है।

(iii) यदि आवेश गतिमान नहीं है (तब $|\mathbf{v}| = 0$) तो चुंबकीय बल शून्य होता है। केवल गतिमान आवेश ही बल का अनुभव करता है।



(a) (b)

चित्र 4.2 आवेशित कण पर लगे बल की दिशा (a) चुंबकीय क्षेत्र **B** से θ कोण बनाते हुए **v** वेग से गतिमान कोई धनावेशित कण बल का अनुभव करता है जिसकी दिशा दक्षिण हस्त नियम द्वारा प्राप्त होती है। (b) चुंबकीय क्षेत्र की उपस्थिति में गतिशील आवेशित कण के विक्षेप q की दिशा $-q$ के विक्षेप की दिशा के विपरीत होती है।

चुंबकीय क्षेत्र के लिए व्यंजक चुंबकीय क्षेत्र के मात्रक की परिभाषा देने में हमारी सहायता करता है। यदि बल के समीकरण में हल q, **F** तथा **v** सभी का मान एकांक मानें तो $\mathbf{F} = q[\mathbf{v} \times \mathbf{B}] = q\, v\, B \sin\theta\, \hat{\mathbf{n}}$, यहाँ θ वेग **v** तथा चुंबकीय क्षेत्र **B** के बीच का कोण है [चित्र 4.2 (a) देखिए]। चुंबकीय क्षेत्र B का परिमाण 1 SI मात्रक होता है, जबकि किसी एकांक आवेश (1 C), जो कि **B** के लंबवत 1m/s वेग **v** से गतिमान है, पर लगा बल 1 न्यूटन हो।

विमीय रीति से हम जानते हैं कि $[B] = [F/qv]$ तथा **B** का मात्रक न्यूटन सेकंड/कूलॉम मीटर है। इस मात्रक को *टेस्ला* (T) कहते हैं जिसे निकोला टेस्ला (1856–1943) के नाम पर रखा गया है। टेस्ला एक बड़ा मात्रक है। अत: एक अपेक्षाकृत छोटे मात्रक *गाउस* ($=10^{-4}$ टेस्ला) का प्राय: उपयोग किया जाता है। विश्व के चुंबकीय क्षेत्र के विस्तृत परिसर को सारणी 4.1 में दर्शाया गया है

सारणी 4.1 विविध भौतिक परिस्थितियों में चुंबकीय क्षेत्रों के परिमाणों की कोटि

भौतिक परिस्थिति	B का परिमाण (टेस्ला, T में)
न्यूट्रॉन तारे का पृष्ठ	10^{8}
प्रयोगशाला में प्रातिनिधिक उच्च क्षेत्र	1
छोटे छड़ चुंबक के समीप	10^{-2}
पृथ्वी के पृष्ठ पर	10^{-5}
मानव तंत्रिका तंतु	10^{-10}
अंतरातारकीय दिक्स्थान	10^{-12}

4.2.3 विद्युत धारावाही चालक पर चुंबकीय बल

हम किसी एकल गतिमान आवेश पर चुंबकीय क्षेत्र द्वारा आरोपित बल के विश्लेषण का विस्तार विद्युत धारावाही सीधी छड़ के लिए कर सकते हैं। लंबाई l तथा एकसमान अनुप्रस्थ काट A की किसी छड़ पर विचार करते हैं। हम किसी चालक (जिसमें इलेक्ट्रॉन गतिशील वाहक हैं) की भाँति एक ही प्रकार के गतिशील वाहक मानेंगे। मान लीजिए इन गतिशील आवेश वाहकों का संख्या घनत्व n है तब चालक में कुल गतिशील आवेश वाहकों की संख्या nlA हुई। इस चालक छड़ में अपरिवर्ती विद्युत धारा I के लिए हम यह मान सकते हैं कि प्रत्येक गतिशील वाहक का अपवाह वेग $\mathbf{v}_d$ है

© NCERT not to be republished

(अध्याय 3 देखिए)। किसी बाह्य चुंबकीय क्षेत्र **B** की उपस्थिति में इन वाहकों पर बल

$$\mathbf{F} = (nlA)q\,\mathbf{v}_d \times \mathbf{B}$$

यहाँ q किसी वाहक के आवेश का मान है। अब यहाँ $nq\,\mathbf{v}_d$ विद्युत धारा घनत्व **j** तथा $|(nq\,\mathbf{v}_d)|A$ विद्युत धारा I है (विद्युत धारा तथा विद्युत धारा घनत्व पर चर्चा के लिए अध्याय 3 देखिए।) इस प्रकार

$$\mathbf{F} = [(nq\,\mathbf{v}_d)lA] \times \mathbf{B} = [\,\mathbf{j}lA\,] \times \mathbf{B}$$
$$= I\boldsymbol{l} \times \mathbf{B} \qquad (4.4)$$

यहाँ $\boldsymbol{l}$ एक सदिश है जिसका परिमाण l है जो कि छड़ की लंबाई है, तथा इसकी दिशा विद्युत धारा I के सर्वसम है। ध्यान दीजिए विद्युत धारा सदिश नहीं है। समीकरण (4.4) के अंतिम चरण में हमने सदिश चिह्न को **j** से $\boldsymbol{l}$ पर स्थानांतरित कर दिया है।

समीकरण (4.4) सीधी छड़ पर लागू होती है। इस समीकरण में **B** बाह्य चुंबकीय क्षेत्र है। यह विद्युत धारावाही छड़ द्वारा उत्पन्न क्षेत्र नहीं है। यदि तार की यादृच्छिक आकृति है, तो हम इस पर लॉरेंज बल का परिकलन, इसे रेखिक पट्टियों $\mathrm{d}\boldsymbol{l}_j$ का समूह मानकर तथा संकलन द्वारा कर सकते हैं

$$\mathbf{F} = \sum_j I\mathrm{d}\boldsymbol{l}_j \times \mathbf{B}$$

अधिकांश प्रकरणों में संकलन को समाकलन में परिवर्तित कर लेते हैं।

विद्युतशीलता (परावैद्युतांक) तथा चुंबकशीलता (पारगम्यता)

गुरुत्वाकर्षण के सार्वत्रिक नियम में हम यह कहते हैं कि दो बिंदु द्रव्यमान एक दूसरे पर बल आरोपित करते हैं जो उन द्रव्यमानों, m_1, m_2 के गुणनफल के अनुक्रमानुपाती तथा उनके बीच के दूरी r के वर्ग के व्युत्क्रमानुपाती होता है। इसे हम इस प्रकार $F = Gm_1m_2/r^2$ व्यक्त करते हैं, यहाँ G गुरुत्वाकर्षण का सार्वत्रिक नियतांक है। इसी प्रकार स्थिरवैद्युतिकी में कूलॉम के नियम में, हम दो विद्युत आवेशों q_1, q_2 जिनके बीच r पृथकन है, लगने वाले बल को $F = kq_1q_2/r^2$ द्वारा व्यक्त करते हैं, यहाँ k एक अनुक्रमानुपाती स्थिरांक है। SI मात्रकों में, $k\,1/4\pi\varepsilon$ है, यहाँ ε माध्यम की विद्युतशीलता है। इसी प्रकार चुंबकत्व में भी हमें एक अन्य नियतांक प्राप्त होता है। SI मात्रकों में यह नियतांक $\mu/4\pi$ है, यहाँ μ माध्यम की चुंबकशीलता है।

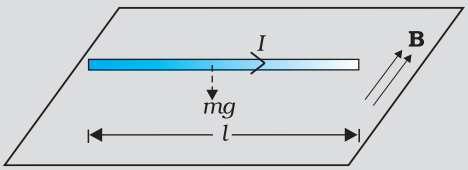
यद्यपि G, ε तथा μ अनुक्रमानुपाती नियतांक के रूप में प्रकट होते हैं, परंतु गुरुत्वाकर्षण बल तथा विद्युत चुंबकीय बल में एक अंतर है। जबकि गुरुत्वाकर्षण बल दो वस्तुओं के बीच के माध्यम की प्रकृति पर निर्भर नहीं करता, विद्युत चुंबकीय बल, दो आवेशों अथवा चुंबकों के बीच के माध्यम पर निर्भर करता है। अतः G एक सार्वत्रिक स्थिरांक है, ε तथा μ माध्यम पर निर्भर करते हैं। इनके विभिन्न माध्यमों के लिए भिन्न-भिन्न मान हैं। गुणनफल $\varepsilon\mu$ का विद्युत चुंबकीय विकिरणों की चाल v से एक संबंध $\varepsilon\mu = 1/v^2$ है।

विद्युत परावैद्युतांक ε एक भौतिक राशि है जो यह स्पष्ट करती है कि कोई विद्युत क्षेत्र माध्यम को तथा माध्यम द्वारा किस प्रकार प्रभावित होता है। इसका निर्धारण अनुप्रयुक्त क्षेत्र के प्रत्युत्तर में माध्य के ध्रुवित होने के गुण, जिसके द्वारा यह किसी पदार्थ के भीतर के क्षेत्र को आंशिक रूप से निरसित करता है, से किया जाता है। इसी प्रकार चुंबकीय पारगम्यता μ किसी पदार्थ की चुंबकीय क्षेत्रों में चुंबकन अर्जित करने की सामर्थ्य होती है। इसकी माप चुंबकीय क्षेत्रों द्वारा पदार्थ को वेधन करने की सीमा से की जाती है।

उदाहरण 4.1

उदाहरण 4.1 200 g द्रव्यमान तथा 1.5 m लंबाई के किसी सीधे तार से 2 A विद्युत धारा प्रवाहित हो रही है। यह किसी एकसमान क्षैतिज **B** चुंबकीय क्षेत्र द्वारा वायु के बीच में निलंबित है (चित्र 4.3)। चुंबकीय क्षेत्र का परिमाण ज्ञात कीजिए।

© NCERT not to be republished



चित्र 4.3

हल समीकरण (4.4) के अनुसार, तार बीच-वायु में निलंबित है इसके निलंबित रहने के लिए इस पर एक उपरिमुखी बल **F** जिसका परिमाण IlB लगना चाहिए जो इसके भार mg को संतुलित कर सके। अत:

$$mg = IlB$$

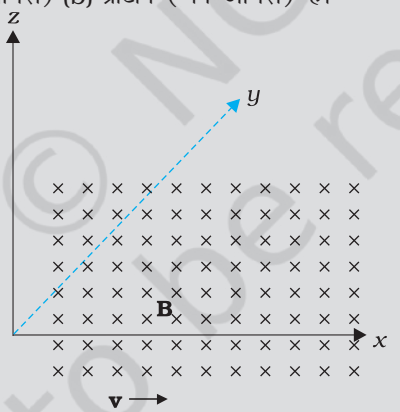
$$B = \frac{mg}{Il}$$

$$= \frac{0.2 \times 9.81}{2 \times 1.5} = 0.65 \text{ T}$$

ध्यान दीजिए, यहाँ पर m/l अर्थात तार का प्रति एकांक लंबाई द्रव्यमान बताना पर्याप्त है। पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र का मान लगभग 4×10^{-5} T है जिसकी हमने यहाँ उपेक्षा की है।

उदाहरण 4.1

उदाहरण 4.2 यदि चुंबकीय क्षेत्र धनात्मक y-अक्ष के समान्तर है तथा आवेशित कण धनात्मक x-अक्ष के अनुदिश गतिमान है (चित्र 4.4 देखिए), तो लोरेंज बल किस ओर लगेगा जबकि गतिमान कण (a) इलेक्ट्रॉन (ऋण आवेश) (b) प्रोटॉन (धन आवेश) है।



चित्र 4.4

हल कण के वेग **v** की दिशा x-अक्ष के अनुदिश है जबकि चुंबकीय क्षेत्र **B** की दिशा y-अक्ष के अनुदिश है, अत: लोरेंज बल $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ की दिशा z-अक्ष के अनुदिश (पेंच नियम अथवा दक्षिण हस्त अंगुष्ठ नियम) है। अत: (a) इलेक्ट्रॉन के लिए यह बल $-z$ अक्ष के अनुदिश तथा (b) धनावेश (प्रोटॉन) के लिए यह $+z$ अक्ष के अनुदिश है।

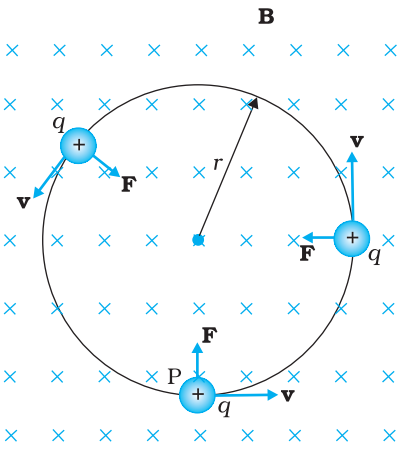
उदाहरण 4.2

4.3 चुंबकीय क्षेत्र में गति

अब हम और अधिक विस्तार से चुंबकीय क्षेत्र में गतिशील आवेश के विषय में अध्ययन करेंगे। हमने यांत्रिकी (कक्षा 11 की पाठ्यपुस्तक का अध्याय 6 देखिए) में यह सीखा है कि यदि किसी बल का कण की गति की दिशा में (अथवा उसके विपरीत) कोई अवयव है तो वह बल उस कण

भौतिकी
चुंबकीय क्षेत्र में गतिमान आवेशित कण – अन्योन्य क्रिया प्रदर्शन
http://www.phys.hawaii.edu/~teb/optics/java/partmagn/index.html

© NCERT not to be republished

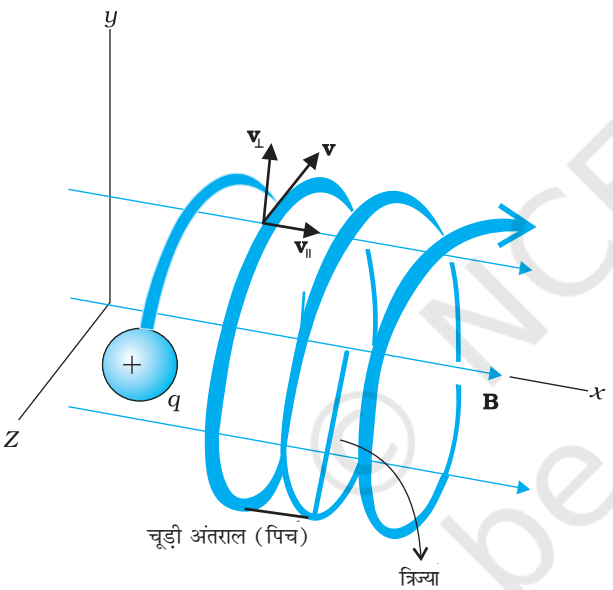


चित्र 4.5 वर्तुल गति

पर कार्य करता है। चुंबकीय क्षेत्र में आवेश की गति के प्रकरण में, चुंबकीय बल कण के वेग की दिशा के लंबवत होता है। अत: कोई कार्य नहीं होता तथा वेग के परिमाण में भी कोई परिवर्तन नहीं होता (यद्यपि संवेग की दिशा में परिवर्तन हो सकता है। [ध्यान दीजिए, यह विद्युत क्षेत्र के कारण बल, $q\mathbf{E}$, से भिन्न है, जिसका गति के समांतर (अथवा प्रतिसमांतर) अवयव हो सकता है और इस प्रकार संवेग के साथ-साथ ऊर्जा को भी स्थानांतरित कर सकता है।]

हम किसी *एकसमान* चुंबकीय क्षेत्र में आवेशित कण की गति पर विचार करेंगे। पहले उस स्थिति पर विचार कीजिए जिसमें वेग $\mathbf{v}$ चुंबकीय क्षेत्र $\mathbf{B}$ के लंबवत है। लंबवत बल $q\,\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ अभिकेंद्र बल की भाँति कार्य करता है तथा चुंबकीय क्षेत्र के लंबवत वर्तुल गति उत्पन्न करता है। *यदि* $\mathbf{v}$ *तथा* $\mathbf{B}$ *एक दूसरे के लंबवत हैं, तो कण (अर्थात किसी वृत्त के अनुदिश) वर्तुल गति करेगा* (चित्र 4.5)।

यदि वेग $\mathbf{v}$ का कोई अवयव है, $\mathbf{B}$ के अनुदिश तो यह अवयव अपरिवर्तित रहता है, क्योंकि चुंबकीय क्षेत्र के अनुदिश गति को चुंबकीय क्षेत्र प्रभावित नहीं करेगा। $\mathbf{B}$ के लंबवत किसी तल में गति, पहले की भाँति, वर्तुल गति ही है जिससे यह अवयव *कुंडलिनी गति* उत्पन्न करता है (चित्र 4.6)।



चित्र 4.6 कुंडलिनी गति

आपने पिछली कक्षाओं में यह सीख लिया है (देखिए अध्याय 4 कक्षा 11) कि यदि किसी कण के वृत्ताकार पथ की त्रिज्या r है तो उस कण पर एक बल $m v^2 / r$ वृत्त के केंद्र की ओर तथा पथ के लंबवत कार्य करता है जिसे अभिकेंद्र बल कहते हैं। यदि वेग $\mathbf{v}$ चुंबकीय क्षेत्र $\mathbf{B}$ के लंबवत है, तो चुंबकीय बल वेग $\mathbf{v}$ तथा चुंबकीय क्षेत्र $\mathbf{B}$ के लंबवत होता है तथा अभिकेंद्र बल की भाँति इसका परिमाण $q v B$ होता है। दोनों अभिकेंद्र बल के व्यंजकों को समीकरण के रूप में लिखने पर

$$m v^2/r = q v B,$$

$$r = m v / qB \qquad (4.5)$$

जितना अधिक संवेग होगा उतनी ही अधिक निर्मित वृत्त की त्रिज्या होगी तथा निर्मित वृत्त भी बड़ा होगा। यदि कोणीय आवृत्ति ω है तो $v = \omega r$ अत:

$$\omega = 2\pi\, \nu = q B/ m \qquad [4.6(a)]$$

कोणीय आवृत्ति ω वेग अथवा ऊर्जा पर निर्भर नहीं करती। यहाँ ν घूर्णन की आवृत्ति है। ν के ऊर्जा पर निर्भर न करने का साइक्लोट्रॉन के डिज़ाइन में एक महत्वपूर्ण अनुप्रयोग है (अनुभाग 4.4.2 देखिए)।

एक परिक्रमा पूरी करने में लगा समय $T = 2\pi/\omega \equiv 1/\nu$, यदि चुंबकीय क्षेत्र के समांतर वेग का कोई अवयव ($v_{||}$ द्वारा निर्दिष्ट) है, कण का पथ कुंडलिनी (सर्पिलाकार) जैसा होगा। एक घूर्णन में कण द्वारा चुंबकीय क्षेत्र के अनुदिश चली गई दूरी को पिच या चूड़ी अंतराल कहते हैं। समीकरण [4.6 (a)] का उपयोग करने पर हमें प्राप्त होता है।

$$p = v_{||} T = 2\pi m v_{||} / q B \qquad [4.6(b)]$$

गति के वृत्तीय अवयव की त्रिज्या को *कुंडलिनी की त्रिज्या* कहते हैं।

© NCERT not to be republished

उदाहरण 4.3 6×10^{-4} T के चुंबकीय क्षेत्र के लंबवत 3×10^{7} m/s की चाल से गतिमान किसी इलेक्ट्रॉन (द्रव्यमान 9×10^{-31} kg तथा आवेश 1.6×10^{-19} C) के पथ की त्रिज्या क्या है? इसकी क्या आवृत्ति होगी? इसकी ऊर्जा KeV में परिकलित कीजिए। (1 eV = 1.6×10^{-19} J)

हल समीकरण (4.5) का उपयोग करने पर हम पाते हैं

$r = m v / (qB) = 9 \times 10^{-31}\ \text{kg} \times 3 \times 10^{7}\ \text{m s}^{-1} / (1.6 \times 10^{-19}\ \text{C} \times 6 \times 10^{-4}\ \text{T})$

$= 28 \times 10^{-2}\ \text{m} = 28\ \text{cm}$

$\nu = v / (2\pi r) = 17 \times 10^{6}\ \text{s}^{-1} = 17 \times 10^{6}\ \text{Hz} = 17\ \text{MHz}.$

$E = (\frac{1}{2}) m v^{2} = (\frac{1}{2}) 9 \times 10^{-31}\ \text{kg} \times 9 \times 10^{14}\ \text{m}^2/\text{s}^2 = 40.5 \times 10^{-17}\ \text{J}$

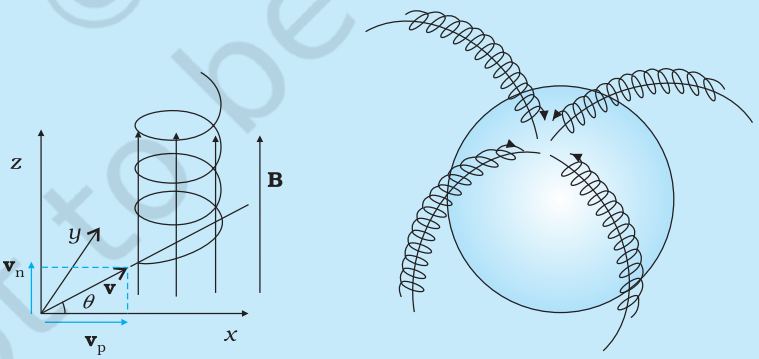
$\approx 4 \times 10^{-16}\ \text{J} = 2.5\ \text{KeV}$

उदाहरण 4.3

आवेशित कणों की कुंडलिनी गति तथा उत्तर ध्रुवीय ज्योति

ध्रुवीय क्षेत्रों जैसे अलास्का तथा उत्तरी कनाडा में आकाश में वर्णों का अत्यंत वैभवशाली दृश्य दिखाई देता है। नृत्य करते हरे गुलाबी प्रकरणों का दृष्टिगोचर होना जितना मनोहारी व चित्ताकर्षक है उतना ही उलझन पूर्ण भी है। भौतिकी में अब इस प्राकृतिक परिघटना का स्पष्टीकरण प्राप्त हो गया है जिसका इस अध्याय के अंतर्गत हम अध्ययन कर रहे हैं उससे संबंध रखता है।

मान लीजिए द्रव्यमान m तथा आवेश q का कोई कण आरंभिक वेग $\mathbf{v}$ से किसी चुंबकीय क्षेत्र $\mathbf{B}$ में प्रवेश करता है। मान लीजिए इस वेग का चुंबकीय क्षेत्र के समांतर अवयव $\mathbf{v}_p$ तथा इस क्षेत्र के अभिलंबवत अवयव $\mathbf{v}_n$ है। आवेशित कण पर चुंबकीय क्षेत्र के अनुदिश कोई बल नहीं है। वेग $\mathbf{v}_p$ से निरंतर चुंबकीय क्षेत्र के समांतर गतिमान रहता है। कण पर कार्यरत वेग के अभिलंबवत अवयव के कारण इस पर लोरेंज बल ($\mathbf{v}_n \times \mathbf{B}$) कार्य करता है जिसकी दिशा $\mathbf{v}_n$ तथा $\mathbf{B}$ दोनों के लंबवत होती है। जैसा कि अनुभाग 4.3.1 में देख चुके हैं, इस प्रकार कण में वर्तुल गति करने की प्रवृत्ति उत्पन्न हो जाती है तथा वह वर्तुल गति चुंबकीय क्षेत्र के लंबवत तल में होती है। जब यह गति चुंबकीय क्षेत्र के समांतर कण की गति से युग्मित हो जाती है तो परिणामी प्रक्षेप पथ रेखाओं के चुंबकीय क्षेत्र के अनुदिश कुंडलिनी होता है जैसा कि यहाँ चित्र (*a*) में दर्शाया गया है। यदि क्षेत्र रेखाएँ मुड़ भी जाती हैं तो भी कुंडलिनी पथ पर गतिशील कण पाश में फँसकर चुंबकीय क्षेत्र के चारों ओर गति करने के लिए निर्देशित होता है। चूँकि लोरेंज बल प्रत्येक बिंदु पर वेग के लंबवत है, क्षेत्र कण पर कोई कार्य नहीं करता तथा वेग का परिमाण समान रहता है।



(a) (b)

सौर प्रज्वाल के समय सूर्य से विशाल संख्या में इलेक्ट्रॉन तथा प्रोटॉन बाहर उत्सर्जित होते हैं। उनमें से कुछ पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र के पाश में फँस जाते हैं तथा क्षेत्र रेखाओं के अनुदिश कुंडलिनी पथ पर गति करते हैं। पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र की क्षेत्र रेखाएँ चुंबकीय ध्रुवों पर बहुत पास-पास आ जाती हैं [देखिए चित्र (b)] अतः ध्रुवों के निकट आवेशों का घनत्व बढ़ जाता है। ये आवेशित कण वायुमंडल के अणुओं से तथा परमाणुओं से टकराते हैं। उत्तेजित ऑक्सीजन परमाणु हरा प्रकाश उत्सर्जित करते हैं तथा उत्तेजित नाइट्रोजन परमाणु गुलाबी प्रकाश उत्सर्जित करते हैं। भौतिकी में इस परिघटना को *उत्तर ध्रुवीय ज्योति* कहते हैं।

© NCERT not to be republished

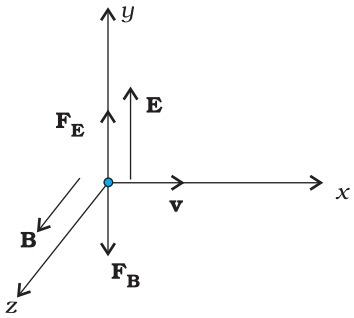
4.4 संयुक्त विद्युत तथा चुंबकीय क्षेत्रों में गति

4.4.1 वेग वरणकर्ता

आप जानते हैं कि विद्युत तथा चुंबकीय दोनों क्षेत्रों की उपस्थिति में **v** वेग से गतिमान q आवेश के कण पर समीकरण (4.3) के अनुसार एक बल कार्य करता है जिसे इस प्रकार व्यक्त करते हैं:

$$\mathbf{F} = q\,(\mathbf{E} + \boldsymbol{v} \times \mathbf{B}) = \mathbf{F}_E + \mathbf{F}_B$$

हम यहाँ चित्र 4.7 में दर्शाए अनुसार एक सरल स्थिति पर विचार करेंगे जिसमें विद्युत क्षेत्र तथा चुंबकीय क्षेत्र एक दूसरे के लंबवत हैं तथा कण का वेग इन दोनों क्षेत्रों के लंबवत है। तब



चित्र 4.7

$$\mathbf{E} = E\,\hat{\mathbf{j}},\ \mathbf{B} = B\,\hat{\mathbf{k}},\ \mathbf{v} = v\,\hat{\mathbf{i}}$$

$$\mathbf{F}_E = q\mathbf{E} = qE\,\hat{\mathbf{j}},\ \mathbf{F}_B = q\mathbf{v} \times \mathbf{B},\ = q\left(v\,\hat{\mathbf{i}} \times B\hat{\mathbf{k}}\right) = -qvB\,\hat{\mathbf{j}}$$

अत: $$\mathbf{F} = q\left(E - vB\right)\hat{\mathbf{j}}$$

इस प्रकार चित्र में दर्शाए अनुसार विद्युत बल तथा चुंबकीय बल एक दूसरे के विपरीत दिशा में हैं। मान लीजिए हम **E** तथा **B** के मानों को इस प्रकार समायोजित करते हैं कि इन बलों के परिमाण समान हो जाएँ तो आवेश पर कुल बल शून्य हो जाएगा तथा आवेश इन क्षेत्रों में बिना विक्षेपित हुए गमन करेगा। यह तब होगा जब

$$qE = qvB \quad \text{अथवा} \quad v = \frac{E}{B} \tag{4.7}$$

इस शर्त का उपयोग विभिन्न गति से गतिमान आवेशों (चाहे उनके आवेश तथा द्रव्यमान कुछ भी हों) के पुंज से किसी विशेष वेग के आवेशित कणों को चुनने में किया जाता है। अत: क्रॉसित चुंबकीय व विद्युत क्षेत्र *वेग वरणकर्ता* के समान कार्य करते हैं। केवल E/B की चाल वाले कण ही इस क्रॉसित क्षेत्रों वाले स्थान से बिना विक्षेपित हुए गुज़रते हैं। इस विधि का उपयोग सन 1897 में जे. जे. थामसन ने इलेक्ट्रॉन का आवेश-द्रव्यमान अनुपात (e/m) मापने में किया था। इस सिद्धांत का उपयोग द्रव्यमान स्पेक्ट्रोमीटर में भी किया जाता है। यह ऐसी युक्ति है जो आवेशित कणों को, प्राय: आयनों, उनके आवेश-द्रव्यमान अनुपात के अनुसार पृथक करती है।

4.4.2 साइक्लोट्रॉन

साइक्लोट्रॉन आवेशित कणों अथवा आयनों का उच्च ऊर्जाओं तक त्वरित करने वाला यंत्र है। इसका आविष्कर नाभिकीय संरचना के अन्वेषण के लिए सन् 1934 में ई.ओ. लोरेंज़ तथा एम. एस. लिविंग्स्टॉन ने किया था। आवेशित कणों की ऊर्जा में वृद्धि करने के लिए साइक्लोट्रॉन में संयुक्त रूप में विद्युत क्षेत्र तथा चुंबकीय क्षेत्र दोनों का उपयोग किया जाता है। चूँकि ये दोनों क्षेत्र एक दूसरे के लंबवत लगाए जाते हैं, इन्हें *क्रॉसित क्षेत्र* कहते हैं। साइक्लोट्रॉन में इस तथ्य का उपयोग किया जाता है कि "चुंबकीय क्षेत्र में परिक्रमण करने वाले आवेशित कणों की परिक्रमण की आवृत्ति कण की ऊर्जा पर निर्भर नहीं करती।" कण अधिकांश समय तक दो अर्धवृत्ताकार चक्रिका जैसे धातु के पात्रों, D_1 तथा D_2 के बीच गति करते हैं। इन धातु के पात्रों को 'डीज' (*Dees*) कहते हैं क्योंकि ये अंग्रेज़ी के वर्णमाला के अक्षर 'D' जैसे दिखाई देते हैं। चित्र 4.8 में साइक्लोट्रॉन का व्यवस्था आरेख दर्शाया गया है। धातु के बॉक्सों के भीतर कण परिरक्षित रहते हैं तथा इन पर विद्युत क्षेत्र कार्य नहीं करता। तथापि कण पर चुंबकीय क्षेत्र कार्य करता है जिसके कारण वह एक 'डी' के अंदर वर्तुल गति करता है। प्रत्येक बार जब कण एक 'डी' से दूसरी 'डी' में जाता है तो हर बार उस पर विद्युत क्षेत्र कार्य करता है। प्रत्यावर्ती रूप से विद्युत क्षेत्र का चिह्न परिवर्तित होता रहता है तथा इसका कण की वर्तुल गति के साथ सामंजस्य होता है। इससे यह सुनिश्चित होता है कि कण सदैव विद्युत क्षेत्र द्वारा त्वारित होता है। हर बार त्वरण से कण की ऊर्जा में वृद्धि होती है। जैसे-जैसे ऊर्जा

साइक्लोट्रॉन अन्योन्यक्रिया प्रदर्शन
http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/index.php?topic=33.0
भौतिकी

© NCERT not to be republished

में वृद्धि होती जाती है उसके वृत्ताकार पथ की त्रिज्या में भी वृद्धि होती है। अत: कण का पथ सर्पिलाकार होता है।

इस सारे संयोजन को निर्वातित किया जाता है ताकि आयनों तथा वायु के अणुओं के बीच संघट्ट न्यूनतम हो जाए। डीज़ पर एक उच्च प्रत्यावर्ती वोल्टता अनुप्रयुक्त की जाती है। चित्र 4.8 में दर्शाए गए आरेख में धनायन अथवा धनावेशित कण (कण प्रोटॉन) केंद्र P पर मुक्त किए जाते हैं। ये किसी एक 'डी' में अर्धवृत्ताकर पथ पर गमन करते हुए $T/2$ समय अंतराल में डीज़ के बीच के रिक्त स्थान में आते हैं। यहाँ T परिक्रमण काल है जिसका मान समीकरण (4.6) के अनुसार

$$T = \frac{1}{\nu_c} = \frac{2\pi m}{qB}$$

अथवा $$\nu_c = \frac{qB}{2\pi m} \qquad (4.8)$$

प्रत्यक्ष तर्कों के आधार पर इस आवृत्ति को *साइक्लोट्रॉन आवृत्ति* कहते हैं तथा इसे ν_c द्वारा निर्दिष्ट किया जाता है।

साइक्लोट्रॉन में अनुप्रयुक्त वोल्टता की आवृत्ति ν_a को इस प्रकार समायोजित किया जाता है कि जितने समय में आयन अपना आधा परिक्रमण पूरा करता है उतने ही समय में डीज़ की ध्रुवता परिवर्तित हो जाती है। इसके लिए आवश्यक शर्त $\nu_a = \nu_c$ को *अनुनाद की शर्त* कहते हैं। स्रोत का कला का समायोजन इस प्रकार किया जाता है कि जब धनायन D_1 के छोर पर पहुँचता है तो उस समय D_2 निम्न विभव पर होता है तथा आयन इस रिक्त स्थान में त्वरित होते हैं। डीज़ के भीतर कण ऐसे क्षेत्र में गमन करते हैं जहाँ विद्युत क्षेत्र नहीं होता। हर बार कण एक डी से दूसरी डी पर जाने में कण की ऊर्जा में qV की वृद्धि होती है (यहाँ V डीज़ के बीच उस समय की वोल्टता है।) समीकरण (4.5) से यह स्पष्ट है कि कणों के पथों की त्रिज्या में हर बार, गतिज ऊर्जाओं में वृद्धि होने के कारण वृद्धि होती जाती है। आयन डीज़ के बीच बारंबार उस समय तक त्वरित होते रहते हैं जब तक कि वे लगभग डीज़ के बराबर त्रिज्या पाने के लिए आवश्यक ऊर्जा प्राप्त नहीं कर लेते। उस समय फिर से चुंबकीय क्षेत्र द्वारा विक्षेपित होकर निर्गम झिरी द्वारा निकाय से बाहर निकल जाते हैं। समीकरण (4.5) से, हमें प्राप्त होता है–

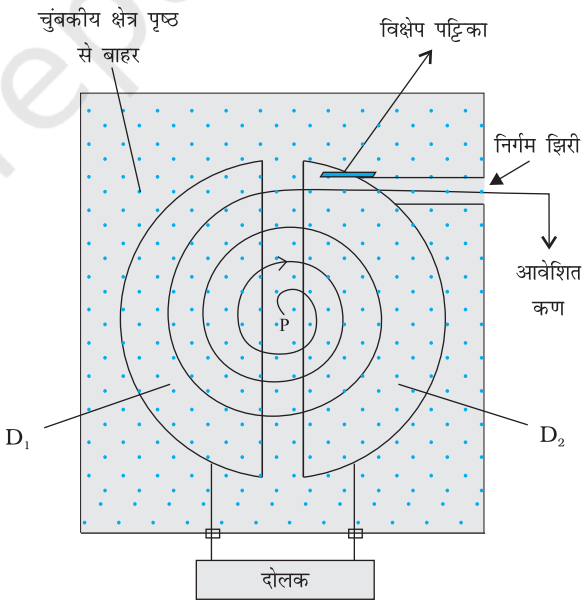
$$v = \frac{qBR}{m} \qquad (4.9)$$

यहाँ R निर्गम पर प्रक्षेप की त्रिज्या है तथा यह डीज़ की त्रिज्या के बराबर है।

अत: आयनों की गतिज ऊर्जा

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{q^2B^2R^2}{2m} \qquad (4.10)$$

साइक्लोट्रॉन का प्रचालन इस तथ्य पर आधारित है कि किसी आयन के एक परिक्रमण का समय आयन की चाल अथवा कक्षा की त्रिज्या पर निर्भर नहीं है। साइक्लोट्रॉन का उपयोग इसमें त्वरित ऊर्जायुक्त कणों द्वारा नाभिक पर बमबारी करके परिणामी नाभिकीय अभिक्रियाओं का अध्ययन करने के लिए किया जाता है। इसका उपयोग ठोसों में आयनों को रोपित करके उनके गुणों में सुधार करने और यहाँ तक कि नए पदार्थों को संश्लेषित करने में भी किया जाता



चित्र 4.8 साइक्लोट्रॉन का व्यवस्था आरेख। बिंदु P पर आवेशित कणों अथवा आयनों का स्रोत है। ये आवेशित कण या आयन एकसमान लंबवत चुंबकीय क्षेत्र B के कारण D_1 तथा D_2 डीज़ के भीतर-वृत्ताकार पथ पर गमन करते हैं। एक प्रत्यावर्ती वोल्टता स्रोत इन आवेशित कणों को उच्च चालों तक त्वरित करता है। अंतत: आवेशित कण बाहरी द्वार से निकाल दिए जाते हैं।

© NCERT not to be republished

है। इसका उपयोग रेडियोएक्टिव पदार्थों को उत्पन्न करने में किया जाता है। इन रेडियोएक्टिव पदार्थों को अस्पतालों में रोगी के निदान तथा उपचार में किया जाता है।

उदाहरण 4.4

उदाहरण 4.4 साइक्लोट्रॉन की दोलित्र आवृत्ति 10 MHz है। प्रोटॉनों को त्वरित करने के लिए प्रचालन चुंबकीय क्षेत्र का मान कितना होना चाहिए। यदि डीज़ की त्रिज्या 60 cm है तो त्वरक द्वारा उत्पन्न प्रोटॉन पुंज की गतिज ऊर्जा MeV में परिकलित कीजिए।

(e =1.60 × 10^{-19} C, m_p = 1.67 × 10^{-27} kg, 1 MeV = 1.6 × 10^{-13} J).

हल दोलित्र आवृत्ति प्रोटॉन के साइक्लोट्रॉन के बराबर होनी चाहिए।

समीकरणों (4.5) तथा [4.6 (a)] का उपयोग करने पर हमें प्राप्त होता है

$B = 2\pi m\nu/q = 6.3 \times 1.67 \times 10^{-27} \times 10^{7} / (1.6 \times 10^{-19}) = 0.66$ T

प्रोटॉन का अंतिम वेग

$v = r \times 2\pi\nu = 0.6 \text{ m} \times 6.3 \times 10^{7} = 3.78 \times 10^{7}$ m/s.

$E = \frac{1}{2} mv^2 = 1.67 \times 10^{-27} \times 14.3 \times 10^{14} / (2 \times 1.6 \times 10^{-13}) = 7$ MeV

भारत में त्वरक

भारत त्वरक-आधारित अनुसंधान के क्षेत्र में प्रवेश करने वाला अग्रणी देश है। डॉ. मेघनाद साहा की दूरदर्शिता के कारण सन् 1953 में कोलकाता के साहा नाभिकीय भौतिकी संस्थान ने 37" साइक्लोट्रॉन स्थापित कर लिया था। इसके पश्चात तो शीघ्र ही भारत के विभिन्न संस्थानों; जैसे–टाटा भौमिक अनुसंधान संस्थान (TIFR), मुंबई; अलीगढ़ मुस्लिम विश्वविद्यालय, अलीगढ़; बोस इंस्टीट्यूट, कोलकाता तथा आंध्रा विश्वविद्यालय, वाल्टेयर में कोकरोफ्ट-वाल्टन प्रकार के कई त्वरक स्थापित हो गए।

साठ के दशक में तो कई वान डे ग्राफ त्वरक स्थापित हुए– 5.5 MV टर्मिनल मशीन भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र (BARC), मुंबई (1963); 2 MV टर्मिनल मशीन भारतीय प्रौद्योगिकी संस्थान, कानपुर; 400 kV टर्मिनल मशीन बनारस हिंदू विश्वविद्यालय, वाराणसी तथा पंजाबी विश्वविद्यालय, पटियाला। अमेरिका के रोशेस्टर विश्वविद्यालय द्वारा प्रदान किए गए 66 cm साइक्लोट्रॉन को पंजाब विश्वविद्यालय, चंडीगढ़ में स्थापित किया गया। एक लघु इलेक्ट्रॉन त्वरक पूना विश्वविद्यालय, पुणे में भी स्थापित किया गया।

सत्तर तथा अस्सी के दशकों में एक प्रमुख सूत्रपात परिवर्ती ऊर्जा साइक्लोट्रॉन केंद्र (VECC), कोलकाता द्वारा पूर्णतः भारतीय संसाधनों का उपयोग करके परिवर्ती ऊर्जा साइक्लोट्रॉन निर्मित करके किया गया; भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र (BARC) मुंबई ने 2 MV टैंडेम वान डे ग्राफ त्वरक विकसित एवं निर्मित किया तथा टाटा भौमिक अनुसंधान संस्थान में14 MV टैंडेम पेल्लेट्रॉन त्वरक स्थापित किया गया।

इसके पश्चात शीघ्र ही विश्वविद्यालय अनुदान आयोग (UGC), नयी दिल्ली ने अंतर विश्वविद्यालय सुविधा के रूप में अंतरविश्वविद्यालय त्वरक केंद्र (IUAC), नयी दिल्ली में एक 15 MV टैंडेम पेल्लेट्रॉन; भौतिकी संस्थान, भुवनेश्वर में एक 3 MV टैंडेम पेल्लेट्रॉन; अन्वेषण, भन्वेषण व अनुसंधान का परमाणु खनिज निदेशालय, हैदराबाद तथा इंदिरा गांधी परमाणु अनुसंधान केंद्र, कलपक्कम में दो 1.7 MV टैण्डेट्रॉन स्थापित कराए। TIFR तथा IUAC दोनों ही अपनी सुविधाएँ, अतिचालक LINAC मॉड्यूल जिनका उपयोग आयनों को उच्च ऊर्जाओं तक त्वरित करने में किया जाता है, के साथ आगे बढ़ा रहे हैं।

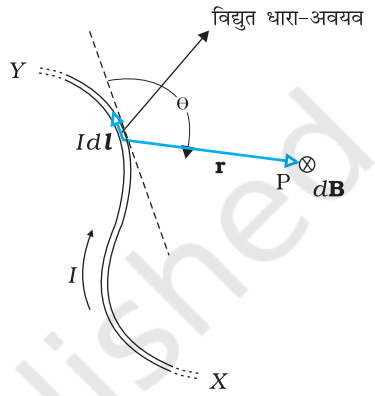
इन त्वरकों के अतिरिक्त परमाणु ऊर्जा विभाग ने भी बहुत से इलेक्ट्रॉन त्वरक विकसित किए हैं। राजा रामन्ना अग्रवर्ती प्रौद्योगिकी केंद्र, इंदौर में एक 2 GeV सिंक्रोट्रॉन विकिरण स्रोत निर्मित किया जा रहा है।

परमाणु ऊर्जा विभाग भविष्य में विकल्प के रूप में शक्ति उत्पादन तथा विखंडनीय पदार्थ के प्रजनन के लिए त्वरक प्रचालित संयंत्रों पर विचार कर रहा है।

© NCERT not to be republished

4.5 विद्युत धारा अवयव के कारण चुंबकीय क्षेत्र, बायो-सावर्ट नियम

जितने चुंबकीय क्षेत्र हमें ज्ञात हैं वे सभी विद्युत धाराओं (अथवा गतिशील आवेशों) तथा कणों के नैज चुंबकीय आघूर्णों के कारण उत्पन्न हुए हैं। यहाँ अब हम विद्युत धारा तथा उसके द्वारा उत्पन्न चुंबकीय क्षेत्र के बीच संबंध के बारे में अध्ययन करेंगे। यह संबंध बायो सावर्ट नियम द्वारा प्राप्त होता है। चित्र 4.9 में एक परिमित विद्युत धारा चालक XY दर्शाया गया है, जिसमें विद्युत धारा I प्रवाहित हो रही है। चालक के अतिअल्प अवयव $d\boldsymbol{l}$ पर विचार कीजिए। मान लीजिए हमें इस अवयव द्वारा इससे $\mathbf{r}$ दूरी पर स्थित किसी बिंदु P पर चुंबकीय क्षेत्र $d\mathbf{B}$ का मान निर्धारित करना है। मान लीजिए विस्थापन सदिश $\mathbf{r}$ तथा $d\boldsymbol{l}$ के बीच θ कोण बनता है। तब बायो-सावर्ट नियम के अनुसार चुंबकीय क्षेत्र $d\mathbf{B}$ का परिमाण विद्युत धारा I, लंबाई अवयव $|d\boldsymbol{l}|$ के अनुक्रमानुपाती तथा दूरी r के वर्ग के व्युत्क्रमानुपाती है। इस क्षेत्र की दिशा* $d\boldsymbol{l}$ तथा $\mathbf{r}$ के तलों के लंबवत होगी। अत: सदिश संकेत पद्धति में



चित्र 4.9 बायो-सावर्ट नियम का निदर्श चित्र। विद्युतधारा-अवयव $I\,d\boldsymbol{l}$, r दूरी पर स्थित बिंदु पर क्षेत्र $d\mathbf{B}$ उत्पन्न करता है। ⊗ चिह्न यह इंगित करता है कि क्षेत्र कागज़ के तल के अभिलंबवत नीचे की ओर प्रभावी है।

$$d\mathbf{B} \propto \frac{I\,d\boldsymbol{l}\times\mathbf{r}}{r^3}$$

$$= \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\,d\boldsymbol{l}\times\mathbf{r}}{r^3} \qquad [4.11(a)]$$

यहाँ $\mu_0/4\pi$ अनुक्रमानुपातिक नियतांक है। उपरोक्त समीकरण तब लागू होता है जबकि माध्यम निर्वात होता है।

इस क्षेत्र का परिमाण

$$|d\mathbf{B}| = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\,dl\sin\theta}{r^2} \qquad [4.11(b)]$$

यहाँ हमने सदिश-गुणनफल के गुणधर्म $|d\boldsymbol{l}\times\mathbf{r}| = dl\,r\sin\theta$ का उपयोग किया है। चुंबकीय क्षेत्र के लिए समीकरण [4.11(a)] मूल समीकरण है। अनुक्रमानुपाती नियतांक $\frac{\mu_0}{4\pi}$ का यथार्थ मान है–

$$\frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7}\,\mathrm{Tm/A} \qquad [4.11(c)]$$

राशि μ_0 को मुक्त आकाश (या निर्वात) की *चुंबकशीलता नियतांक* कहते हैं।

चुंबकीय क्षेत्र के बायो-सावर्ट नियम और स्थिरवैद्युतिकी के कूलॉम नियम में कुछ समानताएँ हैं तथा कुछ असमानताएँ। इसमें से कुछ निम्न प्रकार हैं-

(i) दोनों दीर्घ-परासी हैं, क्योंकि दोनों ही स्रोत से परीक्षण बिंदु तक की दूरी के वर्ग के व्युत्क्रमानुपाती होते हैं। दोनों ही क्षेत्रों पर अध्यारोपण सिद्धांत लागू होता है [इस संबंध में यह ध्यान दीजिए कि *स्रोत* $I\,d\boldsymbol{l}$ में चुंबकीय क्षेत्र *रैखिक* है जैसे कि अपने स्रोत, विद्युत आवेश में स्थिर वैद्युत क्षेत्र रैखिक है।]

---

* $d\boldsymbol{l}\times\mathbf{r}$ की दिशा दक्षिण हस्त पेंच नियम द्वारा भी प्राप्त होती है। $d\boldsymbol{l}$ तथा $\mathbf{r}$ के तलों को देखिए। कल्पना कीजिए कि आप पहले सदिश से दूसरे सदिश की ओर गमन कर रहे हैं। यदि गति वामावर्त है तो परिणामी आपकी ओर संकेत करेगा। यदि यह दक्षिणावर्त है तो परिणामी आपसे दूर की ओर होगा।

2022-23

(ii) स्थिरवैद्युत क्षेत्र आदिश स्रोत, जैसे वैद्युत आवेश, द्वारा उत्पन्न होता है जबकि चुंबकीय क्षेत्र एक सदिश स्रोत जैसे, $I\,d\boldsymbol{l}$ द्वारा उत्पन्न होता है।

(iii) स्थिरवैद्युत क्षेत्र स्रोत को क्षेत्र के बिंदु से मिलाने वाले विस्थापन सदिश के अनुदिश होता है जबकि चुंबकीय क्षेत्र विस्थापन सदिश $\mathbf{r}$ तथा विद्युत धारा अवयव $I\,d\boldsymbol{l}$ दोनों के तलों के लंबवत होता है।

(iv) बायो-सावर्ट नियम में कोण पर निर्भरता है जो स्थिर वैद्युत क्षेत्र में नहीं होती। चित्र 4.9 में, दिशा $d\boldsymbol{l}$ (डैश युक्त रेखा में किसी भी बिंदु पर चुंबकीय क्षेत्र शून्य है। इस दिशा के अनुदिश $\theta = 0$, $\sin\theta = 0$ तथा समीकरण [4.11(a)], $|d\mathbf{B}| = 0$

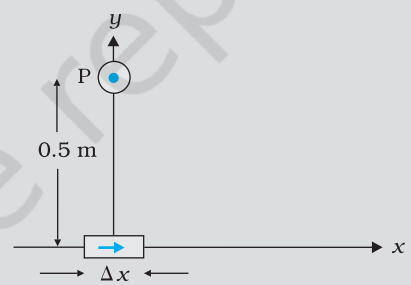
मुक्त दिक्स्थान की विद्युतशीलता, मुक्त दिक्स्थान की चुंबकशीलता तथा निर्वात में प्रकाश के वेग में एक रोचक संबंध है।

$$\varepsilon_0\mu_0 = (4\pi\varepsilon_0)\left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right) = \left(\frac{1}{9\times10^9}\right)(10^{-7}) = \frac{1}{(3\times10^8)^2} = \frac{1}{c^2}$$

इस संबंध के विषय में हम विद्युत चुंबकीय तरंगों के अध्याय 8 में चर्चा करेंगे। चूँकि निर्वात में प्रकाश का वेग नियत है, गुणनफल $\mu_0\varepsilon_0$ परिमाण में निश्चित है। ε_0 तथा μ_0 में से किसी भी एक मान का चयन करने पर अन्य का मान स्वतः निश्चित हो जाता है। SI मात्रकों में μ_0 का एक निश्चित परिमाण $4\pi \times 10^{-7}$ है।

उदाहरण 4.5

उदाहरण 4.5 कोई विद्युत धारा अवयव $\Delta\boldsymbol{l} = \Delta x\,\hat{\mathbf{i}}$ जिससे एक उच्च धारा $I = 10$A प्रवाहित हो रही है, मूल बिंदु पर स्थित है (चित्र 4.10), y-अक्ष पर 0.5 m दूरी पर स्थित किसी बिंदु पर इसके कारण चुंबकीय क्षेत्र का क्या मान है। $\Delta x = 1$ cm



चित्र 4.10

हल

$$|d\mathbf{B}| = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\,dl\sin\theta}{r^2}$$ [समीकरण (4.11द्वारा)]

$dl = \Delta x = 10^{-2}$ m, $I = 10$ A, $r = 0.5$ m $= y$, $\mu_0/4\pi = 10^{-7}\,\frac{\text{T m}}{\text{A}}$

$\theta = 90°$; $\sin\theta = 1$

$$|d\mathbf{B}| = \frac{10^{-7}\times10\times10^{-2}}{25\times10^{-2}} = 4\times10^{-8}\ \text{T}$$

इस चुंबकीय क्षेत्र की दिशा $+z$ दिशा में है। इसका कारण यह है कि

$$d\boldsymbol{l}\times\mathbf{r} = \Delta x\,\hat{\mathbf{i}}\times y\,\hat{\mathbf{j}} = y\,\Delta x(\hat{\mathbf{i}}\times\hat{\mathbf{j}}) = y\,\Delta x\,\hat{\mathbf{k}}$$

यहाँ हम आपको सदिश गुणनफलों के निम्नलिखित चक्रीय गुणों को याद कराते हैं

$\hat{\mathbf{i}}\times\hat{\mathbf{j}} = \hat{\mathbf{k}}$; $\hat{\mathbf{j}}\times\hat{\mathbf{k}} = \hat{\mathbf{i}}$; $\hat{\mathbf{k}}\times\hat{\mathbf{i}} = \hat{\mathbf{j}}$

ध्यान दीजिए इस क्षेत्र का परिमाण लघु है।

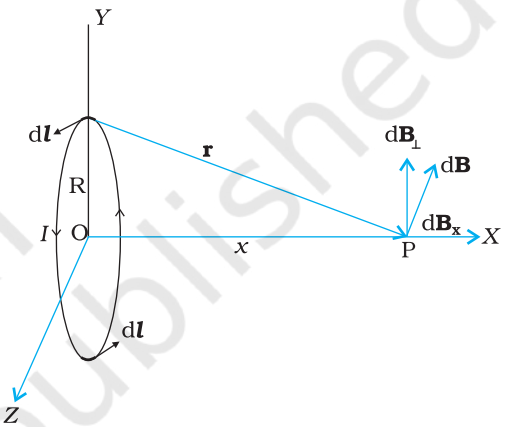
© NCERT not to be republished

अगले अनुभाग में हम वृत्ताकार पाश के कारण चुंबकीय क्षेत्र परिकलित करने के लिए बायो-सावर्ट नियम का उपयोग करेंगे।

4.6 विद्युत धारावाही वृत्ताकार पाश के अक्ष पर चुंबकीय क्षेत्र

इस अनुभाग में हम विद्युत धारावाही वृत्ताकार पाश के कारण उसके अक्ष के अनुदिश चुंबकीय क्षेत्र का मूल्यांकन करेंगे। इस मूल्यांकन में पिछले अनुभाग में वर्णित अत्यल्प विद्युत धारा अवयवों ($I\,d\boldsymbol{l}$) के प्रभाव को संयोजित किया जाएगा। हम यह मानते हैं कि प्रवाहित विद्युत धारा अपरिवर्ती है तथा मूल्यांकन मुक्त दिक्स्थान (निर्वात) में किया गया है।

चित्र 4.11 में वृत्ताकार पाश में स्थायी विद्युत धारा I प्रवाहित होते हुए दर्शाई गई है। पाश को मूल बिंदु पर $x\,y$ तल में स्थित दर्शाया गया है तथा पाश का त्रिज्या R है। x-अक्ष ही लूप का अक्ष है। हमें इसी अक्ष के बिंदु P पर चुंबकीय क्षेत्र परिकलित करना है, मान लीजिए बिंदु P पाश के केंद्र से x दूरी पर स्थित है।



चित्र 4.11 त्रिज्या R विद्युत धारावाही वृत्ताकार पाश के अक्ष पर चुंबकीय क्षेत्र। इस चित्र में रेखा अवयव $d\boldsymbol{l}$ के कारण चुंबकीय क्षेत्र $d\mathbf{B}$ तथा अक्ष के लंबवत कार्यरत इसके अवयवों को दर्शाया गया है।

पाश के चालक अवयव $\mathrm{d}l$ पर विचार कीजिए, इसे चित्र 4.11 में दर्शायी गई है। $\mathrm{d}l$ के कारण चुंबकीय क्षेत्र का परिमाण बायो-सावर्ट नियम [समीकरण 4.11(a)] के अनुसार

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I|d\boldsymbol{l}\times\mathbf{r}|}{r^3} \qquad (4.12)$$

अब $r^2 = x^2 + R^2$। साथ ही, पाश का कोई भी अवयव, इस अवयव से अक्षीय बिंदु के विस्थापन सदिश के लंबवत होगा। उदाहरण के लिए, चित्र 4.11 में अवयव $\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ y-z दिशा में है जबकि विस्थापन सदिश $\mathbf{r}$ अवयव $\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ से अक्षीय बिंदु P तक x-y तल में है। अतः $|d\boldsymbol{l}\times\mathbf{r}| = r\,dl$, इस प्रकार

$$\mathrm{d}B = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\mathrm{d}l}{\left(x^2+R^2\right)} \qquad (4.13)$$

$\mathrm{d}\mathbf{B}$ की दिशा चित्र 4.11 में दर्शायी गई है। यह $\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ तथा $\mathbf{r}$ द्वारा बने तल के लंबवत है। इसका एक x- अवयव $\mathrm{d}\mathbf{B}_x$ तथा x- अक्ष के लंबवत अवयव $\mathrm{d}\mathbf{B}_\perp$ है। जब x- अक्ष के लंबवत अवयवों को संयोजित करते हैं तो वे निरस्त हो जाते हैं तथा हमें शून्य परिणाम प्राप्त होता है। उदाहरण के लिए, चित्र 4.11 में दर्शाए अनुसार $\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ के कारण अवयव $\mathrm{d}\mathbf{B}_\perp$ इसके त्रिज्यतः विपरीत $\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ अवयव के कारण योगदान द्वारा निरसित हो जाता है। इस प्रकार केवल x-अवयव ही बच पाता है। x-दिशा के अनुदिश नेट योगदान पाश के ऊपर $\mathrm{d}B_x = \mathrm{d}B\cos\theta$ को समाकलित करके प्राप्त किया जा सकता है।

चित्र 4.11 के लिए

$$\cos\theta = \frac{R}{(x^2+R^2)^{1/2}} \qquad (4.14)$$

समीकरणों (4.13) और (4.14),

$$\mathrm{d}B_x = \frac{\mu_0 I\mathrm{d}l}{4\pi}\frac{R}{\left(x^2+R^2\right)^{3/2}}$$

© NCERT not to be republished

समस्त पाश पर dl अवयवों का संकलन, $2\pi R$, प्राप्त होता है जो पाश की परिधि है। इस प्रकार

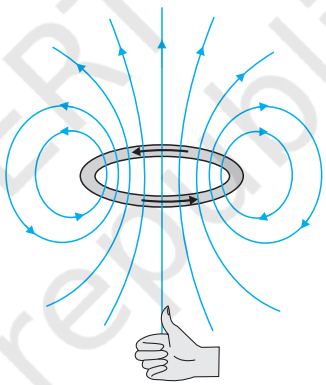
$$\mathbf{B} = B_x \hat{\mathbf{i}} = \frac{\mu_0 I R^2}{2\left(x^2 + R^2\right)^{3/2}} \hat{\mathbf{i}} \tag{4.15}$$

उपरोक्त परिणाम की एक विशेष स्थिति के रूप में हम पाश के केंद्र पर चुंबकीय क्षेत्र प्राप्त कर सकते हैं। इस प्रकार यहाँ $x = 0$, तथा हमें प्राप्त होता है,

$$\mathbf{B}_0 = \frac{\mu_0 I}{2R} \hat{\mathbf{i}} \tag{4.16}$$

वृत्ताकार तार के कारण चुंबकीय क्षेत्र रेखाएँ बंद वृत्ताकार पाश बनाती हैं जिन्हें चित्र 4.12 में दर्शाया गया है। चुंबकीय क्षेत्र की दिशा (एक अन्य) *दक्षिण हस्त अंगुष्ठ नियम* द्वारा होती है। यह नियम नीचे दिया गया है,

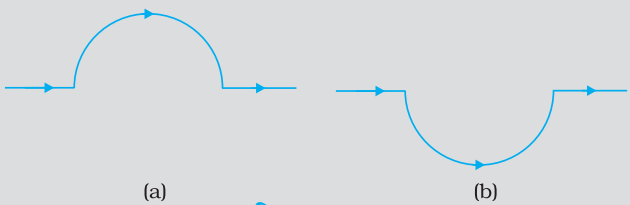
वृत्ताकार तार के चारों ओर अपने दाएँ हाथ की हथेली को इस प्रकार मोड़िए कि उँगलियाँ विद्युत धारा की दिशा की ओर संकेत करें, तब इस हाथ का फैला हुआ अँगूठा चुंबकीय क्षेत्र की दिशा बताता है।



चित्र 4.12 किसी विद्युतवाही पाश का चुंबकीय क्षेत्र। पाठ की विषय वस्तु में वर्णित दक्षिण हस्त अंगुष्ठ नियम द्वारा उत्पन्न चुंबकीय क्षेत्र की दिशा निर्धारित होती है। पाश के ऊपरी पार्श्व को उत्तर ध्रुव तथा निचले पार्श्व को दक्षिण ध्रुव माना जा सकता है।

उदाहरण 4.6

उदाहरण 4.6 चित्र 4.13 में दर्शाए अनुसार किसी सीधे तार जिसमें 12 A विद्युत धारा प्रवाहित हो रही है, को 2.0 cm त्रिज्या के अर्धवृत्ताकार चाप में मोड़ा गया है। इस चाप के केंद्र पर चुंबकीय क्षेत्र **B** को मानें।



(a) (b)

चित्र 4.13

(a) सीधे खंडों के कारण चुंबकीय क्षेत्र कितना है?

(b) किस रूप में अर्धवृत्त द्वारा **B** को दिया गया योगदान वृत्ताकार पाश के योगदान से भिन्न है और किस रूप में ये एक दूसरे के समान हैं।

(c) क्या आपके उत्तर में कोई परिवर्तन होगा यदि तार को उसी त्रिज्या के अर्धवृत्त में पहले की तुलना में चित्र 4.13 (b) में दर्शाए अनुसार उलटी दिशा में मोड़ दें।

© NCERT not to be republished

उदाहरण 4.6

हल

(a) सीधे खंडों के प्रत्येक अवयव के लिए $d\boldsymbol{l}$ तथा r समांतर हैं। अत: $d\boldsymbol{l} \times \mathbf{r} = 0$। इस प्रकार सीधे खंड ।B। को कोई योगदान नहीं देते।

(b) अर्धवृत्ताकार चाप के सभी खंडों के लिए, $d\boldsymbol{l} \times \mathbf{r}$ सभी एक दूसरे के समांतर हैं (कागज़ के तल में भीतर को जाते हुए)। इस प्रकार के सभी योगदान परिमाण में संयोजित हो जाते हैं। अत: अर्धवृत्ताकार चाप के लिए **B** की दिशा दक्षिण हस्त नियम द्वारा प्राप्त होती है। इसका परिमाण वृत्ताकार पाश के लिए **B** का आधा होता है। इस प्रकार **B** का मान 1.9×10^{-4} T है तथा दिशा कागज़ के तल के अभिलंबवत उसके भीतर जाते हुए है।

(c) **B** का परिमाण तो वही है जो (b) में है पर दिशा विपरीत है।

उदाहरण 4.7

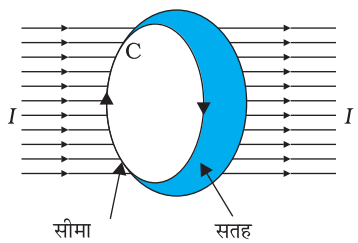
उदाहरण 4.7 10 cm त्रिज्या की 100 कसकर लपेटे गए फेरों की किसी ऐसी कुंडली पर विचार कीजिए जिससे 1 A विद्युत धारा प्रवाहित हो रही है। कुंडली के केंद्र पर चुंबकीय क्षेत्र का परिमाण क्या है?

हल चूँकि कुंडली कसकर लपेटी गई है अत: हम प्रत्येक वृत्ताकार अवयव की त्रिज्या $R = 10$ cm $= 0.1$ m मान सकते हैं। फेरों की संख्या $N = 100$ है, अत: चुंबकीय क्षेत्र का परिमाण

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2R} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 10^2 \times 1}{2 \times 10^{-1}} = 2\pi \times 10^{-4} \text{ T} = 6.28 \times 10^{-4} \text{ T}.$$

4.7 ऐम्पियर का परिपथीय नियम

बायो-सावर्ट नियम को अभिव्यक्त करने का एक अन्य वैकल्पिक तथा रुचिकर उपाय भी है। ऐम्पियर के परिपथीय नियम में किसी खुले पृष्ठ जिसकी कोई सीमा हो, पर विचार किया जाता है। इस पृष्ठ से विद्युत धारा प्रवाहित होती है। हम यह विचार करते हैं कि सीमा रेखा बहुत से अल्प रेखा अवयवों से मिलकर बनी है। ऐसे ही एक रेखा अवयव dl पर विचार कीजिए। हम इस अवयव पर चुंबकीय क्षेत्र के स्पर्शरेखीय घटक $\mathbf{B}_t$ का मान लेंगे तथा इसे अवयव dl की लंबाई से गुणा करेंगे। [ध्यान दीजिए $B_t dl = \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{l}$]। इस प्रकार के सभी गुणनफल एक दूसरे के साथ संयोजित किए जाते हैं। हम सीमा पर विचार करते हैं क्योंकि जैसे-जैसे अवयवों की लंबाई घटती है इनकी संख्या बढ़ती है। तब इनका योग एक समाकलन बन जाता है। ऐम्पियर का नियम यह कहता है कि यह समाकलन पृष्ठ से प्रवाहित होने वाली कुल विद्युत धारा का μ_0 गुना होता है, अर्थात



चित्र 4.14

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{l} = \mu_0 I \qquad [4.17(a)]$$

यहाँ I पृष्ठ से गुज़रने वाली कुल विद्युत धारा है। इस समाकलन को पृष्ठ की सीमारेखा C के संपाती बंद के ऊपर लिया गया है। उपरोक्त संबंध में दिशा सम्मिलित है जो दक्षिण हस्त नियम से प्राप्त होती है। अपने दाएँ हाथ की उँगलियों को उस दिशा में मोड़िए जिस दिशा में पाश समाकल $\oint \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{l}$ में सीमा रेखा मुड़ी है। तब अँगूठे की दिशा उस दिशा को बताती है जिसमें विद्युत धारा को धनात्मक माना गया है।

बहुत से अनुप्रयोगों के लिए समीकरण [4.17 (a)] का कहीं अधिक सरलीकृत रूप पर्याप्त सिद्ध होता है। हम यह मानेंगे कि, इस प्रकार के प्रकरणों में ऐसे पाश (जिसे ऐम्पियरीय पाश कहते हैं।) का चयन संभव है जो इस प्रकार का है कि पाश के प्रत्येक बिंदु पर या तो

© NCERT not to be republished



आंद्रे ऐम्पियर (1775–1836)

आंद्रे ऐम्पियर (1775 –1836) आंद्रे मैरी ऐम्पियर एक फ्रांसीसी भौतिक विज्ञानी, गणितज्ञ एवं रसायनज्ञ थे जिन्होंने विद्युतगतिकी विज्ञान की आधारशिला रखी। ऐम्पियर एक बाल प्रतिभा थे जिसने 12 वर्ष की आयु में उच्च गणित में महारत हासिल कर ली थी। ऐम्पियर ने ऑर्स्टेड की खोज का महत्त्व समझा और धारा विद्युत एवं चुंबकत्व में संबंध खोजने के लिए प्रयोगों की एक लंबी शृंखला पार की। इन खोजों की परिणति 1827 में, *Mathematical theory of Electrodynamic Phenomena Deduced Solely from Experiments* नामक पुस्तक के प्रकाशन के रूप में हुई। उन्होंने परिकल्पना की कि सभी चुंबकीय प्रक्रम, वृत्तवाही विद्युत धाराओं के कारण होते हैं। ऐम्पियर स्वभाव से बहुत विनम्र और भुलक्कड़ थे। एक बार वह सम्राट नेपोलियन का रात्रिभोज का निमंत्रण भी भूल गए थे। 61 वर्ष की उम्र में न्यूमोनिया से उनकी मृत्यु हो गई। उनकी कब्र के पत्थर पर यह समाधि लेख उत्कीर्णित है – *Tandem felix* (अंत में प्रसन्न)।

(i) **B** पाश के स्पर्शरेखीय है तथा शून्येतर नियतांक B है, अथवा

(ii) **B** पाश के अभिलंबवत है, अथवा

(iii) **B** नष्ट हो जाता है।

अब मान लीजिए L पाश की वह लंबाई (भाग) है जिसके लिए **B** स्पर्शरेखीय है। मान लीजिए पाश में परिवद्ध विद्युत धारा I_e है। तब समीकरण (4.17) को इस प्रकार व्यक्त कर सकते हैं

$$BL = \mu_0 I_e \qquad [4.17(b)]$$

जब किसी निकाय में इस प्रकार की सममिति हो जैसे कि चित्र 4.15 में सीधे विद्युत धारावाही अनंत तार के लिए है, तब ऐम्पियर का नियम हमें चुंबकीय क्षेत्र का एक सरल मूल्यांकन करने योग्य बनाता है जो ठीक उसी प्रकार है जैसे कि गाउस नियम विद्युत क्षेत्र को निर्धारित करने में हमारी सहायता करता है। इसे नीचे दिए गए उदाहरण 4.9 में दर्शाया गया है। पाश की सीमा रेखा का चयन एक वृत्त है तथा चुंबकीय क्षेत्र वृत्त की परिधि के स्पर्शरेखीय है। समीकरण [4.17 (b)] के वाम पक्ष के लिए इस नियम से प्राप्त मान B. $2\pi r$ है। हम यह पाते हैं कि तार के बाहर r दूरी पर चुंबकीय क्षेत्र स्पर्शरेखीय है तथा इसे इस प्रकार व्यक्त किया जा सकता है।

$$B \times 2\pi r = \mu_0 I,$$

$$B = \mu_0 I/(2\pi r) \qquad (4.18)$$

उपरोक्त परिणाम अनंत लंबाई के तार के लिए है जो कई दृष्टिकोणों से रोचक है–

(i) इसमें यह अंतर्निहित है कि r त्रिज्या के वृत्त के प्रत्येक बिंदु पर (तार को अक्ष के अनुदिश रखते हुए) क्षेत्र का परिमाण समान है। दूसरे शब्दों में चुंबकीय क्षेत्र में *बेलनाकार सममिति* है जो क्षेत्र सामान्यत: तीन निर्देशांकों पर निर्भर कर सकता है केवल एक ही निर्देशांक r पर निर्भर है। जहाँ कहीं भी सममिति होती है समस्याओं के हल सरल हो जाते हैं।

(ii) इस वृत्त के किसी भी बिंदु पर क्षेत्र की दिशा इसके स्पर्शरेखीय है। इस प्रकार चुंबकीय क्षेत्र की नियत परिमाण की रेखाएँ संकेंद्री वृत्त बनाती हैं। अब चित्र 4.1(c) पर ध्यान दीजिए, लौह चूर्ण वृत्त संकेंद्री में व्यवस्थित हुआ है। ये रेखाएँ जिन्हें हम चुंबकीय क्षेत्र रेखाएँ कहते है, बंद पाश बनाती हैं। यह स्थिरवैद्युत क्षेत्र रेखाओं से भिन्न हैं। स्थिरवैद्युत क्षेत्र रेखाएँ धन आवेशों से आरंभ तथा ऋण आवेशों पर समाप्त होती हैं। सीधे विद्युत धारावाही चालक के चुंबकीय क्षेत्र के लिए व्यंजक ओर्स्टेड प्रयोग का सैद्धांतिक स्पष्टीकरण करता है।

(iii) एक अन्य ध्यान देने योग्य रोचक बात यह है कि यद्यपि तार अनंत लंबाई का है, तथापि शून्येतर दूरी पर इसके कारण चुंबकीय क्षेत्र अनंत नहीं है। यह केवल तार के अत्यधिक पास आने पर विस्फुटित होता है। यह क्षेत्र विद्युत धारा के अनुक्रमानुपाती है तथा विद्युत धारा स्रोत (अनंत लंबाई के) से दूरी के व्युत्क्रमानुपाती है।

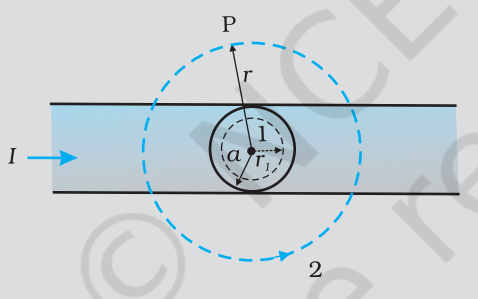
© NCERT not to be republished

(iv) लंबे तार के कारण उत्पन्न चुंबकीय क्षेत्र की दिशा को निर्धारित करने का एक सरल नियम है। इस नियम को दक्षिण हस्त नियम* कहते हैं। यह इस प्रकार है

तार को अपने दाएँ हाथ में इस प्रकार पकड़िए कि आपका तना हुआ अँगूठा विद्युत धारा की दिशा की ओर संकेत करे। तब आपकी अँगुलियों के मुड़ने की दिशा चुंबकीय क्षेत्र की दिशा में होगी।

ऐम्पियर का परिपथीय नियम बायो-सावर्ट नियम से भिन्न नहीं है। दोनों ही नियम विद्युत धारा तथा चुंबकीय क्षेत्र में संबंध व्यक्त करते हैं तथा दोनों ही स्थायी विद्युत धारा के समान भौतिक परिणामों को व्यक्त करते हैं। जो संबंध ऐम्पियर के नियम तथा बायो-सावर्ट नियम के बीच है ठीक वही संबंध गाउस नियम तथा कूलॉम नियम के बीच में है। ऐम्पियर का नियम तथा गाउस का नियम दोनों ही परिरेखा अथवा परिपृष्ठ पर किसी भौतिक राशि (चुंबकीय अथवा विद्युत क्षेत्र) का संबंध किसी अन्य भौतिक राशि जैसे अन्तः क्षेत्र में उपस्थित स्रोत (विद्युत धारा अथवा आवेश) के बीच संबंध व्यक्त करते हैं। यहाँ ध्यान देने योग्य बात यह भी है कि ऐम्पियर का परिपथीय नियम केवल उन स्थायी विद्युत धाराओं पर लागू होता है जो समय के साथ परिवर्तित नहीं होतीं। निम्नलिखित उदाहरण हमें परिबद्ध विद्युत धारा का अर्थ समझने में सहायता करेगा।

उदाहरण 4.8 चित्र 4.15 में एक लंबा सीधा वृत्ताकार अनुप्रस्थ काट का (जिसकी त्रिज्या a है) विद्युत धारावाही तार जिससे स्थायी विद्युत धारा I प्रवाहित हो रही हो, दर्शाया गया है। स्थायी विद्युत धारा इस अनुप्रस्थ काट पर एकसमान रूप से वितरित है। क्षेत्रों $r < a$ तथा $r > a$ में चुंबकीय क्षेत्र परिकलित कीजिए



चित्र 4.15

हल (a) प्रकरण $r > a$ पर विचार कीजिए। जिस पाश पर 2 अंकित है वह अनुप्रस्थ काट के साथ संकेंद्री वृत्त के रूप में ऐम्पियर पाश है। इस पाश के लिए

$L = 2\pi r$

I_e = पाश द्वारा परिबद्ध विद्युत धारा = I

यह परिणाम किसी सीधे लंबे तार के लिए सुपरिचित व्यंजक है।

$B(2\pi r) = \mu_0 I$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad [4.19(a)]$$

$$B \propto \frac{1}{r} \quad (r > a)$$

(b) प्रकरण $r < a$ पर विचार कीजिए। इसके लिए ऐम्पियर पाश वह वृत्त है जिस पर 1 अंकित है।

उदाहरण 4.8

* कृपया ध्यान दीजिए–दो सुस्पष्ट (पृथक) नियम हैं जिन्हें *दक्षिण हस्त नियम* कहते हैं। इनमें से एक नियम विद्युत धारा पाश के अक्ष पर चुंबकीय क्षेत्र **B** की दिशा देता है तथा दूसरा सीधे विद्युत धारावाही चालक तार के लिए **B** की दिशा है। इन नियमों में अँगूठे तथा अँगुलियों की भिन्न भूमिका है।

© NCERT not to be republished

उदाहरण 4.8

इस पाश के लिए वृत्त की त्रिज्या r लेने पर,

$$L = 2\pi r$$

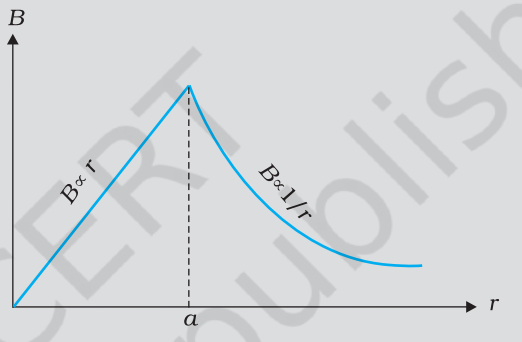
अब यहाँ परिबद्ध विद्युत धारा I_e का मान I नहीं है परंतु यह इस मान से कम है। चूँकि विद्युत धारा का विवरण एकसमान है, परिबद्ध विद्युत धारा के अंश का मान

$$I_e = I\left(\frac{\pi r^2}{\pi a^2}\right) = \frac{Ir^2}{a^2}$$

ऐम्पियर के नियम का उपयोग करने पर $B(2\pi r) = \mu_0 \frac{Ir^2}{a^2}$

$$B = \left(\frac{\mu_0 I}{2\pi a^2}\right) r \qquad [4.19(b)]$$

$B \propto r \quad (r < a)$



चित्र 4.16

चित्र (4.16) में **B** के परिमाण तथा तार के केंद्र से दूरी r के बीच ग्राफ दर्शाया गया है। चुंबकीय क्षेत्र की दिशा अपने-अपने वृत्ताकार पाशों (1 अथवा 2) के स्पर्शरेखीय है तथा यह इसी अनुभाग में पहले वर्णन किए जा चुके दक्षिण हस्त नियम से निर्धारित की गई है। इस उदाहरण में आवश्यक सममिति विद्यमान है इसलिए इसी पर ऐम्पियर का नियम आसानी से लागू किया जा सकता है।

यहाँ ध्यान देने योग्य बात यह है कि जबकि ऐम्पियर के परिपथीय नियम को किसी भी पाश पर लागू किया जा सकता है परंतु यह हर प्रकरण में चुंबकीय क्षेत्र का मूल्यांकन सदैव ही आसान नहीं बनाता। उदाहरण के लिए, अनुभाग 4.6 में वर्णन किए गए वृत्ताकार पाश के प्रकरण में, इसे सरल व्यंजक $B = \mu_0 I/2R$ [समीकरण (4.16)] को, जोकि पाश के केंद्र पर चुंबकीय क्षेत्र के लिए है, प्राप्त करने के लिए लागू नहीं किया जा सकता। तथापि ऐसी बहुत सी परिस्थितियाँ हैं जिनमें उच्च सममिति होती है तथा इस नियम को सुविधापूर्वक लागू किया जा सकता है। अगले अनुभाग में हम इसका उपयोग दो सामान्यत: उपयोग होने वाले अत्यंत उपयोगी चुंबकीय निकायों– *परिनालिका* एवं *टोरॉइड* द्वारा उत्पन्न चुंबकीय क्षेत्रों को परिकलित करने में करेंगे।

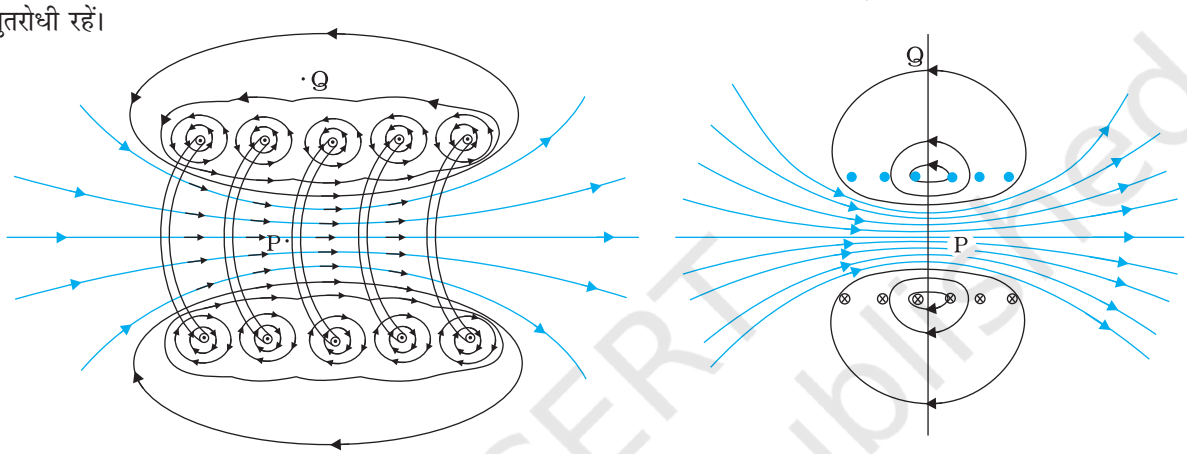
4.8 परिनालिका तथा टोरॉइड

परिनालिका तथा टोरॉइड ऐसे दो उपकरण हैं जो चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करते हैं। सिंक्रोट्रॉन में आवश्यक चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करने के लिए इन दोनों का संयुक्त रूप से उपयोग किया जाता है। परिनालिका तथा टोरॉइड दोनों में ही हमें उच्च सममिति की ऐसी स्थिति देखने को मिलती है जिनमें ऐम्पियर-नियम आसानी से लागू किया जा सकता है।

© NCERT not to be republished

4.8.1 परिनालिका

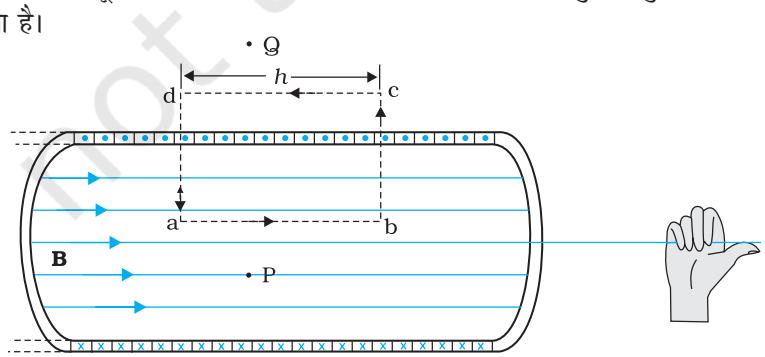
हम यहाँ एक लंबी परिनालिका के विषय में चर्चा करेंगे। लंबी परिनालिका से हमारा तात्पर्य यह है कि परिनालिका की लंबाई उसकी त्रिज्या की तुलना में अधिक है। परिनालिका में एक लंबा तार सर्पिल के आकार में लिपटा होता है जिसमें प्रत्येक फेरा अपने निकट के फेरे के साथ काफ़ी सटा होता है। इस प्रकार फेरे को एक वृत्ताकार पाश माना जा सकता है। किसी परिनालिका के सभी फेरों के कारण उत्पन्न कुल चुंबकीय क्षेत्र प्रत्येक फेरे के चुंबकीय क्षेत्रों का सदिश योग होता है। परिनालिका पर लपेटने के लिए इनैमलित तारों का उपयोग किया जाता है ताकि फेरे एक दूसरे से विद्युतरोधी रहें।



(a) (b)

चित्र 4.17 (a) परिनालिका के किसी भाग जिसे स्पष्टता की दृष्टि से बाहर खींचा दर्शाया गया है, के कारण चुंबकीय क्षेत्र। केवल बाह्य अर्धवृत्ताकार भाग दर्शाया गया है। ध्यान से देखिए, किस प्रकार पास-पास स्थित फेरों के बीच चुंबकीय क्षेत्र एक दूसरे को निरसित कर देते हैं। (b) किसी परिमित परिनालिका का चुंबकीय क्षेत्र।

चित्र 4.17 में किसी परिमित परिनालिका का चुंबकीय क्षेत्र दर्शाया गया है। चित्र 4.17 (a) में हमने इस परिनालिका के एक खंड को विस्तारित करके दिखाया है। चित्र 4.17 (b) में वृत्ताकार पाश से यह स्पष्ट है कि दो पास-पास के फेरों के बीच चुंबकीय क्षेत्र नष्ट हो जाता है। चित्र 4.17 (b) में हम यह देखते हैं कि अन्त:भाग के मध्य बिंदु P पर चुंबकीय क्षेत्र एकसमान, प्रबल तथा परिनालिका के अक्ष के अनुदिश है। बाह्य भाग के मध्य बिंदु Q पर चुंबकीय क्षेत्र दुर्बल है और साथ ही यह परिनालिका के अक्ष के अनुदिश है तथा इसका लंबवत अथवा अभिलंबवत कोई घटक भी नहीं है। जैसे-जैसे परिनालिका की लंबाई में वृद्धि होती है वह लंबी बेलनाकार धातु के पटल जैसी दिखाई देने लगती है। चित्र 4.18 में यह आदर्शीकृत चित्रण निरूपित किया गया है। परिनालिका के बाहर चुंबकीय क्षेत्र शून्य होने लगता है। परिनालिका के भीतर हर बिंदु पर चुंबकीय क्षेत्र अक्ष के समांतर होता है।



चित्र 4.18 अत्यधिक लंबी परिनालिका का चुंबकीय क्षेत्र। चुंबकीय क्षेत्र को निर्धारित करने के लिए हम एक आयताकार ऐम्पियर-पाश *a*, *b*, *c*, *d* पर विचार करते हैं।

© NCERT not to be republished

किसी आयताकार ऐम्पियर-पाश abcd पर विचार करिए। जैसा कि ऊपर तर्क दिया जा चुका है cd के अनुदिश क्षेत्र शून्य है। अनुप्रस्थ खंडों bc तथा ad के अनुदिश चुंबकीय क्षेत्र का घटक शून्य है। इस प्रकार ये दोनों खंड चुंबकीय क्षेत्र में कोई योगदान नहीं देते। मान लीजिए ab के अनुदिश चुंबकीय क्षेत्र B है, इस प्रकार, ऐम्पियर-पाश की प्रासंगिक लंबाई $L = h$ ।

मान लीजिए प्रति एकांक लंबाई फेरों की संख्या n है, तब फेरों की कुल संख्या nh है। इस प्रकार परिबद्ध विद्युत धारा है $I_e = I\,(n\,h)$, यहाँ I परिनालिका में प्रवाहित विद्युत धारा है। ऐम्पियर के परिपथीय नियम के अनुसार [समीकरण 4.17 (b) से]

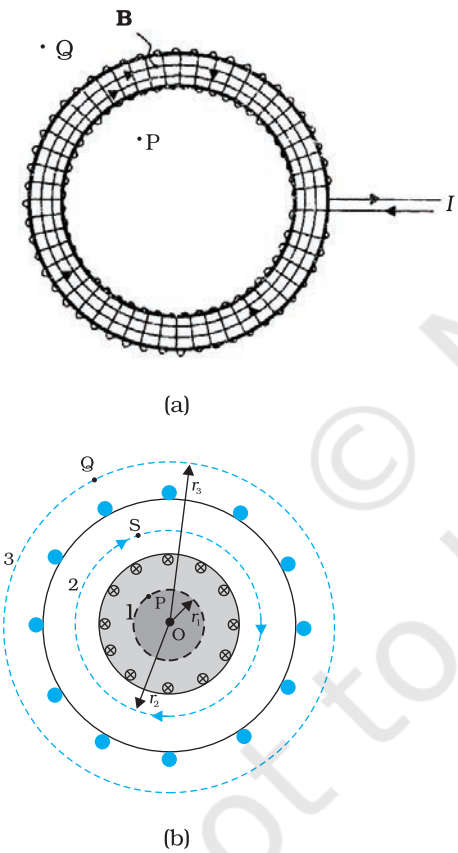
$$BL = \mu_0 I_e, \quad B\,h = \mu_0 I\,(n\,h)$$

$$B = \mu_0\, n\, I \qquad (4.20)$$

क्षेत्र की दिशा दक्षिण हस्त नियम से प्राप्त होती है। परिनालिका का सामान्यत: उपयोग एकसमान चुंबकीय क्षेत्र प्राप्त करने के लिए किया जाता है। अगले अध्याय में हम यह देखेंगे कि परिनालिका में भीतर नर्म लौह क्रोड रखकर विशाल चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करना संभव है।

4.8.2 टोरॉइड

यह एक वृत्ताकार खोखला छल्ला होता है जिस पर किसी तार के अत्यधिक फेरे पास-पास सटाकर लपेटे जाते हैं। इसे एक ऐसी परिनालिका के रूप में भी देखा जा सकता है जिसे बंद करने के लिए वृत्ताकार मोड़ दिया गया है। इसे चित्र 4.19 (a) में दर्शाया गया है। इससे I विद्युत धारा प्रवाहित हो रही है। हम यह देखेंगे कि टोरॉइड के भीतर खुले दिक्स्थान में (बिंदु P) तथा टोरॉइड के बाहर (बिंदु Q) पर चुंबकीय क्षेत्र शून्य है। किसी आदर्श टोरॉइड जिसके फेरे सटाकर लिपटे होते हैं, के लिए टोरॉइड के भीतर चुंबकीय क्षेत्र **B** नियत रहता है।



चित्र 4.19 (a) टोरॉइड से विद्युत धारा I प्रवाहित होते हुए (b) टोरॉइड की अनुप्रस्थ काट का दृश्य। ऐम्पियर-परिपथीय नियम द्वारा टोरॉइड के केंद्र O से किसी यादृच्छिक दूरी r पर चुंबकीय क्षेत्र प्राप्त किया जा सकता है। 1, 2, 3 द्वारा अंकित खंडित रेखाएँ इनके वृत्ताकार ऐम्पियर-पाश हैं।

चित्र 4.19 (b) में टोरॉइड की अनुप्रस्थ काट दर्शायी गई है। वृत्ताकार-पाशों के लिए दक्षिण हस्त नियम के अनुसार टोरॉइड के भीतर चुंबकीय क्षेत्र की दिशा दक्षिणावर्त है। खंडित रेखाएँ जिन पर 1, 2, 3 अंकित हैं, इसके तीन ऐम्पियर-पाश हैं। सममिति के अनुसार चुंबकीय क्षेत्र इन पाशों में प्रत्येक के स्पर्शरेखीय होना चाहिए तथा प्रत्येक पाश के लिए इसका परिमाण नियत होना चाहिए। पाश 2 तथा 3 इन दोनों द्वारा घेरे गए वृत्ताकार क्षेत्र टोरॉइड को काटते हैं; इस प्रकार विद्युत धारावाही तार को प्रत्येक फेरा पाश 2 को एक तथा पाश 3 को दो बार काटता है।

मान लीजिए पाश 1 के अनुदिश चुंबकीय क्षेत्र का परिमाण B_1 है। तब ऐम्पियर के परिपथीय नियम में [समीकरण 4.17 (a)] $L = 2\pi\, r_1$
तथापि, यह पाश कोई विद्युत धारा परिबद्ध नहीं करता, अत: $I_e = 0$। इस प्रकार

$$B_1\,(2\,\pi\,r_1) = \mu_0(0), \quad B_1 = 0$$

इस प्रकार टोरॉइड के भीतर खुले क्षेत्र में किसी भी बिंदु P पर चुंबकीय क्षेत्र शून्य होता है।

अब हम यह दर्शाएँगे कि इसी प्रकार Q पर भी चुंबकीय क्षेत्र शून्य है। मान लीजिए पाश 3 के अनुदिश चुंबकीय क्षेत्र B_3 है। एक बार फिर ऐम्पियर के नियम के अनुसार $L = 2\,\pi\,r_3$, तथापि अनुप्रस्थ काट से हम यह देखते हैं कि कागज़ के तल से बाहर निकलती विद्युत धारा कागज़ के तल के भीतर जाती विद्युत धारा से ठीक-ठीक निरसित हो जाती है। अत: $I_e = 0$, तथा $B_3 = 0$ । मान लीजिए टोरॉइड के भीतर चुंबकीय क्षेत्र B है। अब हम S पर चुंबकीय क्षेत्र के बारे में विचार करेंगे। एक बार फिर हम ऐम्पियर के नियम का उपयोग [समीकरण [4.17 (a)] के रूप में करते हैं। हम पाते हैं कि $L = 2\pi\, r$

परिबद्ध विद्युत धारा I_e का मान (टोरॉइडी कुंडली के N फेरों के लिए) $N\,I$ है।

© NCERT not to be republished

$$B\,(2\pi r) = \mu_0 NI$$

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r} \qquad (4.21)$$

हम अब टोरॉइड तथा परिनालिका के लिए प्राप्त इन दो परिणामों की तुलना करेंगे। हम समीकरण (4.21) के व्यंजक की परिनालिका के लिए समीकरण (4.20) में दिए गए व्यंजक से तुलना करने के लिए समीकरण (4.21) को दुबारा नए रूप में व्यक्त करेंगे। मान लीजिए टोरॉइड की औसत त्रिज्या r है तथा इसमें प्रति एकांक लंबाई फेरों की संख्या n है, तब

$N = 2\pi r\, n$ = *टोरॉइड की (औसत) परिधि*

× *प्रति एकांक लंबाई फेरों की संख्या*

तथा, इस प्रकार

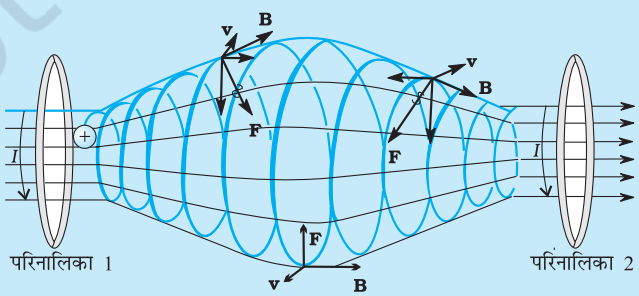
$$B = \mu_0\, n\, I, \qquad (4.22)$$

अर्थात, यही परिणाम हमें परिनालिका के लिए प्राप्त हुआ था।

आदर्श टोरॉइड में कुंडलियाँ पूर्णतः वृत्ताकार होती हैं। वास्तव में टोरॉइड के फेरे सर्पिलाकार कुंडली बनाते हैं तथा इसके बाहर सदैव ही एक क्षीण चुंबकीय क्षेत्र पाया जाता है।

चुंबकीय परिरोधन

हमने अनुभाग 4.3 में यह देखा है (इस अध्याय के आरंभ में बॉक्स आवेशित कणों की सर्पिलाकार गति देखें) कि आवेशित कणों की कक्षाएँ सर्पिलाकार होती हैं। यदि चुंबकीय क्षेत्र असमान है, परंतु एक वर्तुल कक्षा में जिसका अधिक परिवर्तन नहीं होता है तब सर्पिल की त्रिज्या प्रबल चुंबकीय क्षेत्र में प्रवेश करने पर घटेगी तथा दुर्बल क्षेत्र में प्रवेश करने पर बढ़ेगी। हम दो परिनालिकाओं पर विचार करते हैं जो एक दूसरे से कुछ दूरी पर हैं तथा निर्वातित पात्र में परिबद्ध हैं। (नीचे दिए गए चित्र को देखें जिसमें हमने पात्र को नहीं दर्शाया है)। परिनालिकाओं के मध्य क्षेत्र में गति करने वाले आवेशित कण अपनी अपनी गति छोटी त्रिज्या से आरंभ करेंगे। जैसे क्षेत्र कम होगा, त्रिज्या में वृद्धि होगी तथा त्रिज्या में फिर कमी होगी जब परिनालिका 2 के कारण चुंबकीय क्षेत्र में वृद्धि होगी। परिनालिकाएँ दर्पण अथवा परावर्तक की भाँति कार्य करती हैं [जैसे ही कण परिनालिका 2 की तरफ़ पहुँचता है चित्र में बल **F** की दिशा देखें। इसका क्षैतिज घटक अग्रदिश गति के विरुद्ध है।] जिसके कारण कण दूसरी परिनालिका 2 के पास पहुँचते ही वापस भेज दिया जाता है। इस प्रकार की व्यवस्था एक चुंबकीय बोतल अथवा चुंबकीय पात्र की भाँति कार्य करेगी। कण पात्र के दोनों तरफ़ की सीमाओं को कभी स्पर्श नहीं करेगा। ऐसी चुंबकीय बोतल संलयन प्रयोगों में उच्च ऊर्जा 'प्लाज्मा' को परिरोधित करने में बहुत उपयोगी है। अपने उच्च ताप के कारण 'प्लाज्मा' किसी भी पदार्थ की अन्य अवस्था को नष्ट कर देगा। एक अन्य उपयोगी संयोजन टोरॉइड है। टोकामैक में टोरॉइड की प्रमुख भूमिका निभाने की आशा की जाती है। टोकामैक संलयन शक्ति रिएक्टरों में प्लाज़्मा परिरोधन के लिए उपयोगी उपकरण है। यहाँ एक अंतर्राष्ट्रीय सहयोग अंतर्राष्ट्रीय ताप-नाभिकीय प्रयोगात्मक रिएक्टर (ITER) नियंत्रित संलयन प्राप्त करने के लिए फ्रांस में स्थापित हो रहा है जिसका भारत एक सहयोगी राष्ट्र है। ITER से सहयोग एवं परियोजना संबंधी विस्तृत जानकारी के लिए देखें http://www.iter.org.



2022-23

उदाहरण 4.9

उदाहरण 4.9 कोई परिनालिका जिसकी लंबाई 0.5 m तथा त्रिज्या 1 cm है, में 500 फेरे हैं। इसमें 5 A विद्युत धारा प्रवाहित हो रही है। परिनालिका के भीतर चुंबकीय क्षेत्र का परिमाण क्या है?

हल प्रति एकांक लंबाई फेरों की संख्या

$$n = \frac{500}{0.5} = 1000 \quad \text{फेरे प्रति मीटर}$$

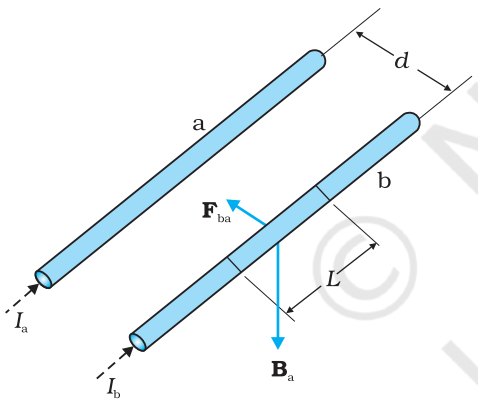
लंबाई $l = 0.5$ m तथा त्रिज्या $r = 0.01$ m। इस प्रकार, $l/a = 50$ अर्थात $l >> a$

अत: हम *लंबी* परिनालिका का सूत्र [समीकरण (4.20)] का उपयोग कर सकते हैं

$$B = \mu_0 n I$$
$$= 4\pi \times 10^{-7} \times 10^3 \times 5$$
$$= 6.28 \times 10^{-3} \text{ T}$$

4.9 दो समांतर विद्युत धाराओं के बीच बल–ऐम्पियर

हम यह सीख चुके हैं कि किसी विद्युत धारावाही चालक के कारण चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न होता है तो बायो-सावर्ट नियम का पालन करता है। साथ ही हमने यह भी सीखा है कि विद्युत धारावाही चालक पर बाह्य चुंबकीय क्षेत्र बल आरोपित करता है। यह लोरेंज बल सूत्र का अनुगमन करता है। अत: यह आशा करना तर्कसंगत है कि एक-दूसरे के पास स्थित दो विद्युत धारावाही चालक एक दूसरे पर (चुंबकीय) बल आरोपित करेंगे। सन् 1820-25 की अवधि में ऐम्पियर ने इस चुंबकीय बल की प्रकृति, इसकी विद्युत धारा के परिमाण, चालक की आकृति तथा आमाप पर निर्भरता के साथ इन चालकों के बीच की दूरी पर निर्भरता का अध्ययन किया। इस अनुभाग में हम दो समांतर विद्युत धारावाही चालकों के सरल उदाहरण पर ही चर्चा करेंगे जो कदाचित ऐम्पियर के श्रम साध्य कार्यों के प्रति आभार प्रकट करने में हमारी सहायता करेंगे।



चित्र 4.20 दो लंबे सीधे, समांतर चालक जिनमें अपरिवर्ती धारा i_a एवं i_b प्रवाहित हो रही है और जो एक-दूसरे से d दूरी पर रखे हैं। चालक *'a'* के कारण चालक *'b'* पर उत्पन्न चुंबकीय क्षेत्र $\mathbf{B}_a$ है।

चित्र 4.20 में दो लंबे समांतर चालक a तथा b दर्शाए गए हैं जिनके बीच पृथकन d है तथा जिनसे (समांतर) क्रमश: I_a तथा I_b विद्युत धाराएँ प्रवाहित हो रही हैं। चालक 'a' चालक 'b' के अनुदिश प्रत्येक बिंदु पर समान चुंबकीय क्षेत्र $\mathbf{B}_a$ लगा रहा है। तब दक्षिण हस्त नियम के अनुसार इस चुंबकीय क्षेत्र की दिशा अधोमुखी (जब चालक क्षैतिजत: रखे होते हैं) है। ऐम्पियर के परिपथीय नियम अथवा [समीकरण [4.19 (a)] के अनुसार इस चुंबकीय क्षेत्र का परिमाण

$$B_a = \frac{\mu_0 I_a}{2\pi d}$$

चालक 'b' जिससे विद्युत धारा I_b प्रवाहित हो रही है $\mathbf{B}_a$ के कारण पार्श्वत: एक बल का अनुमान करता है। इस बल की दिशा चालक 'a' की ओर होती है। (आप इसकी पुष्टि स्वयं कर सकते हैं) हम इस बल को $\mathbf{F}_{ba}$ द्वारा नामांकित करते हैं, जोकि 'a' के कारण 'b' के खंड **L** पर लगा बल है। समीकरण (4.4) से इस बल का परिमाण

$$F_{ba} = I_b L B_a$$

© NCERT not to be republished

$$= \frac{\mu_0 I_a I_b}{2\pi d} L \qquad (4.23)$$

वास्तव में 'b' के कारण 'a' पर बल को परिकलित करना संभव है। जिस प्रकार हमने ऊपर विचार किया था उसी प्रकार के विचारों के द्वारा हम 'b' में प्रवाहित विद्युत धारा के कारण 'a' के खंड L पर बल $\mathbf{F}_{ab}$ के बराबर तथा 'b' की ओर निर्दिष्ट ज्ञात कर सकते हैं। यह परिमाण में $\mathbf{F}_{ba}$ के बराबर तथा 'b' की ओर निर्दिष्ट होता है। इस प्रकार

$$\mathbf{F}_{ba} = -\mathbf{F}_{ab} \qquad (4.24)$$

ध्यान दीजिए, यह न्यूटन के तीसरे गति के नियम के अनुरूप है। इस प्रकार हमने समांतर चालकों तथा अपरिवर्ती विद्युत धाराओं के लिए यह तो दर्शा ही दिया है कि बायो-सावर्ट नियम तथा लोरेंज बल द्वारा प्राप्त परिणाम न्यूटन के गति के तीसरे नियम के अनुरूप है।*

हमने ऊपर प्राप्त परिणामों से यह पाया कि समान दिशा में प्रवाहित होने वाली विद्युत धाराएँ एक दूसरे को आकर्षित करती हैं। हम यह भी दर्शा सकते हैं कि विपरीत दिशाओं में प्रवाहित होने वाली विद्युत धाराएँ एक दूसरे को प्रतिकर्षित करती हैं। इस प्रकार

समांतर धाराएँ आकर्षित तथा प्रतिसमांतर धाराएँ प्रतिकर्षित करती हैं।

यह नियम उस नियम के विपरीत है जिसका हमने स्थिरवैद्युतिकी में अध्ययन किया था– "सजातीय आवेशों में प्रतिकर्षण तथा विजातीय आवेशों में आकर्षण होता है।" परंतु सजातीय (समांतर) धाराएँ एक दूसरे को आकर्षित करती हैं।

मान लीजिए f_{ba} बल $\mathbf{F}_{ba}$ के प्रति एकांक लंबाई पर आरोपित बल के परिमाण को निरूपित करता है। तब समीकरण (4.23) से,

$$f_{ba} = \frac{\mu_0 I_a I_b}{2\pi d} \qquad (4.25)$$

उपरोक्त व्यंजक का उपयोग विद्युत धारा के मात्रक ऐम्पियर (A) की परिभाषा को प्राप्त करने में किया जा सकता है। यह सात SI मूल मात्रकों में से एक है।

एक ऐम्पियर वह अपरिवर्ती विद्युत धारा है जो दो लंबे, सीधे उपेक्षणीय अनुप्रस्थ काट के निर्वात में एक दूसरे से 1m दूरी पर स्थित समांतर चालकों में प्रवाहित हो, तो इनमें से प्रत्येक चालक की प्रति मीटर लंबाई पर 2×10^{-7}N का बल उत्पन्न होता है।

'ऐम्पियर' की यह परिभाषा सन् 1946 में अपनायी गई थी। यह एक सैद्धांतिक परिभाषा है। व्यवहार में हमें पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र के प्रभाव को विलुप्त करना चाहिए तथा बहुत लंबे तारों के स्थान पर उचित ज्यामिति की बहुफेरों की कुंडलियाँ लेनी चाहिए। एक उपकरण, जिसे 'धारा तुला' कहते हैं, का उपयोग इस यांत्रिक बल की माप के लिए किया जाता है।

आवेश के SI मात्रक, अर्थात कूलॉम को अब हम ऐम्पियर के पदों में परिभाषित कर सकते हैं।

जब किसी चालक में 1A की अपरिवर्ती विद्युत धारा प्रवाहित होती है तो उसकी अनुप्रस्थ काट से एक सेकंड में प्रवाहित आवेश की मात्रा एक कूलॉम (1C) होती है।

---

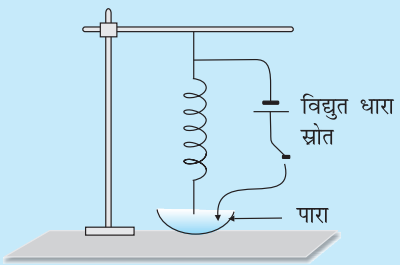
* इससे यह अर्थ निकलता है कि जब हमारे पास समय निर्भर विद्युत धाराएँ/अथवा गतिशील आवेश होती हैं तब आवेशों/चालकों के बीच बलों के लिए न्यूटन का तीसरा नियम लागू नहीं होता। न्यूटन के तीसरे नियम का आवश्यक परिणाम यांत्रिकी में किसी वियुक्त निकाय के संवेग का संरक्षण है। तथापि यह विद्युत चुंबकीय क्षेत्रों के साथ समय निर्भर स्थितियों के प्रकरण पर लागू होती है, परंतु इस शर्त के साथ कि क्षेत्रों द्वारा वहन संवेग को भी सम्मिलित किया जाए।

2022-23

समांतर विद्युत धाराओं के बीच आकर्षण के लिए रागेट का सर्पिल

चुंबकीय प्रभाव सामान्यत: विद्युत प्रभावों से कम प्रभावी होते हैं। इसके परिणामस्वरूप विद्युत धाराओं के बीच बल, कारक μ के अल्पमान के कारण, अल्प परिमाण के होते हैं। इसीलिए विद्युत धाराओं के बीच आकर्षण अथवा प्रतिकर्षण के बलों को निदर्शित करना कठिन है। इस प्रकार प्रत्येक तार से 5 A विद्युत धारा तथा 1 cm पृथकन के लिए प्रति मीटर बल 5×10^{-4} N होता है जो कि लगभग 50 mg भार होता है। यह इस प्रकार होगा जैसे कि किसी घिरनी से डोरी द्वारा लटका 50 mg भार उस डोरी से बँधे तार को खींच रहा हो। इस भार के कारण तार में हुआ विस्थापन लगभग अदृश्य होगा।

कोमल कमानी का उपयोग करके हम समांतर विद्युत धाराओं की प्रभावी लंबाई में वृद्धि कर सकते हैं तथा पारे (मरकरी) का उपयोग करके हम कुछ मिलीमीटर के विस्थापनों को भी प्रभावशाली ढंग से प्रेक्षणीय बना सकते हैं। आपको ऐसी विद्युत धारा आपूर्ति की आवश्यकता भी होगी जो लगभग 5 A की अचर विद्युत धारा प्रदान करे।



एक ऐसी कोमल कमानी लीजिए जिसका प्राकृतिक दोलन काल लगभग 0.5 – 1 s हो। इसे ऊर्ध्वाधर लटकाकर इसके निचले सिरे पर चित्र में दर्शाए अनुसार एक नोंक जोड़िए। प्याली में थोड़ी मरकरी लीजिए तथा कमानी को इस प्रकार समायोजित कीजिए कि इसकी नोक मरकरी के पृष्ठ के ठीक ऊपर हो। दिष्ट विद्युत धारा (DC स्रोत) स्रोत लेकर इसके एक टर्मिनल को कमानी के ऊपरी सिरे से संयोजित कीजिए तथा दूसरे टर्मिनल को मरकरी में डुबोइए। यदि कमानी की नोंक मरकरी को स्पर्श करती है तो मरकरी से होते हुए विद्युत परिपथ पूरा हो जाता है।

मान लीजिए प्रारंभ में DC स्रोत 'ऑफ' है। मान लीजिए कमानी की नोंक इस प्रकार समायोजित है कि वह मरकरी के पृष्ठ को स्पर्श कर रही है। अब अचर विद्युत धारा स्रोत को 'ऑन' कीजिए तथा मंत्र-मुग्ध करने वाला परिणाम देखिए। कमानी एक झटके के साथ सिकुड़ती है, नोंक मरकरी से बाहर आ जाती है (लगभग 1mm), परिपथ टूट जाता है, विद्युत धारा प्रवाहित होना रुक जाता है, कमानी शिथिल हो जाती है तथा अपनी मूल स्थिति में आने का प्रयास करती है, कमानी की नोंक पुन: मरकरी के पृष्ठ को छूती है तथा परिपथ में विद्युत धारा प्रवाहित होने लगती है और यह चक्र टिक, टिक, टिक के साथ चलता रहता है। आरंभ में आपको अच्छा प्रभाव पाने के लिए कुछ समायोजन की आवश्यकता होती है।

क्योंकि मरकरी की वाष्प ज़हरीली होती है, अत: प्रयोग करते समय अपना चेहरा मरकरी से दूर रखिए। काफ़ी समय तक मरकरी की वाष्प के पास साँस मत खींचिए।

उदाहरण 4.10 किसी निर्धारित स्थान पर पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र का क्षैतिज घटक 3.0×10^{-5} T है, तथा इस क्षेत्र की दिशा भौगोलिक दक्षिण से भौगोलिक उत्तर की ओर है। किसी अत्यधिक लंबे सीधे चालक से 1A की अपरिवर्ती धारा प्रवाहित हो रही है। जब यह तार किसी क्षैतिज मेज़ पर रखा है तथा विद्युत धारा के प्रवाह की दिशाएँ (a) पूर्व से पश्चिम की ओर; (b) दक्षिण से उत्तर की ओर हैं तो तार की प्रत्येक एकांक लंबाई पर बल कितना है?

हल $\mathbf{F} = I\mathbf{l} \times \mathbf{B}$

$F = IlB \sin\theta$

प्रति एकांक लंबाई पर बल

$f = F/l = I B \sin\theta$

(a) जब विद्युत धारा पूर्व से पश्चिम की ओर प्रवाहित होती है, तब

$\theta = 90°$

अत:

$f = I B$

$= 1 \times 3 \times 10^{-5} = 3 \times 10^{-5}$ N m^{-1}

उदाहरण 4.10

2022-23

उदाहरण 4.10

यह ऐम्पियर की परिभाषा में वर्णित बल के मान 2×10^{-7} Nm^{-1} से बड़ा है। अत: ऐम्पियर का मानकीकरण करने के लिए पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र तथा अन्य भूले-भटके क्षेत्रों के प्रभावों को समाप्त करना महत्वपूर्ण है। बल की दिशा अधोमुखी है।

इस दिशा को 'सदिशों के सदिश गुणनफल' के दैशिक गुण के द्वारा प्राप्त किया जा सकता है।

(b) जब विद्युत धारा के प्रवाह की दिशा दक्षिण से उत्तर की ओर है, तो

$\theta = 0^o$

$f = 0$

अत: चालक पर कोई बल कार्य नहीं करता।

4.10 विद्युत धारा पाश पर बल आघूर्ण, चुंबकीय द्विध्रुव

4.10.1 एकसमान चुंबकीय क्षेत्र में आयताकार विद्युत धारा पाश पर बल आघूर्ण

अब हम आपको यह दिखाएँगे कि एकसमान चुंबकीय क्षेत्र में स्थित कोई आयताकार पाश जिससे अपरिवर्ती विद्युत धारा I प्रवाहित हो रही है, एक बल आघूर्ण का अनुभव करता है। इस पर कोई नेट बल आरोपित नहीं होता। यह व्यवहार उस द्विध्रुव के व्यवहार के समरूपी है जो यह एकसमान विद्युत क्षेत्र में दर्शाता है (अनुभाग 1.12 देखिए)।

पहले हम उस सरल प्रकरण पर विचार करते हैं जिसमें आयताकार पाश इस प्रकार स्थित है कि एकसमान चुंबकीय क्षेत्र **B** पाश के तल में है। इसे चित्र 4.21 (a) में दर्शाया गया है।

चुंबकीय क्षेत्र पाश की दो भुजाओं AD तथा BC पर कोई बल आरोपित नहीं करता। यह पाश की भुजा AB के लंबवत है तथा इस पर बल $\mathbf{F}_1$ आरोपित करता है जिसकी दिशा पाश के तल में भीतर की ओर है। इस बल का परिमाण है :

$$F_1 = I\, b\, B$$

इसी प्रकार, चुंबकीय क्षेत्र भुजा CD पर एक बल $\mathbf{F}_2$ आरोपित करता है जो पाश के तल के बाहर की ओर है। इस बल का परिमाण है :

$$F_2 = I\, b\, B = F_1$$

इसी प्रकार पाश पर आरोपित *नेट बल शून्य* है। बलों $\mathbf{F}_1$ तथा $\mathbf{F}_2$ के युगल के कारण पाश पर एक बल आघूर्ण कार्य करता है। चित्र 4.21 (b) में AD सिरे से पाश का एक दृश्य दिखाया गया है। यह स्पष्ट करता है कि यह बल आघूर्ण पाश में वामावर्त घूर्णन की प्रवृत्ति उत्पन्न करता है। इस बल आघूर्ण का परिमाण है :

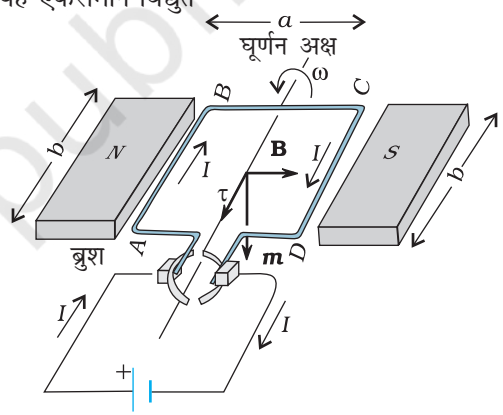
$$\tau = F_1 \frac{a}{2} + F_2 \frac{a}{2}$$

$$= IbB\frac{a}{2} + IbB\frac{a}{2} = I(ab)B$$

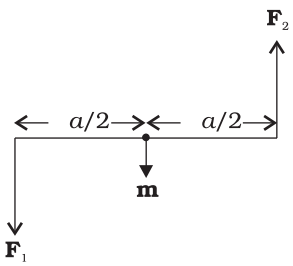
$$= I\,A\,B \qquad (4.26)$$

यहाँ $A = ab$ आयत का क्षेत्रफल है।

अब हम आगे उस प्रकरण पर विचार करेंगे जिसमें पाश का तल चुंबकीय क्षेत्र के अनुदिश नहीं है, परंतु इनके बीच कोई कोण बनता है। हम चुंबकीय



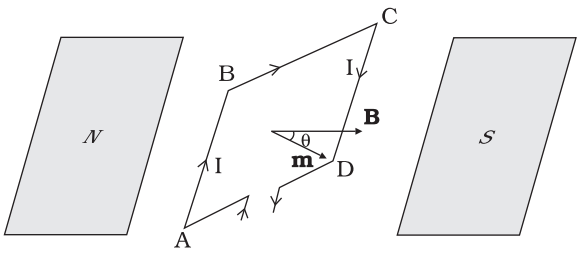
(a)



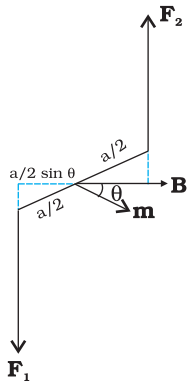
(b)

चित्र 4.21 (a) एकसमान चुंबकीय क्षेत्र में स्थित कोई विद्युत धारावाही आयताकार कुंडली। चुंबकीय आघूर्ण **m** अधोमुखी संकेत करता है। बल आघूर्ण **τ** अक्ष के अनुदिश है तथा इसकी प्रवृत्ति कुंडली को वामावर्त घूर्णन कराने की है। (b) कुंडली पर बल युग्म कार्य करते हुए।

© NCERT not to be republished



(a)



(b)

चित्र 4.22 (a) पाश ABCD का क्षेत्र सदिश चुंबकीय क्षेत्र से कोई यादृच्छिक कोण θ बनाता है। (b) पाश का ऊपरी दृश्य। भुजाओं AB तथा CD पर कार्यरत बल $\mathbf{F}_1$ तथा $\mathbf{F}_2$ दर्शाए गए हैं।

क्षेत्र B तथा कुंडली पर अभिलंब के बीच का कोण θ लेते हैं (पहला प्रकरण $\theta = \pi/2$ के तदनुरूपी है)। चित्र 4.22 में यह व्यापक प्रकरण दर्शाया गया है।

भुजाओं BC तथा DA पर कार्यरत बल परिमाण में समान दिशा में विपरीत तथा कुंडली के अक्ष के अनुदिश कार्य करते हैं। ये बल BC तथा DA के संहति केंद्रों को संयोजित करते हैं। अक्ष के अनुदिश संरेखित होने के कारण ये एक दूसरे को निरस्त करते हैं, परिणामस्वरूप कोई नेट बल अथवा बल आघूर्ण नहीं है। भुजाओं AB तथा CD पर कार्यरत बल $\mathbf{F}_1$ तथा $\mathbf{F}_2$ हैं। ये भी परिमाण सहित समान एवं विपरीत हैं।

$$F_1 = F_2 = I\, b\, B$$

परंतु ये संरेख नहीं हैं। इसके परिणामस्वरूप पहले की तरह एक बल युग्म उत्पन्न होता है। तथापि, पिछले प्रकरण जिसमें पाश का तल चुंबकीय क्षेत्र के अनुदिश था, की तुलना में बल आघूर्ण का परिमाण अब कम है। इसका कारण यह है कि बलयुग्म बनाने वाले बलों के बीच की लंबवत दूरी कम हो गई है। चित्र 4.22(b) में सिरे AD से इस व्यवस्था का दृश्य दिखाया गया है। इसमें यह दर्शाया गया है कि ये दो बल एक बलयुग्म बनाते हैं। पाश पर बल आघूर्ण का परिमाण है :

$$\tau = F_1 \frac{a}{2}\sin\theta + F_2 \frac{a}{2}\sin\theta$$

$$= I\, ab\, B \sin\theta$$

$$= I\, A\, B \sin\theta \qquad (4.27)$$

जैसे-जैसे $\theta \to 0$, बलयुग्म के बलों के बीच लंबवत दूरी भी शून्य की ओर बढ़ती है। इससे बल संरेख बन जाते हैं तथा नेट बल तथा बल आघूर्ण शून्य हो जाते हैं। समीकरणों (4.26) तथा (4.27) के बल आघूर्णों को कुंडली के चुंबकीय आघूर्ण तथा चुंबकीय क्षेत्र के सदिश गुणनफल के रूप में व्यक्त कर सकते हैं। विद्युत धारा पाश के *चुंबकीय आघूर्ण* को हम इस प्रकार परिभाषित करते हैं

$$\mathbf{m} = I\mathbf{A} \qquad (4.28)$$

यहाँ क्षेत्र सदिश $\mathbf{A}$ की दिशा दक्षिण हस्त अंगुष्ठ नियम के अनुसार कागज़ के तल के भीतर की ओर निर्दिष्ट है (चित्र 4.21 देखिए) चूँकि $\mathbf{m}$ तथा $\mathbf{B}$ के बीच का कोण θ है, समीकरणों (4.26) तथा (4.27) को केवल एक व्यंजक द्वारा व्यक्त किया जा सकता है

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{m} \times \mathbf{B} \qquad (4.29)$$

यह स्थिरवैद्युतिकी के प्रकरण के सदृश है। [विद्युत क्षेत्र $\mathbf{E}$ में द्विध्रुव आघूर्ण $\mathbf{p}_e$ का वैद्युत द्विध्रुव]

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{p}_e \times \mathbf{E}$$

जैसा कि समीकरण (4.28) से स्पष्ट है, चुंबकीय क्षेत्र की विमाएँ $[AL^2]$ हैं तथा इसका मात्रक Am^2 है।

समीकरण (4.29) से स्पष्ट है कि जब $\mathbf{m}$ चुंबकीय क्षेत्र $\mathbf{B}$ के समांतर अथवा प्रतिसमांतर होता है तो बल आघूर्ण $\boldsymbol{\tau}$ विलुप्त हो जाता है। जब कुंडली पर बल आघूर्ण नहीं होता तो यह साम्यावस्था की ओर इंगित करता है (यह चुंबकीय आघूर्ण $\mathbf{m}$ की किसी वस्तु पर भी लागू होता है)। जब $\mathbf{m}$

© NCERT not to be republished

तथा **B** समांतर होते हैं तो साम्यावस्था स्थायी होती है। कुंडली में कोई भी घूर्णन होने पर बल आघूर्ण उत्पन्न होता है जो कुंडली को वापस उसकी मूल स्थिति में ला देता है। जब ये प्रतिसमांतर होते हैं तो साम्यावस्था अस्थायी होती है क्योंकि कुंडली में कोई घूर्णन होने पर एक बल आघूर्ण उत्पन्न होता है जो इस घूर्णन में वृद्धि कर देता है। इस बल आघूर्ण की उपस्थिति के कारण ही लघु चुंबक अथवा कोई चुंबकीय द्विध्रुव बाह्य चुंबकीय क्षेत्र के साथ स्वयं को संरेखित कर लेता है।

यदि पाश में पास-पास सटे हुए N फेरे हैं तो बल आघूर्ण के लिए व्यंजक, समीकरण (4.29) अब भी लागू होता है। तब यह व्यंजक इस प्रकार व्यक्त किया जाता है

$$\mathbf{m} = N I \mathbf{A} \qquad (4.30)$$

उदाहरण 4.11 10 cm त्रिज्या की किसी कुंडली जिसमें पास-पास सटे 100 फेरे हैं, में 3.2 A विद्युत धारा प्रवाहित हो रही है। (a) कुंडली के केंद्र पर चुंबकीय क्षेत्र कितना है? (b) इस कुंडली का चुंबकीय आघूर्ण क्या है?

यह कुंडली ऊर्ध्वाधर तल में रखी है तथा किसी क्षैतिज अक्ष जो उसके व्यास से संरेखित है, के परित: घूर्णन करने के लिए स्वतंत्र है। एक 2T का एकसमान चुंबकीय क्षेत्र क्षैतिज दिशा में है जो इस प्रकार है कि आरंभ में कुंडली का अक्ष चुंबकीय क्षेत्र की दिशा में है। चुंबकीय क्षेत्र के प्रभाव में कुंडली 90º के कोण पर घूर्णन कर जाती है। (c) आरंभिक तथा अंतिम स्थिति में कुंडली पर बल आघूर्ण के परिमाण क्या हैं? (d) 90º पर घूर्णन करने के पश्चात कुंडली द्वारा अर्जित कोणीय चाल कितनी है? कुंडली का जड़त्व आघूर्ण 0.1 kg m^2 है।

हल

(a) समीकरण (4.16) से

$$B = \frac{\mu_0 N I}{2R}$$

यहाँ, N = 100; I = 3.2 A, तथा R = 0.1 m इसलिए

$$B = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 10^2 \times 3.2}{2 \times 10^{-1}} = \frac{4 \times 10^{-5} \times 10}{2 \times 10^{-1}} \quad (\pi \times 3.2 = 10 \text{ का उपयोग करने पर})$$

$$= 2 \times 10^{-3}\ \text{T}$$

B की दिशा दक्षिण हस्त अंगुष्ठ नियम द्वारा प्राप्त होती है।

(b) समीकरण (4.30) से चुंबकीय आघूर्ण

$m = N I A = N I \pi r^2 = 100 \times 3.2 \times 3.14 \times 10^{-2} = 10$ A m^2

इस बार फिर दिशा दक्षिण हस्त अंगुष्ठ नियम द्वारा प्राप्त होती है।

(c) $\tau = |\mathbf{m} \times \mathbf{B}|$ [समीकरण (4.29) से]

$= m B \sin\theta$

आरंभ में $\theta = 0$, इस प्रकार आरंभिक बल आघूर्ण $\tau_i = 0$, अंत में $\theta = \pi/2$ (अथवा 90º)

इस प्रकार अंतिम बल आघूर्ण $\tau_f = m B = 10 \times 2 = 20$ N m

(d) न्यूटन के द्वितीय नियम से

$$\mathcal{I} \frac{d\omega}{dt} = m \sin\theta$$

यहाँ $\mathcal{I}$ कुंडली का जड़त्व आघूर्ण है। श्रृंखला नियम के अनुसार

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{d\theta}\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\omega}{dt}\omega$$

इसका उपयोग करने पर,

$$\mathcal{I}\ \omega\, d\omega = m B \sin\theta d\theta$$

उदाहरण 4.11

© NCERT not to be republished

उदाहरण 4.11

$\theta = 0$ से $\theta = \pi/2$ तक समाकलन करने पर,

$$\mathcal{I}\int_0^{\omega_f} \omega\, d\omega = mB\int_0^{\pi/2} \sin\theta\, d\theta$$

$$\mathcal{I}\frac{\omega_f^2}{2} = -mB\cos\theta\,\Big|_0^{\pi/2} = mB$$

$$\omega_f = \left(\frac{2mB}{\mathcal{I}}\right)^{1/2} = \left(\frac{2\times 20}{10^{-1}}\right)^{1/2} = 20\ \text{s}^{-1}$$

उदाहरण 4.12

उदाहरण 4.12

(a) किसी चिकने क्षैतिज तल पर कोई विद्युत धारावाही वृत्ताकार पाश रखा है। क्या इस पाश के चारों ओर ऐसा चुंबकीय क्षेत्र स्थापित किया जा सकता है कि यह पाश अपने अक्ष के चारों ओर स्वयं चक्कर लगाए (अर्थात ऊर्ध्वाधर अक्ष के चारों ओर)।

(b) कोई विद्युत वाही वृत्ताकार पाश किसी एकसमान बाह्य चुंबकीय क्षेत्र में स्थित है। यदि यह पाश घूमने के लिए स्वतंत्र है, तो इसके स्थायी संतुलन का दिक्विन्यास क्या होगा। यह दर्शाइए कि इसमें कुल क्षेत्र (बाह्य क्षेत्र + पाश द्वारा उत्पन्न क्षेत्र) का फ्लक्स अधिकतम होगा।

(c) अनियमित आकृति का कोई विद्युत धारावाही पाश किसी बाह्य चुंबकीय क्षेत्र में स्थित है। यदि तार लचीला है तो यह वृत्ताकार आकृति क्यों ग्रहण कर लेता है?

हल

(a) नहीं, क्योंकि इसके लिए ऊर्ध्वाधर दिशा में बल आघूर्ण $\boldsymbol{\tau}$ की आवश्यकता होगी। परंतु $\boldsymbol{\tau} = I\,\mathbf{A}\times\mathbf{B}$, और चूँकि क्षैतिज पाश का क्षेत्रफल सदिश $\mathbf{A}$ ऊर्ध्वाधर दिशा में है, τ को $\mathbf{B}$ के किसी मान के लिए पाश के तल में होना चाहिए।

(b) स्थायी संतुलन वाला दिक्विन्यास वह है जिसमें पाश का क्षेत्रफल सदिश $\mathbf{A}$ बाह्य चुंबकीय क्षेत्र की दिशा में होता है। इस दिक्विन्यास में पाश द्वारा उत्पन्न चुंबकीय क्षेत्र बाह्य क्षेत्र की दिशा में ही है। इस प्रकार, दोनों क्षेत्र पाश के तल के लंबवत होने के कारण कुल क्षेत्र का अधिकतम फ्लक्स प्रदान करते हैं।

(c) यह क्षेत्र के लंबवत तल में वृत्ताकार पाश का रूप इसलिए ग्रहण कर लेता है ताकि इससे होकर अधिकतम फ्लक्स प्रवाहित हो सके। क्योंकि किसी दी गई परिमिति के लिए वृत्त का क्षेत्रफल किसी भी अन्य आकृति की तुलना में अधिकतम होता है।

4.10.2 वृत्ताकार विद्युत धारा पाश चुंबकीय द्विध्रुव

इस अनुभाग में हम मौलिक चुंबकीय तत्व के रूप में किसी विद्युत धारा पाश के विषय में विचार करेंगे। हम यह दर्शाएँगे कि वृत्ताकार विद्युत धारा पाश के कारण चुंबकीय क्षेत्र (अधिक दूरियों पर) व्यवहार में वैद्युत द्विध्रुव के विद्युत क्षेत्र से बहुत कुछ समान होता है। अनुभाग 4.6 में हमने R त्रिज्या के वृत्ताकार पाश जिससे अपरिवर्ती विद्युत धारा I प्रवाहित हो रही है, के कारण पाश के अक्ष चुंबकीय क्षेत्र का मूल्यांकन किया था। इस चुंबकीय क्षेत्र का परिमाण [समीकरण (4.15)],

$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2\left(x^2 + R^2\right)^{3/2}}$$

तथा इसकी दिशा अक्ष के अनुदिश थी जिसे दक्षिण हस्त अंगुष्ठ नियम द्वारा प्राप्त किया गया था (चित्र 4.12)। यहाँ पर x पाश के केंद्र से उसके अक्ष के अनुदिश दूरी है। यदि $x >> R$ है, तो हम उपरोक्त व्यंजक के हर से R^2 की उपेक्षा कर सकते हैं। इस प्रकार

© NCERT not to be republished

$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2x^3}$$

ध्यान दीजिए, पाश का क्षेत्रफल $A = \pi R^2$, इस प्रकार

$$B = \frac{\mu_0 I A}{2\pi x^3}$$

जैसा कि पहले हमने चुंबकीय आघूर्ण **m** के परिमाण की परिभाषा $\mathbf{m} = I\,\mathbf{A}$ के रूप में की थी

$$\mathbf{B} \simeq \frac{\mu_0 \mathbf{m}}{2\pi x^3}$$

$$= \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2\mathbf{m}}{x^3} \qquad [4.31(a)]$$

समीकरण [4.31(a)] का यह व्यंजक किसी स्थिरवैद्युत द्विध्रुव के विद्युत क्षेत्र के लिए पहले प्राप्त किए जा चुके व्यंजक से काफ़ी मेल खाता है। इस समानता को देखने के लिए हम प्रतिस्थापित करते हैं

$\mu_0 \rightarrow 1/\varepsilon_0$

$\mathbf{m} \rightarrow \mathbf{p}_e$ (स्थिरवैद्युत द्विध्रुव)

$\mathbf{B} \rightarrow \mathbf{E}$ (स्थिरवैद्युतीय क्षेत्र)

तब हमें प्राप्त होता है,

$$\mathbf{E} = \frac{2\mathbf{p}_e}{4\pi\varepsilon_0 x^3}$$

जो कि यथार्थ रूप से किसी वैद्युत द्विध्रुव का उसके अक्ष पर विद्युत क्षेत्र है। इसके विषय में हमने अध्याय 1 अनुभाग 1.10 [समीकरण (1.20)] में अध्ययन किया था।

यह दर्शाया जा सकता है कि उपरोक्त सदृशता को आगे भी ले जाया जा सकता है। हमने यह पाया था कि द्विध्रुव के लंबवत द्विविभाजक पर विद्युत क्षेत्र [समीकरण (1.21) देखिए]

$$\mathbf{E} \approx \frac{\mathbf{p}_e}{4\pi\varepsilon_0 x^3}$$

यहाँ x द्विध्रुव से दूरी है। यदि हम उपरोक्त संबंध में $\mathbf{p} \rightarrow \mathbf{m}$ तथा $\mu_0 \rightarrow 1/\varepsilon_0$ से प्रतिस्थापित करें, तो हमें *पाश के तल में किसी बिंदु* जिसकी केंद्र से दूरी x है, के लिए **B** के परिणाम प्राप्त हो सकते हैं। $x >> R$ के लिए

$$\mathbf{B} \approx \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{\mathbf{m}}{x^3}; \qquad x >> R \qquad [4.31(b)]$$

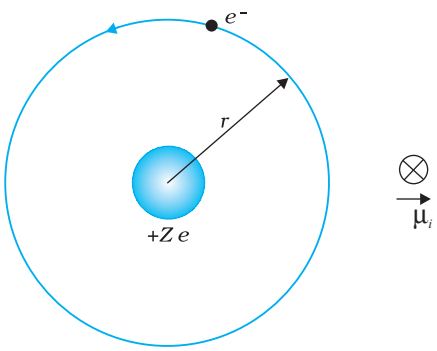
किसी *बिंदु* चुंबकीय द्विध्रुव के लिए समीकरणों [4.31(a)] तथा [4.31(b)] द्वारा दिए गए परिणाम यथार्थ बन जाते हैं।

उपरोक्त परिणाम किसी भी समतल पाश पर लागू होते दर्शाए जा सकते हैं। समतल विद्युत धारा पाश किसी अक्ष चुंबकीय द्विध्रुव के तुल्य होता है जिसका चुंबकीय आघूर्ण $\mathbf{m} = I\,\mathbf{A}$ है जो कि वैद्युत द्विध्रुव आघूर्ण **p** के सदृश है। ध्यान दीजिए, इतना होते हुए भी एक मूल अंतर यह है कि कोई वैद्युत द्विध्रुव दो मूल इकाइयों – आवेशों (अथवा विद्युत एकध्रुवों) से मिलकर बनता है। जबकि चुंबकत्व में कोई चुंबकीय द्विध्रुव (अथवा विद्युत धारा पाश) एक अत्यंत मूल तत्व है। चुंबकत्व में विद्युत आवेशों के समतुल्य अर्थात चुंबकीय एकध्रुवों, का अस्तित्व अब तक अज्ञात है।

© NCERT not to be republished

हमने यह दर्शाया कि कोई विद्युत धारा पाश (i) चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करता है (चित्र 4.12 देखिए) तथा अधिक दूरियों पर एक चुंबकीय द्विध्रुव की तरह व्यवहार करता है तथा (ii) पर एक बल आघूर्ण कार्य करता है जैसे चुंबकीय सुई। इसके आधार पर ऐम्पियर ने यह सुझाव दिया था कि समस्त चुंबकत्व प्रवाहित विद्युत धाराओं के कारण है। यह आंशिक रूप से सत्य प्रतीत होता है तथा अब तक कोई भी चुंबकीय एकध्रुव नहीं देखा जा सका है। तथापि मूल कण जैसे इलेक्ट्रॉन अथवा प्रोटॉन के भी नैज चुंबकीय आघूर्ण हैं जो प्रवाहित विद्युत धाराओं के कारण नहीं हैं।

4.10.3 परिक्रमी इलेक्ट्रॉन का चुंबकीय द्विध्रुव आघूर्ण



चित्र 4.23 हाइड्रोजन जैसे परमाणुओं के बोर मॉडल में, ऋणावेश युक्त इलेक्ट्रॉन केंद्रस्थ धनावेश युक्त ($+Ze$) नाभिक के चारों ओर एकसमान चाल से घूम रहा है। इलेक्ट्रॉन की एकसमान वर्तुल गति एक धारा लूप बनाती है। चुंबकीय आघूर्णों की दिशा कागज़ के तल के लंबवत भीतर की ओर है तथा इसे पृथक रूप चिह्न ⊗ द्वारा निर्दिष्ट किया गया है।

अध्याय 12 में हम हाइड्रोजन परमाणु के बोर मॉडल के विषय में अध्ययन करेंगे। कदाचित आपने इस मॉडल के बारे में सुना होगा। जिसे डेनमार्क के भौतिक विज्ञानी नील बोर ने सन् 1911 में प्रस्तावित किया था और जो नए प्रकार की यांत्रिकी जिसे क्वांटम यांत्रिकी कहते हैं, के लिए मील का एक पत्थर था। बोर मॉडल में, इलेक्ट्रॉन (एक ऋणावेशित कण) किसी धनावेशित नाभिक के चारों ओर ठीक उसी प्रकार परिक्रमा करता है जिस प्रकार कोई ग्रह सूर्य की परिक्रमा करता है। इलेक्ट्रॉन के प्रकरण में बल स्थिरवैद्युत (कूलॉम बल) होता है जबकि सूर्य ग्रह प्रकरण में यह गुरुत्वाकर्षण बल होता है। चित्र 4.23 में बोर मॉडल दर्शाया गया है।

किसी स्थिर भारी नाभिक जिसका आवेश $+Ze$ है, के चारों ओर $(-e)$ आवेश का इलेक्ट्रॉन ($e = +1.6 \times 10^{-19}$ C) एकसमान वर्तुल गति करता रहता है। इससे विद्युत धारा I बनती है। यहाँ

$$I = \frac{e}{T} \qquad (4.32)$$

यहाँ T परिक्रमण का आवर्तकाल है। यदि इलेक्ट्रॉन की कक्षा की त्रिज्या r तथा कक्षीय चाल v है, तो

$$T = \frac{2\pi r}{v} \qquad (4.33)$$

समीकरण में T का मान प्रतिस्थापित करने पर $I = ev/2\pi r$

इस परिसंचारी विद्युत धारा के साथ एक चुंबकीय आघूर्ण संबद्ध होगा जिसे प्राय: μ_l द्वारा निर्दिष्ट करते हैं। समीकरण (4.28) से इसका परिमाण है $\mu_l = I\pi r^2 = evr/2$

चित्र 4.23 में इस चुंबकीय आघूर्ण की दिशा कागज़ के तल में भीतर की ओर है। [इस परिणाम पर हमें पहले वर्णन किए जा चुके दक्षिण हस्त नियम तथा इस तथ्य के आधार पर पहुंचे हैं कि ऋणावेशित इलेक्ट्रॉन वामावर्त गति कर रहा है जिसके फलस्वरूप विद्युत धारा दक्षिणावर्त है।] उपरोक्त व्यंजक के दक्षिण पक्ष को इलेक्ट्रॉन के द्रव्यमान m_e से गुणा एवं भाग करने पर हमें प्राप्त होता है

$$\mu_l = \frac{e}{2m_e}(m_e v r)$$

$$= \frac{e}{2m_e} l \qquad [4.34(a)]$$

यहाँ, l केंद्रीय नाभिक के परित: इलेक्ट्रॉन के कोणीय संवेग का परिमाण है। सदिश रूप में

$$\boldsymbol{\mu}_l = -\frac{e}{2m_e}\mathbf{l} \qquad [4.34(b)]$$

© NCERT not to be republished

यहाँ ऋणात्मक चिह्न यहाँ यह संकेत देता है कि इलेक्ट्रॉन के कोणीय संवेग की दिशा चुंबकीय आघूर्ण की दिशा के विपरीत है। यदि हमने इलेक्ट्रॉन (जिस पर आवेश $-e$ है) के स्थान पर $(+q)$ आवेश का कोई कण लिया होता तो कोणीय संवेग तथा चुंबकीय आघूर्ण दोनों की एक ही दिशा होती। अनुपात

$$\frac{\mu_l}{l} = \frac{e}{2m_e} \tag{4.35}$$

इसे *घूर्ण चुंबकीय अनुपात* कहते हैं तथा यह एक नियतांक है। इलेक्ट्रॉन के लिए इस अनुपात का मान 8.8×10^{10} C /kg है जिसे प्रयोगों द्वारा सत्यापित किया जा चुका है।

यह तथ्य कि परमाण्विक स्तर तक भी चुंबकीय आघूर्ण विद्यमान है परमाण्विक आघूर्ण संबंधी ऐम्पियर की साहसपूर्ण परिकल्पना की पुष्टि करता है। ऐम्पियर के अनुसार, यह पदार्थों के चुंबकीय गुणों को भली-भाँति स्पष्ट करने में सहायक है। क्या हम उस परमाणवीय द्विध्रुव आघूर्ण को कोई निश्चित मान दे सकते हैं? इसका उत्तर है – हाँ। बोर मॉडल की परिधि में ऐसा किया जाना संभव है। बोर ने यह परिकल्पना की थी कि कोणीय संवेग एक विविक्त मानों का समुच्चय ही हो सकता है। अर्थात

$$l = \frac{n h}{2 \pi} \tag{4.36}$$

यहाँ n एक प्राकृत संख्या, $n = 1, 2, 3, \ldots$ है तथा h एक नियतांक है जिसे वैज्ञानिक मैक्स प्लांक के नाम पर (प्लांक नियतांक) कहते हैं तथा इसका मान $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J s है। कोणीय वेग की विविक्तता संबंधी इस शर्त को *बोर क्वांटीकरण-शर्त* कहते हैं। इसके विषय में हम अध्याय 12 में विस्तार से चर्चा करेंगे। यहाँ हमारा उद्देश्य मात्र प्राथमिक द्विध्रुव आघूर्ण को परिकलित करने में इसका उपयोग करना है। $n = 1$ लेने पर समीकरण (4.34) से हमें प्राप्त होता है,

$$(\mu_l)_{\min} = \frac{e}{4 \pi m_e} h$$

$$= \frac{1.60 \times 10^{-19} \times 6.63 \times 10^{-34}}{4 \times 3.14 \times 9.11 \times 10^{-31}}$$

$$= 9.27 \times 10^{-24} \text{ Am}^2 \tag{4.37}$$

यहाँ अधोलिखित min का उपयोग न्यूनतम के लिए किया गया है। इस न्यूनतम मान को *बोर मैग्नेटॉन* कहते हैं।

एकसमान वर्तुल गति करने वाले प्रत्येक आवेश के पास कोई चुंबकीय आघूर्ण अवश्य ही संबद्ध होता है जिसे समीकरण (4.34) के समान किसी व्यंजक से व्यक्त किया जाता है। इस द्विध्रुव आघूर्ण को *कक्षीय चुंबकीय आघूर्ण* कहते हैं। इसीलिए μ_l में अधोलिखित *'l'* लगा है। कक्षीय चुंबकीय आघूर्ण के अतिरिक्त इलेक्ट्रॉन का एक नैज चुंबकीय आघूर्ण भी होता है जिसका आंकिक मान वही है जैसा समीकरण (4.37) में दर्शाया गया है। इस आघूर्ण को *चक्रण चुंबकीय आघूर्ण* कहते हैं। परंतु हम तुरंत ही यह स्पष्ट कर देना चाहते हैं कि इसका यह अर्थ नहीं है कि इलेक्ट्रॉन घूर्णन गति करता है। इलेक्ट्रॉन एक मूल कण है तथा प्रचक्रमान लट्टू अथवा पृथ्वी की भाँति इसका अपना कोई घूर्णन अक्ष नहीं है जिस पर यह घूर्णन कर सके। इतना होने पर भी इसका एक नैज चुंबकीय आघूर्ण होता है। लोहे तथा अन्य चुंबकीय पदार्थों में चुंबकन की सूक्ष्म जड़ें इसी नैज चक्रण चुंबकीय आघूर्ण से निकलती प्रतीत होती हैं।

4.11 चल कुंडली गैल्वेनोमीटर

अध्याय 3 के अंतर्गत विद्युत परिपथों में प्रवाहित धाराओं तथा वोल्टताओं के विषय में विस्तार से चर्चा की जा चुकी है। परंतु हम इन्हें किस प्रकार मापते हैं। हम यह कैसे कहते हैं कि किसी परिपथ में 1.5 A विद्युत धारा प्रवाहित हो रही है अथवा किसी प्रतिरोधक के सिरों के बीच 1.2 V विभवांतर

भौतिकी
गैल्वेनोमीटर का ऐमीटर अथवा वोल्टमीटर में रूपांतरण
http://www.citycollegiate.com/galvanometer_XIIa.htm

© NCERT not to be republished

है। चित्र 4.24 में इसी उद्देश्य के उपयोग से किया जाने वाला उपयोगी उपकरण दर्शाया गया है जिसे *चल कुंडली गैल्वेनोमीटर* (moving coil galvanometer — MCG) कहते हैं। यह एक ऐसी युक्ति है जिसके सिद्धांत को हमारे द्वारा अनुभाग में 4.10 में की गई चर्चा के आधार पर समझा जा सकता है।

चल कुंडली गैल्वेनोमीटर में किसी एकसमान त्रिज्य (अरीय) चुंबकीय क्षेत्र में किसी अक्ष पर घूर्णन करने के लिए अनेक फेरों वाली एक कुंडली होती है (चित्र 4.24)। इस कुंडली के भीतर एक बेलनाकार नर्म लोह क्रोड जो केवल चुंबकीय क्षेत्र को त्रिज्य ही नहीं बनाता वरन चुंबकीय क्षेत्र की प्रबलता में भी वृद्धि कर देता है। जब इस कुंडली से कोई विद्युत धारा प्रवाहित की जाती है तो इस पर एक बल आघूर्ण कार्य करता है। समीकरण (4.26) के अनुसार इस बल आघूर्ण τ का मान होता है

$$\tau = NI\,AB$$

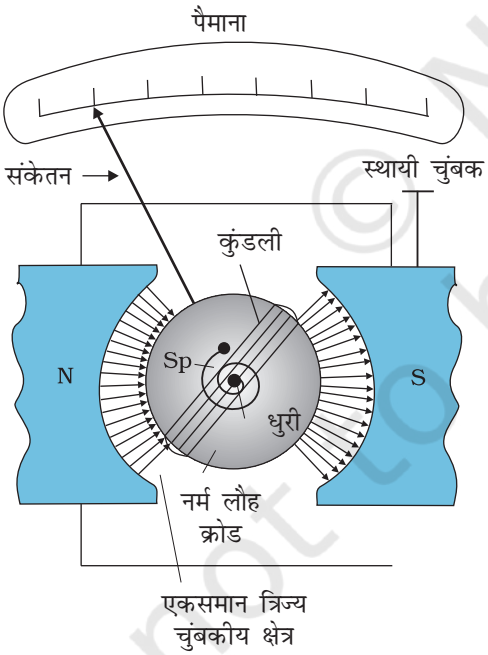
यहाँ, भौतिक राशियों के प्रतीकों के अपने सामान्य अर्थ हैं। चूँकि डिज़ाइन के अनुसार चुंबकीय क्षेत्र त्रिज्य है, हमने बल आघूर्ण के लिए दिए गए उपरोक्त व्यंजक में $\sin\theta = 1$ लिया है। यह चुंबकीय बल आघूर्ण $NIAB$ कुंडली में घूर्णन की प्रवृत्ति उत्पन्न करता है जिसके फलस्वरूप कुंडली अपने अक्ष पर घूर्णन करती है। कुंडली से जुड़ी कमानी S_p में कुंडली के घूर्णन के विरोध में बल आघूर्ण $k\phi$ उत्पन्न हो जाता है जो कुंडली के बल आघूर्ण $NIAB$ को संतुलित करता है; फलस्वरूप कुंडली में ϕ कोण का स्थायी कोणीय विक्षेप आ जाता है। साम्यावस्था में

$$k\phi = NI\,AB$$

यहाँ k कमानी का ऐंठन नियतांक है, अर्थात प्रति एकांक ऐंठन प्रत्यानयन बल आघूर्ण है। विक्षेप ϕ का पाठ्यांक कमानी के साथ जुड़े संकेतक द्वारा पैमाने पर लिया जा सकता है। उपरोक्त व्यंजक के अनुसार ϕ का मान है

$$\phi = \left(\frac{NAB}{k}\right) I \qquad (4.38)$$

कोष्ठक की राशि का मान किसी दिए गए गैल्वेनोमीटर के लिए एक नियतांक है। गैल्वेनोमीटर का उपयोग कई प्रकार से किया जा सकता है। इसका उपयोग एक संसूचक के रूप में यह ज्ञात करने के लिए किया जा सकता है कि परिपथ में कोई विद्युत धारा प्रवाहित हो रही है अथवा नहीं। इस प्रकार का उपयोग हमने व्हीटस्टोन सेतु व्यवस्था में किया था। जब गैल्वेनोमीटर का उपयोग संसूचक के रूप में करते हैं तो इसका संकेतक साम्यावस्था (शून्य विक्षेप स्थिति अर्थात जब कुंडली में कोई विद्युत धारा प्रवाहित नहीं होती) पैमाने के मध्य में होता है न कि बाईं ओर जैसा कि चित्र 4.24 में दर्शाया गया है। प्रवाहित विद्युत धारा के अनुसार गैल्वेनोमीटर का संकेतक विद्युत धारा की दिशा के अनुरूप बाएँ अथवा दाएँ विक्षेपित हो जाता है।



चित्र 4.24 चल कुंडली गैल्वेनोमीटर। इसके अवयवों का वर्णन पाठ में किया गया है। आवश्यकतानुसार इस उपकरण का उपयोग हम धारा का पता लगाने या धारा (ऐमीटर), या फिर वोल्टता (वोल्टमीटर) का मान ज्ञात करने के लिए करते हैं।

गैल्वेनोमीटर का उपयोग इसी रूप में किसी परिपथ में प्रवाहित विद्युत धारा को मापने के लिए ऐमीटर की भाँति नहीं किया जा सकता। इसके दो कारण हैं (i) गैल्वेनोमीटर एक अत्यंत सुग्राही युक्ति है, यह μA कोटि की विद्युत धारा के लिए पूर्ण पैमाना विक्षेप देती है। (ii) विद्युत धारा को मापने के लिए गैल्वेनोमीटर को परिपथ में श्रेणीक्रम में जोड़ना होता है। क्योंकि इसका प्रतिरोध अधिक होता है जो परिपथ में प्रवाहित होने वाली विद्युत धारा के मान को परिवर्तित कर देता है। इस परेशानी को दूर करने के लिए एक अल्प-मान वाला प्रतिरोध r_s जिसे *शंट* कहते हैं, गैल्वेनोमीटर की कुंडली के पार्श्वक्रम में संयोजित किया जाता है जिससे अधिकांश विद्युत धारा इस शंट से प्रवाहित हो जाती है। इस प्रकार इस व्यवस्था का प्रतिरोध हो जाता है–

© NCERT not to be republished

$R_G r_s / (R_G + r_s) \sim r_s$ यदि $R_G >> r_s$

यदि परिपथ के प्रतिरोध R_e की तुलना में r_s का मान कम है तो मापक यंत्र को परिपथ में जोड़ने का प्रभाव भी कम होगा जिसकी उपेक्षा की जा सकती है। इस व्यवस्था का एक योजना आरेख चित्र 4.25 में दिखाया गया है। इस प्रकार बने ऐमीटर के पैमाने का अंशांकन कर दिया जाता है ताकि आसानी से धारा का मान पढ़ा जा सके। ऐमीटर की सुग्राहिता की परिभाषा हम विक्षेप प्रति इकाई धारा के रूप में करते हैं। समीकरण (4.38) के अनुसार धारा सुग्राहिता है,

$$\frac{\phi}{I} = \frac{NAB}{k} \qquad (4.39)$$

किसी भी उत्पादक के लिए गैल्वेनोमीटर की सुग्राहिता में वृद्धि करने का सरल उपाय यह है कि वह कुंडली में फेरों की संख्या N में वृद्धि कर दे। हम अपने प्रयोग की आवश्यकता के अनुसार गैल्वेनोमीटर का चयन करते हैं।

धारामापी का उपयोग परिपथ के किसी अंश के सिरों के बीच विभवांतर ज्ञात करने के लिए वोल्टमापी के रूप में भी हो सकता है। इस उद्देश्य के लिए इसको परिपथ के उस अंश के पार्श्वक्रम में लगाना होगा। और फिर, इसमें से अत्यल्प धारा प्रवाहित होनी चाहिए, अन्यथा, वोल्टता की माप मूल व्यवस्था को अत्यधिक विक्षुब्ध कर देगी। प्राय: हम मापक यंत्रों द्वारा उत्पन्न विक्षोभ को एक प्रतिशत से कम रखते हैं। माप की परिशुद्धता बनाए रखने के लिए, गैल्वेनोमीटर के श्रेणीक्रम में एक बड़ा प्रतिरोध R जोड़ा जाता है। इस व्यवस्था का योजना आरेख चित्र 4.26 में दर्शाया गया है। ध्यान दीजिए कि अब वोल्टमीटर का कुल प्रतिरोध,

$R_G + R \simeq R$: अर्थात प्रतिरोध बहुत अधिक है।

वोल्टमीटर के पैमाने को अंशांकित कर दिया जाता है ताकि आसानी से वोल्टता का मान पढ़ा जा सके। किसी वोल्टमापी की वोल्टता सुग्राहिता की परिभाषा हम विक्षेप प्रति एकांक वोल्टता से करते हैं। समीकरण (4.38) से

$$\frac{\phi}{V} = \left(\frac{NAB}{k}\right)\frac{I}{V} = \left(\frac{NAB}{k}\right)\frac{1}{R} \qquad (4.40)$$

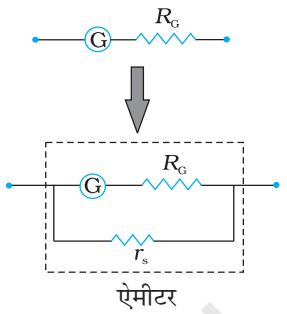
यहाँ एक रोचक तथ्य ध्यान देने योग्य यह है कि धारा सुग्राहिता में वृद्धि करने पर यह आवश्यक नहीं है कि वोल्टता सुग्राहिता में भी वृद्धि हो जाएगी। आइए समीकरण (4.39) पर विचार करें जो धारा सुग्राहिता का माप बताती है। यदि $N \rightarrow 2N$ अर्थात यदि फेरों की संख्या दोगुनी कर दी जाए, तो

$$\frac{\phi}{I} \rightarrow 2\frac{\phi}{I}$$

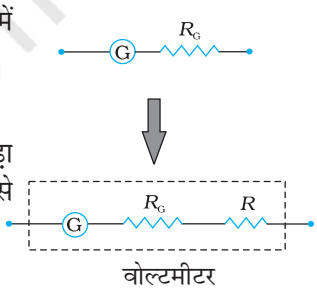
अर्थात धारा सुग्राहिता भी दोगुनी हो जाती है। किंतु, गैल्वेनोमीटर का प्रतिरोध भी दो गुना हो जाने की संभावना है क्योंकि यह तार की लंबाई के अनुक्रमानुपाती है। समीकरण (4.40) में $N \rightarrow 2N$ एवं $R \rightarrow 2R$, अत: वोल्टता सुग्राहिता,

$$\frac{\phi}{V} \rightarrow \frac{\phi}{V}$$

अपरिवर्तित रहती है। अत: व्यापक रूप से गैल्वेनोमीटर से ऐमीटर में रूपांतरित करने के लिए जो संशोधन किए जाते हैं गैल्वेनोमीटर को वोल्टमीटर में परिवर्तित करने के लिए इनसे भिन्न संशोधन किए जाने चाहिए।



चित्र 4.25 एक अत्यल्प मान का शंट प्रतिरोध r_s पार्श्वक्रम में लगाकर किसी गैल्वेनोमीटर (G) को ऐमीटर (A) में रूपांतरित करना।



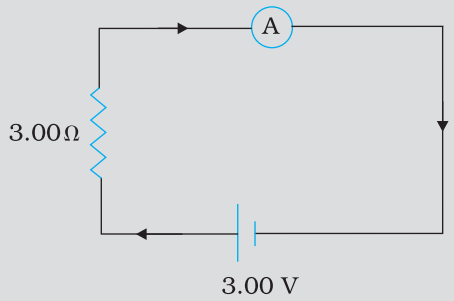
चित्र 4.26 श्रेणीक्रम में एक बड़ा प्रतिरोध R लगाकर गैल्वेनोमीटर (G) को वोल्टमीटर (V) में परिवर्तित करना।

उदाहरण 4.13 नीचे दिखाए गए परिपथ में धारा का मान क्या है यदि दिखाया गया ऐमीटर, (a) $R_G = 60.00\ \Omega$ प्रतिरोध का गैल्वेनोमीटर है। (b) भाग (a) में बताया गया गैल्वेनोमीटर ही है परंतु इसको $r_s = 0.02\ \Omega$ का शंट प्रतिरोध लगाकर ऐमीटर में परिवर्तित किया गया है। (c) शून्य प्रतिरोध का एक आदर्श ऐमीटर है।

उदाहरण 4.13

© NCERT not to be republished

उदाहरण 4.13



चित्र 4.27

हल

(a) परिपथ में कुल प्रतिरोध है

$R_G + 3 = 63\,\Omega$ इसलिए $I = 3/63 = 0.048$ A

(b) ऐमीटर में रूपांतरित गैल्वेनोमीटर का प्रतिरोध

$$\frac{R_G\, r_s}{R_G + r_s} = \frac{60\ \ \Omega \times 0.02\Omega}{(60 + 0.02)\Omega} \simeq 0.02\,\Omega$$

परिपथ में कुल प्रतिरोध

$0.02\,\Omega + 3\,\Omega = 3.02\,\Omega$ अत: $I = 3/3.02 = 0.99$ A

(c) शून्य प्रतिरोध के आदर्श ऐमीटर के लिए

$I = 3/3 = 1.00$ A

सारांश

1. चुंबकीय क्षेत्र **B** पर विद्युत क्षेत्र **E** की उपस्थिति में **v** वेग से गतिमान किसी आवेश q पर लगने वाले कुल बल को लोरेंज बल कहते हैं। इसे नीचे दिए गए व्यंजक द्वारा व्यक्त किया जाता है।

   $\mathbf{F} = q\,(\mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{E})$

   चुंबकीय क्षेत्र $q\,(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$, **v** के अभिलंबवत है तथा किया गया कार्य शून्य है।

2. l लंबाई के किसी सीधे चालक जिससे स्थायी विद्युत धारा I प्रवाहित हो रही है, किसी एकसमान बाह्य चुंबकीय क्षेत्र में बल **F** का अनुभव करता है,

   $\mathbf{F} = I\mathbf{l} \times \mathbf{B}$

   यहाँ $|\mathbf{l}| = l$ तथा **l** की दिशा विद्युत धारा की दिशा द्वारा प्रदान की जाती है।

3. किसी एकसमान चुंबकीय क्षेत्र में, कोई आवेश q, **B** के अभिलंबवत तल में वृत्ताकार कक्षा में गतिमान है। इसकी एकसमान वर्तुल गति की आवृत्ति को *साइक्लोट्रॉन आवृत्ति* कहते हैं जिसे इस प्रकार व्यक्त किया जाता है–

   $$\nu_c = \frac{qB}{2\pi m}$$

   यह आवृत्ति कण की चाल तथा त्रिज्या पर निर्भर नहीं करती। इस तथ्य का उपयोग साइक्लोट्रॉन नामक मशीन में किया जाता है जो आवेशित कणों को त्वरित करने में उपयोगी होता है।

4. बायो-सावर्ट नियम के अनुसार $d\mathbf{l}$ लंबाई के किसी अवयव जिससे अपरिवर्ती विद्युत धारा I प्रवाहित हो रही है, के कारण **r** सदिश दूरी पर स्थित किसी बिंदु P पर चुंबकीय क्षेत्र $d\mathbf{B}$ इस प्रकार व्यक्त किया जाता है–

   $$d\mathbf{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} I \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3}$$

© NCERT not to be republished

P पर कुल क्षेत्र प्राप्त करने के लिए हमें इस सदिश व्यंजक को चालक की समस्त लंबाई के लिए समाकलित करना चाहिए।

5. त्रिज्या R की वृत्ताकार कुंडली जिससे I धारा प्रवाहित हो रही है, के कारण केंद्र से अक्षीय दूरी x पर चुंबकीय क्षेत्र का परिमाण

$$B = \frac{\mu_0 IR^2}{2(x^2 + R^2)^{3/2}}$$

कुंडली के केंद्र पर इस क्षेत्र का परिमाण

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

6. *ऐम्पियर का परिपथीय नियम :* मान लीजिए कोई खुला पृष्ठ S किसी पाश C द्वारा परिबद्ध है। तब ऐम्पियर के नियम के अनुसार $\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I$ यहाँ I पृष्ठ S से प्रवाहित विद्युत धारा है। I का चिह्न दक्षिण हस्त नियम द्वारा निर्धारित किया जाता है। हमने यहाँ इस नियम के सरलीकृत रूप पर चर्चा की है। यदि **B** बंद वक्र की परिधि L के हर बिंदु पर स्पर्शी के अनुदिश निर्दिष्ट है तथा परिधि के अनुदिश इसका परिमाण नियत है तो

$BL = \mu_0 I_e$

यहाँ I_e बंद परिपथ द्वारा परिबद्ध नेट विद्युत धारा है।

7. किसी लंबे सीधे तार जिससे I विद्युत धारा प्रवाहित हो रही है, से R दूरी पर स्थित किसी बिंदु पर चुंबकीय क्षेत्र का परिमाण

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$

क्षेत्र रेखाएँ तार के साथ संकेंद्री वृत्त होती हैं।

8. किसी लंबी परिनालिका जिससे I विद्युत धारा प्रवाहित हो रही है, के भीतर चुंबकीय क्षेत्र B का परिमाण

$B = \mu_0 nI$

यहाँ n परिनालिका की प्रति एकांक लंबाई में फेरों की संख्या है। किसी टोरॉइड के लिए चुंबकीय क्षेत्र B का परिमाण

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r}$$

यहाँ n फेरों की कुल संख्या तथा r औसत त्रिज्या है।

9. समांतर विद्युत धाराएँ आकर्षित तथा प्रतिसमांतर विद्युत धाराएँ प्रतिकर्षित करती हैं।

10. बहुत पास लिपटे N फेरों तथा A क्षेत्रफल के समतलीय पाश जिससे विद्युत धारा I में प्रवाहित हो रही है, का एक चुंबकीय आघूर्ण **m** होता है

$\mathbf{m} = N I \mathbf{A}$

तथा **m** की दिशा दक्षिण हस्त अंगुष्ठ नियम से निर्धारित होती है। इस नियम के अनुसार, "अपने दाएँ हाथ की हथेली को इस प्रकार पाश के अनुदिश मोड़िए कि उँगलियाँ विद्युत धारा की दिशा में संकेत करें तो, बाहर की ओर खिंचा अँगूठा **m** (और **A**) की दिशा बताता है। जब यह पाश किसी एकसमान चुंबकीय क्षेत्र **B** में रखा जाता है तो इस पर आरोपित बल

$F = 0$

तथा इस पर बल आघूर्ण

$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{m} \times \mathbf{B}$

किसी चल कुंडली गैल्वेनोमीटर में इस बल आघूर्ण को कमानी द्वारा लगाया प्रति बल आघूर्ण

© NCERT not to be republished

संतुलित कर लेता है और तब हमें प्राप्त होता है

$k\phi = NI\,AB$

यहाँ ϕ संतुलन विक्षेप है तथा k कमानी का ऐंठन नियतांक है।

11. केंद्रीय नाभिक के चारों ओर गतिमान किसी इलेक्ट्रॉन का एक चुंबकीय आघूर्ण μ_l होता है जिसे इस प्रकार व्यक्त करते हैं :

$$\mu_l = \frac{e}{2m} l$$

यहाँ l केंद्रीय नाभिक के परित: परिसंचारी इलेक्ट्रॉन का कोणीय संवेग का परिमाण है। μ_l के लघुतम मान को बोहर मेग्नेटॉन μ_B कहते हैं ($\mu_B = 9.27\times10^{-24}$ J/T)।

12. किसी चल कुंडली गैल्वेनोमीटर को उसकी कुंडली के पार्श्वक्रम में कोई अल्प परिमाण का शंट प्रतिरोध r_s संबद्ध करके ऐमीटर में रूपांतरित किया जा सकता है। गैल्वेनोमीटर की कुंडली के साथ श्रेणीक्रम में अधिक परिमाण का प्रतिरोध संबद्ध करके उसे वोल्टमीटर में रूपांतरित किया जा सकता है।

भौतिक राशि	प्रतीक	प्रकृति	विमाएँ	मात्रक	टिप्पणी
मुक्त आकाश की चुंबकशीलता	μ_0	अदिश	$[MLT^{-2}A^{-2}]$	T m A^{-1}	$4\pi \times 10^{-7}$ T m A^{-1}
चुंबकीय क्षेत्र	**B**	सदिश	$[M\,T^{-2}A^{-1}]$	T (टेस्ला)	
चुंबकीय आघूर्ण	**m**	सदिश	$[L^2A]$	A m^2 अथवा J/T	
ऐंठन नियतांक	k	अदिश	$[M\,L^2T^{-2}]$	N m rad^{-1}	गैल्वेनोमीटर में दृष्टिगोचर

विचारणीय विषय

1. स्थिरवैद्युत क्षेत्र रेखाएँ धनावेश से आरंभ होकर ऋणावेश पर समाप्त हो जाती हैं अथवा अनंत पर लुप्त या विलीन हो जाती हैं। चुंबकीय क्षेत्र रेखाएँ सदैव बंद पाश बनाती हैं।
2. इस अध्याय में वर्णित विचार केवल अपरिवर्ती विद्युत धाराओं (जो समय के साथ परिवर्तित नहीं होती)के लिए ही लागू है।
   समय के साथ परिवर्तित होने वाली विद्युत धाराओं के लिए न्यूटन का तीसरा नियम वैद्युतचुंबकीय क्षेत्र के संवेग का संज्ञान करने पर ही वैध होता है।
3. लोरेंज बल के समीकरण का स्मरण कीजिए,

   $\mathbf{F} = q\,(\mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{E})$

   वेग निर्भर इस बल ने कुछ महानतम वैज्ञानिक विचारकों का ध्यान आकर्षित किया। यदि कोई प्रेक्षक एक ऐसे फ्रेम में पहुँच जाए जहाँ उसका क्षणिक वेग **v** हो तो बल का चुंबकीय भाग शून्य हो जाता है। तब आवेशित कण की गति यह मानकर समझाई जा सकती है कि इस नए फ्रेम में एक उचित विद्युत क्षेत्र विद्यमान है। इस यांत्रिकी के विस्तार में हम नहीं जाएँगे। इसके विषय में आप आगे की कक्षाओं में पढ़ेंगे। लेकिन इस बात पर हम ज़ोर देना चाहेंगे कि इस विरोधाभास का समाधान इस तथ्य में निहित है कि विद्युत और चुंबकत्व एक-दूसरे से जुड़े हुए प्रक्रम हैं *(विद्युतचुंबकत्व)* और लोरेंज बल का व्यंजक, प्रकृति में किसी सार्वभौम वरीय संदर्भ फ्रेम में अंतर्निहित नहीं है।
4. ऐम्पियर का परिपथीय नियम, बायो-सावर्ट नियम से अलग नहीं है। यह बायो-सावर्ट नियम से व्युत्पन्न किया जा सकता है। इसका बायो-सावर्ट नियम से वैसा ही संबंध है जैसा कि गाउस नियम का कूँलाम नियम से।

© NCERT not to be republished

अभ्यास

4.1 तार की एक वृत्ताकार कुंडली में 100 फेरे हैं, प्रत्येक की त्रिज्या 8.0 cm है और इनमें 0.40 A विद्युत धारा प्रवाहित हो रही है। कुंडली के केंद्र पर चुंबकीय क्षेत्र का परिमाण क्या है?

4.2 एक लंबे, सीधे तार में 35 A विद्युत धारा प्रवाहित हो रही है। तार से 20 cm दूरी पर स्थित किसी बिंदु पर चुंबकीय क्षेत्र का परिमाण क्या है?

4.3 क्षैतिज तल में रखे एक लंबे सीधे तार में 50 A विद्युत धारा उत्तर से दक्षिण की ओर प्रवाहित हो रही है। तार के पूर्व में 2.5 m दूरी पर स्थित किसी बिंदु पर चुंबकीय क्षेत्र **B** का परिमाण और उसकी दिशा ज्ञात कीजिए।

4.4 व्योमस्थ खिंचे क्षैतिज बिजली के तार में 90 A विद्युत धारा पूर्व से पश्चिम की ओर प्रवाहित हो रही है। तार के 1.5 m नीचे विद्युत धारा के कारण उत्पन्न चुंबकीय क्षेत्र का परिमाण और दिशा क्या है?

4.5 एक तार जिसमें 8 A विद्युत धारा प्रवाहित हो रही है, 0.15 T के एकसमान चुंबकीय क्षेत्र में, क्षेत्र से 30° का कोण बनाते हुए रखा है। इसकी एकांक लंबाई पर लगने वाले बल का परिमाण और इसकी दिशा क्या है?

4.6 एक 3.0 cm लंबा तार जिसमें 10 A विद्युत धारा प्रवाहित हो रही है, एक परिनालिका के भीतर उसके अक्ष के लंबवत रखा है। परिनालिका के भीतर चुंबकीय क्षेत्र का मान 0.27 T है। तार पर लगने वाला चुंबकीय बल क्या है।

4.7 एक-दूसरे से 4.0 cm की दूरी पर रखे दो लंबे, सीधे, समांतर तारों A एवं B से क्रमशः 8.0 A एवं 5.0 A की विद्युत धाराएँ एक ही दिशा में प्रवाहित हो रही हैं। तार A के 10 cm खंड पर बल का आकलन कीजिए।

4.8 पास-पास फेरों वाली एक परिनालिका 80 cm लंबी है और इसमें 5 परतें हैं जिनमें से प्रत्येक में 400 फेरे हैं। परिनालिका का व्यास 1.8 cm है। यदि इसमें 8.0 A विद्युत धारा प्रवाहित हो रही है तो परिनालिका के भीतर केंद्र के पास चुंबकीय क्षेत्र **B** के परिमाण परिकलित कीजिए।

4.9 एक वर्गाकार कुंडली जिसकी प्रत्येक भुजा 10 cm है, में 20 फेरे हैं और उसमें 12 A विद्युत धारा प्रवाहित हो रही है। कुंडली ऊर्ध्वाधरतः लटकी हुई है और इसके तल पर खींचा गया अभिलंब 0.80 T के एकसमान चुंबकीय क्षेत्र की दिशा से 30° का एक कोण बनाता है। कुंडली पर लगने वाले बलयुग्म आघूर्ण का परिमाण क्या है?

4.10 दो चल कुंडली गैल्वेनोमीटर मीटरों M_1 एवं M_2 के विवरण नीचे दिए गए हैं :

$R_1 = 10\ \Omega,\ N_1 = 30,$
$A_1 = 3.6 \times 10^{-3}\ m^2,\ B_1 = 0.25\ T$
$R_2 = 14\ \Omega,\ N_2 = 42,$
$A_2 = 1.8 \times 10^{-3}\ m^2,\ B_2 = 0.50\ T$ (दोनों मीटरों के लिए स्प्रिंग नियतांक समान हैं)।

(a) M_2 एवं M_1 की धारा-सुग्राहिताओं, (b) M_2 एवं M_1 की वोल्टता-सुग्राहिताओं का अनुपात ज्ञात कीजिए।

4.11 एक प्रकोष्ठ में 6.5 G (1 G = 10^{-4} T) का एकसमान चुंबकीय क्षेत्र बनाए रखा गया है। इस चुंबकीय क्षेत्र में एक इलेक्ट्रॉन $4.8 \times 10^6\ m\ s^{-1}$ के वेग से क्षेत्र के लंबवत भेजा गया है। व्याख्या कीजिए कि इस इलेक्ट्रॉन का पथ वृत्ताकार क्यों होगा? वृत्ताकार कक्षा की त्रिज्या ज्ञात कीजिए।

($e = 1.6 \times 10^{-19}$ C, $m_e = 9.1 \times 10^{-31}$ kg)

© NCERT not to be republished

4.12 प्रश्न 4.11 में, वृत्ताकार कक्षा में इलेक्ट्रॉन की परिक्रमण आवृत्ति प्राप्त कीजिए। क्या यह उत्तर इलेक्ट्रॉन के वेग पर निर्भर करता है? व्याख्या कीजिए।

4.13 (a) 30 फेरों वाली एक वृत्ताकार कुंडली जिसकी त्रिज्या 8.0 cm है और जिसमें 6.0 A विद्युत धारा प्रवाहित हो रही है, 1.0 T के एकसमान क्षैतिज चुंबकीय क्षेत्र में ऊर्ध्वाधरत: लटकी है। क्षेत्र रेखाएँ कुंडली के अभिलंब से 60° का कोण बनाती हैं। कुंडली को घूमने से रोकने के लिए जो प्रतिआघूर्ण लगाया जाना चाहिए उसके परिमाण परिकलित कीजिए।

(b) यदि (a) में बतायी गई वृत्ताकार कुंडली को उसी क्षेत्रफल की अनियमित आकृति की समतलीय कुंडली से प्रतिस्थापित कर दिया जाए (शेष सभी विवरण अपरिवर्तित रहें) तो क्या आपका उत्तर परिवर्तित हो जाएगा?

अतिरिक्त अभ्यास

4.14 दो समकेंद्रिक वृत्ताकार कुंडलियाँ X और Y जिनकी त्रिज्याएँ क्रमश: 16 cm एवं 10 cm हैं, उत्तर-दक्षिण दिशा में समान ऊर्ध्वाधर तल में अवस्थित हैं। कुंडली X में 20 फेरे हैं और इसमें 16 A विद्युत धारा प्रवाहित हो रही है, कुंडली Y में 25 फेरे हैं और इसमें 18 A विद्युत धारा प्रवाहित हो रही है। पश्चिम की ओर मुख करके खड़ा एक प्रेक्षक देखता है कि X में धारा प्रवाह वामावर्त है जबकि Y में दक्षिणावर्त है। कुंडलियों के केंद्र पर, उनमें प्रवाहित विद्युत धाराओं के कारण उत्पन्न कुल चुंबकीय क्षेत्र का परिमाण एवं दिशा ज्ञात कीजिए।

4.15 10 cm लंबाई और 10^{-3} m^2 अनुप्रस्थ काट के एक क्षेत्र में 100 G (1 G = 10^{-4} T) का एकसमान चुंबकीय क्षेत्र चाहिए। जिस तार से परिनालिका का निर्माण करना है उसमें अधिकतम 15 A विद्युत धारा प्रवाहित हो सकती है और क्रोड पर अधिकतम 1000 फेरे प्रति मीटर लपेटे जा सकते हैं। इस उद्देश्य के लिए परिनालिका के निर्माण का विवरण सुझाइए। यह मान लीजिए कि क्रोड लोह-चुंबकीय नहीं है।

4.16 I धारावाही, N फेरों और R त्रिज्या वाली वृत्ताकार कुंडली के लिए, इसके अक्ष पर, केंद्र से x दूरी पर स्थित किसी बिंदु पर चुंबकीय क्षेत्र के लिए निम्न व्यंजक है :

$$B = \frac{\mu_0 I R^2 N}{2\left(x^2 + R^2\right)^{3/2}}$$

(a) स्पष्ट कीजिए, इससे कुंडली के केंद्र पर चुंबकीय क्षेत्र के लिए सुपरिचित परिणाम कैसे प्राप्त किया जा सकता है।

(b) बराबर त्रिज्या R, एवं फेरों की संख्या N, वाली दो वृत्ताकार कुंडलियाँ एक-दूसरे से R दूरी पर एक-दूसरे के समांतर, अक्ष मिला कर रखी गई हैं। दोनों में समान विद्युत धारा एक ही दिशा में प्रवाहित हो रही है। दर्शाइए कि कुंडलियों के अक्ष के लगभग मध्यबिंदु पर क्षेत्र, एक बहुत छोटी दूरी के लिए जो कि R से कम है, एकसमान है और इस क्षेत्र का लगभग मान निम्न है :

$$B = 0.72\frac{\mu_0 N I}{R}$$

[बहुत छोटे से क्षेत्र पर एकसमान चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करने के लिए बनायी गई ऊपर वर्णित व्यवस्था *हेल्महोल्ट्ज कुंडलियों* के नाम से जानी जाती है।]

4.17 एक टोरॉइड के (अलौह चुंबकीय) क्रोड की आंतरिक त्रिज्या 25 cm और बाह्य त्रिज्या 26 cm है। इसके ऊपर किसी तार के 3500 फेरे लपेटे गए हैं। यदि तार में प्रवाहित विद्युत धारा 11 A

© NCERT not to be republished

हो तो चुंबकीय क्षेत्र का मान क्या होगा। (i) टोरॉइड के बाहर (ii) टोरॉइड के क्रोड में (iii) टोरॉइड द्वारा घिरी हुई खाली जगह में।

4.18 निम्नलिखित प्रश्नों के उत्तर दीजिए :

(a) किसी प्रकोष्ठ में एक ऐसा चुंबकीय क्षेत्र स्थापित किया गया है जिसका परिमाण तो एक बिंदु पर बदलता है, पर दिशा निश्चित है (पूर्व से पश्चिम)। इस प्रकोष्ठ में एक आवेशित कण प्रवेश करता है और अविचलित एक सरल रेखा में अचर वेग से चलता रहता है। आप कण के प्रारंभिक वेग के बारे में क्या कह सकते हैं।

(b) एक आवेशित कण, एक ऐसे शक्तिशाली असमान चुंबकीय क्षेत्र में प्रवेश करता है जिसका परिमाण एवं दिशा दोनों एक बिंदु से दूसरे बिंदु पर बदलते जाते हैं, एक जटिल पथ पर चलते हुए इसके बाहर आ जाता है। यदि यह मान लें कि चुंबकीय क्षेत्र में इसका किसी भी दूसरे कण से कोई संघट्ट नहीं होता तो क्या इसकी अंतिम चाल, प्रारंभिक चाल के बराबर होगी?

(c) पश्चिम से पूर्व की ओर चलता हुआ एक इलेक्ट्रॉन एक ऐसे प्रकोष्ठ में प्रवेश करता है जिसमें उत्तर से दक्षिण दिशा की ओर एकसमान एक वैद्युत क्षेत्र है। वह दिशा बताइए जिसमें एकसमान चुंबकीय क्षेत्र स्थापित किया जाए ताकि इलेक्ट्रॉन को अपने सरल रेखीय पथ से विचलित होने से रोका जा सके।

4.19 ऊष्मित कैथोड से उत्सर्जित और 2.0 kV के विभवांतर पर त्वरित एक इलेक्ट्रॉन, 0.15 T के एकसमान चुंबकीय क्षेत्र में प्रवेश करता है। इलेक्ट्रॉन का गमन पथ ज्ञात कीजिए यदि चुंबकीय क्षेत्र (a) प्रारंभिक वेग के लंबवत है (b) प्रारंभिक वेग की दिशा से 30° का कोण बनाता है।

4.20 प्रश्न 4.16 में वर्णित हेल्महोल्टज कुंडलियों का उपयोग करके किसी लघुक्षेत्र में 0.75 T का एकसमान चुंबकीय क्षेत्र स्थापित किया है। इसी क्षेत्र में कोई एकसमान स्थिरवैद्युत क्षेत्र कुंडलियों के उभयनिष्ठ अक्ष के लंबवत लगाया जाता है। (एक ही प्रकार के) आवेशित कणों का 15 kV विभवांतर पर त्वरित एक संकीर्ण किरण पुंज इस क्षेत्र में दोनों कुंडलियों के अक्ष तथा स्थिरवैद्युत क्षेत्र की लंबवत दिशा के अनुदिश प्रवेश करता है। यदि यह किरण पुंज 9.0×10^{-5} V m^{-1}, स्थिरवैद्युत क्षेत्र में अविक्षेपित रहता है तो यह अनुमान लगाइए कि किरण पुंज में कौन से कण हैं। यह स्पष्ट कीजिए कि यह उत्तर एकमात्र उत्तर क्यों नहीं है।

4.21 एक सीधी, क्षैतिज चालक छड़ जिसकी लंबाई 0.45 m एवं द्रव्यमान 60 g है इसके सिरों पर जुड़े दो ऊर्ध्वाधर तारों पर लटकी हुई है। तारों से होकर छड़ में 5.0 A विद्युत धारा प्रवाहित हो रही है।

(a) चालक के लंबवत कितना चुंबकीय क्षेत्र लगाया जाए कि तारों में तनाव शून्य हो जाए।

(b) चुंबकीय क्षेत्र की दिशा यथावत रखते हुए यदि विद्युत धारा की दिशा उत्क्रमित कर दी जाए तो तारों में कुल तनाव कितना होगा? (तारों के द्रव्यमान की उपेक्षा कीजिए) $g = 9.8$ m s^{-2}।

4.22 एक स्वचालित वाहन की बैटरी से इसकी चालन मोटर को जोड़ने वाले तारों में 300 A विद्युत धारा (अल्प काल के लिए) प्रवाहित होती है। तारों के बीच प्रति एकांक लंबाई पर कितना बल लगता है यदि इनकी लंबाई 70 cm एवं बीच की दूरी 1.5 cm हो। यह बल आकर्षण बल है या प्रतिकर्षण बल?

4.23 1.5 T का एक एकसमान चुंबकीय क्षेत्र, 10.0 cm त्रिज्या के बेलनाकार क्षेत्र में विद्यमान है। इसकी दिशा अक्ष के समांतर पूर्व से पश्चिम की ओर है। एक तार जिसमें 7.0 A विद्युत धारा प्रवाहित हो रही है इस क्षेत्र में होकर उत्तर से दक्षिण की ओर गुज़रती है। तार पर लगने वाले बल का परिमाण और दिशा क्या है, यदि

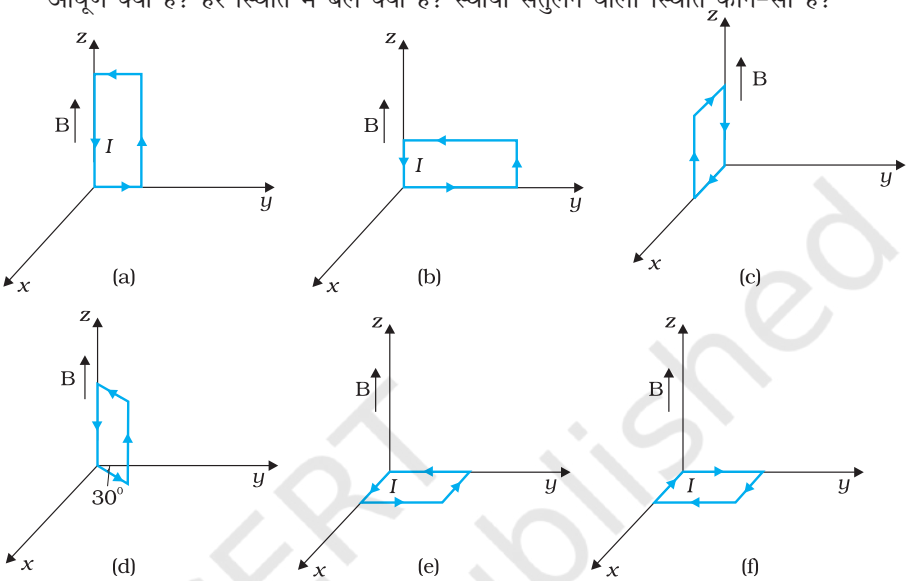
(a) तार अक्ष को काटता हो,

(b) तार N-S दिशा से घुमाकर उत्तर पूर्व–उत्तर पश्चिम दिशा में कर दिया जाए,

(c) N-S दिशा में रखते हुए ही तार को अक्ष से 6.0 cm नीचे उतार दिया जाए।

© NCERT not to be republished

4.24 धनात्मक z-दिशा में 3000 G का एक एकसमान चुंबकीय क्षेत्र लगाया गया है। एक आयताकार लूप जिसकी भुजाएँ 10 cm एवं 5 cm और जिसमें 12 A धारा प्रवाहित हो रही है इस क्षेत्र में रखा है। चित्र 4.28 में दिखायी गई लूप की विभिन्न स्थितियों में इस पर लगने वाला बलयुग्म आघूर्ण क्या है? हर स्थिति में बल क्या है? स्थायी संतुलन वाली स्थिति कौन-सी है?



चित्र 4.28

4.25 एक वृत्ताकार कुंडली जिसमें 20 फेरे हैं और जिसकी त्रिज्या 10 cm है, एकसमान चुंबकीय क्षेत्र में रखी है जिसका परिमाण 0.10 T है और जो कुंडली के तल के लंबवत है। यदि कुंडली में 5.0 A विद्युत धारा प्रवाहित हो रही हो तो,

(a) कुंडली पर लगने वाला कुल बलयुग्म आघूर्ण क्या है?

(b) कुंडली पर लगने वाला कुल परिणामी बल क्या है?

(c) चुंबकीय क्षेत्र के कारण कुंडली के प्रत्येक इलेक्ट्रॉन पर लगने वाला कुल औसत बल क्या है?

(कुंडली $10^{-5}\,m^2$ अनुप्रस्थ क्षेत्र वाले ताँबे के तार से बनी है, और ताँबे में मुक्त इलेक्ट्रॉन घनत्व $10^{29}\,m^{-3}$ दिया गया है)

4.26 एक परिनालिका जो 60 cm लंबी है, जिसकी त्रिज्या 4.0 cm है और जिसमें 300 फेरों वाली 3 परतें लपेटी गई हैं। इसके भीतर एक 2.0 cm लंबा, 2.5 g द्रव्यमान का तार इसके (केंद्र के निकट) अक्ष के लंबवत रखा है। तार एवं परिनालिका का अक्ष दोनों क्षैतिज तल में हैं। तार को परिनालिका के समांतर दो वाही संयोजकों द्वारा एक बाह्य बैटरी से जोड़ा गया है जो इसमें 6.0 A विद्युत धारा प्रदान करती है। किस मान की विद्युत धारा (परिवहन की उचित दिशा के साथ) इस परिनालिका के फेरों में प्रवाहित होने पर तार का भार सँभाल सकेगी? $g = 9.8\ m\ s^{-2}$

4.27 किसी गैल्वेनोमीटर की कुंडली का प्रतिरोध 12 Ω है। 4 mA की विद्युत धारा प्रवाहित होने पर यह पूर्णस्केल विक्षेप दर्शाता है। आप इस गैल्वेनोमीटर को 0 से 18 V परास वाले वोल्टमीटर में कैसे रूपांतरित करेंगे?

4.28 किसी गैल्वेनोमीटर की कुंडली का प्रतिरोध 15 Ω है। 4 mA की विद्युत धारा प्रवाहित होने पर यह पूर्णस्केल विक्षेप दर्शाता है। आप इस गैल्वेनोमीटर को 0 से 6 A परास वाले ऐमीटर में कैसे रूपांतरित करेंगे?

© NCERT not to be republished

अध्याय 5

चुंबकत्व एवं द्रव्य

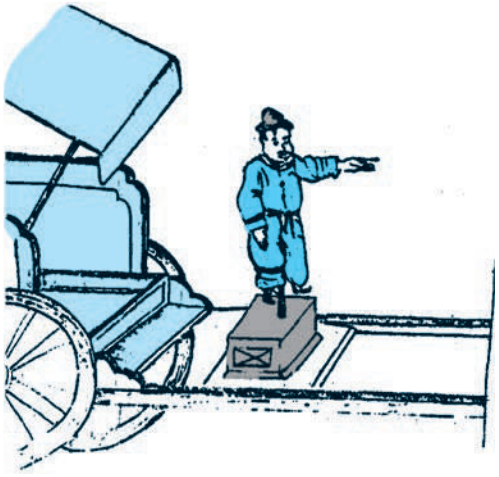
© NCERT not to be republished

5.1 भूमिका

चुंबकीय परिघटना प्रकृति में सार्वभौमिक है। विशाल दूरस्थ गैलेक्सियाँ, अतिसूक्ष्म अदृश्य परमाणु, मनुष्य और जानवर, सबमें भाँति-भाँति के स्रोतों से उत्पन्न भाँति-भाँति के चुंबकीय क्षेत्र व्याप्त हैं। भू-चुंबकत्व, मानवीय विकास से भी पूर्व से अस्तित्व में है। 'चुंबक' शब्द यूनान के एक द्वीप *मैग्नेशिया* के नाम से व्युत्पन्न है, जहाँ बहुत पहले 600 ईसा पूर्व चुंबकीय अयस्कों के भंडार मिले थे। इस द्वीप के गड़रियों ने शिकायत की कि उनके लकड़ी के जूते (जिनमें कीलें लगी हुई थीं), कई बार जमीन से चिपक जाते थे। लोहे की टोपी चढ़ी उनकी लाठी भी इसी प्रकार प्रभावित होती थी। चुंबकों के इस आकर्षित करने वाले गुण ने उनका घूमना-फिरना दूभर बना दिया था।

चुंबकों का दैशिक गुण भी प्राचीन काल से ज्ञात था। चुंबक का एक पतला लंबा टुकड़ा, स्वतंत्रतापूर्वक लटकाए जाने पर, हमेशा उत्तर-दक्षिण दिशा के अनुदिश ठहरता था। ऐसा ही व्यवहार तब भी देखने में आता था जब इसको एक कॉर्क के ऊपर रख कर, उसको ठहरे हुए पानी में तैराया जाता था। प्राकृतिक रूप से पाए जाने वाले लोहे के एक अयस्क *मैग्नेटाइट* का एक नाम *लोडस्टोन* है, जिसका अर्थ है *लीडिंग स्टोन* अर्थात मार्गदर्शक पत्थर। इस गुण के तकनीकी उपयोग का श्रेय आमतौर पर चीनियों को दिया जाता है। 400 ईसा पूर्व की चीनी पाठ्यपुस्तकों में नौकायन में दिशा ज्ञान के लिए चुंबकीय सुइयों के उपयोग का ज़िक्र है। *गोबी* रेगिस्तान को पार करने वाले काफ़िले भी चुंबकीय सुइयों का उपयोग करते थे।

एक चीनी आख्यान में, लगभग 4000 वर्ष पुरानी, सम्राट ह्वेंग-ती की विजय गाथा है, जिसमें उसको अपने शिल्पकारों (जिन्हें आज की भाषा में आप इंजीनियर कहते हैं) के कारण विजय प्राप्त



चित्र 5.1 रथ पर स्थापित प्रतिमा का हाथ हमेशा दक्षिण की ओर संकेत करता है। यह एक कलाकार द्वारा बनाया गया आरेख है, जिसमें एक प्राचीनतम ज्ञात कंपास दिखाया गया है, जो हजारों साल पुराना है।

हुई थी। इन 'इंजीनियरों' ने एक रथ बनाया जिस पर उन्होंने चुंबक की बनी हुई एक प्रतिमा लगाई, जिसका एक हाथ बाहर फैला हुआ था। चित्र 5.1 में इस रथ का एक चित्रकार द्वारा दिया गया विवरण है। रथ पर लगी हुई प्रतिमा इस तरह घूम जाती थी कि उसकी अँगुली हमेशा दक्षिण की ओर संकेत करे। इस रथ के सहारे, घने कोहरे में ह्वेंग-ती की फ़ौजें दुश्मन के पीछे पहुँच गईं और आक्रमण कर उन्हें हरा दिया।

पिछले अध्याय में हमने सीखा कि गतिशील आवेश या विद्युत धारा चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करती है। यह खोज जो उन्नीसवीं शताब्दी के पूर्वार्द्ध में की गई थी, इसका श्रेय ऑर्स्टेड, ऐम्पियर, बायो एवं सावर्ट तथा अन्य कुछ लोगों को दिया जाता है।

प्रस्तुत अध्याय में हम चुंबकत्व पर एक स्वतंत्र विषय के रूप में दृष्टि डालेंगे।

चुंबकत्व संबंधी कुछ आम विचार इस प्रकार हैं–

(i) पृथ्वी एक चुंबक की भाँति व्यवहार करती है जिसका चुंबकीय क्षेत्र लगभग भौगोलिक दक्षिण से उत्तर की ओर संकेत करता है।

(ii) जब एक छड़ चुंबक को स्वतंत्रतापूर्वक लटकाया या शांत पानी पर तैराया जाता है तो यह उत्तर-दक्षिण दिशा में ठहरता है। इसका वह सिरा जो भौगोलिक उत्तर की ओर संकेत करता है, *उत्तरी ध्रुव* और जो भौगोलिक दक्षिण की ओर संकेत करता है, चुंबक का *दक्षिणी ध्रुव* कहलाता है।

(iii) दो पृथक-पृथक चुंबकों के दो उत्तरी ध्रुव (या दो दक्षिणी ध्रुव) जब पास-पास लाए जाते हैं तो वे एक-दूसरे को विकर्षित करते हैं। इसके विपरीत, एक चुंबक के उत्तर और दूसरे के दक्षिण ध्रुव एक-दूसरे को आकर्षित करते हैं।

(iv) किसी चुंबक के उत्तर और दक्षिण ध्रुवों को अलग-अलग नहीं किया जा सकता। यदि किसी छड़ चुंबक को दो भागों में विभाजित किया जाए तो हमें दो छोटे अलग-अलग छड़ चुंबक मिल जाएँगे, जिनका चुंबकत्व क्षीण होगा। वैद्युत आवेशों की तरह, विलगित चुंबकीय उत्तरी तथा दक्षिणी ध्रुवों जिन्हें *चुंबकीय एकध्रुव* कहते हैं, का अस्तित्व नहीं है।

(v) लौह और इसकी मिश्र-धातुओं से चुंबक बनाने संभव हैं।

इस अध्याय में हम एक छड़ चुंबक और एक बाह्य चुंबकीय क्षेत्र में इसके व्यवहार के वर्णन से प्रारंभ करेंगे। हम चुंबकत्व संबंधी गाउस का नियम बताएँगे। इसके बाद पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र का विवरण देंगे। उसके बाद यह बताएँगे कि चुंबकीय गुणों के आधार पर पदार्थों का वर्गीकरण कैसे किया जाता है और फिर अनुचुंबकत्व, प्रतिचुंबकत्व तथा लौह-चुंबकत्व का वर्णन करेंगे और अंत में वैद्युत-चुंबक एवं स्थायी चुंबकों पर एक अनुभाग के साथ इसका समापन करेंगे।

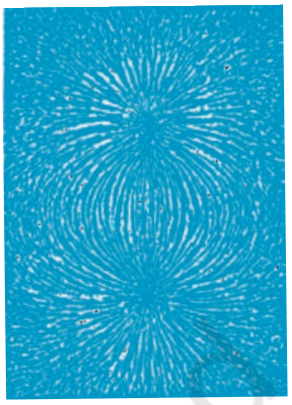
5.2 छड़ चुंबक

प्रसिद्ध भौतिक विज्ञानी अल्बर्ट आइंसटीन के अति प्रारंभिक बचपन की स्मृतियों में से एक उस चुंबक से जुड़ी थी, जो उन्हें उनके एक संबंधी ने भेंट किया था। आइंसटीन उससे चमत्कृत हो गए थे और उससे खेलते हुए कभी थकते नहीं थे। उनको आश्चर्य होता था कि कैसे एक चुंबक उन कीलों और पिनों को अपनी ओर खींच लेती थी, जो उससे दूर रखे थे और किसी स्प्रिंग या धागे द्वारा उससे जुड़े भी नहीं थे।

© NCERT not to be republished

हम अपने अध्ययन की शुरुआत लौह रेतन से करते हैं जो एक छोटे छड़ चुंबक के ऊपर रखी गई काँच की शीट पर छिड़का गया है। लौह रेतन की यह व्यवस्था चित्र 5.2 में दर्शायी गई है।

लौह रेतन के पैटर्न यह इंगित करते हैं कि चुंबक के दो ध्रुव होते हैं, वैसे ही जैसे वैद्युत द्विध्रुव के धनात्मक एवं ऋणात्मक आवेश। जैसा कि पहले भूमिका में बताया जा चुका है, एक ध्रुव को *उत्तर* और दूसरे को *दक्षिण ध्रुव* कहते हैं। जब छड़ चुंबक को स्वतंत्रतापूर्वक लटकाया जाता है तो ये ध्रुव क्रमशः लगभग भौगोलिक उत्तरी एवं दक्षिणी ध्रुवों की ओर संकेत करते हैं। लौह रेतन का इसी से मिलता-जुलता पैटर्न एक धारावाही परिनालिका के इर्द-गिर्द भी बनता है।



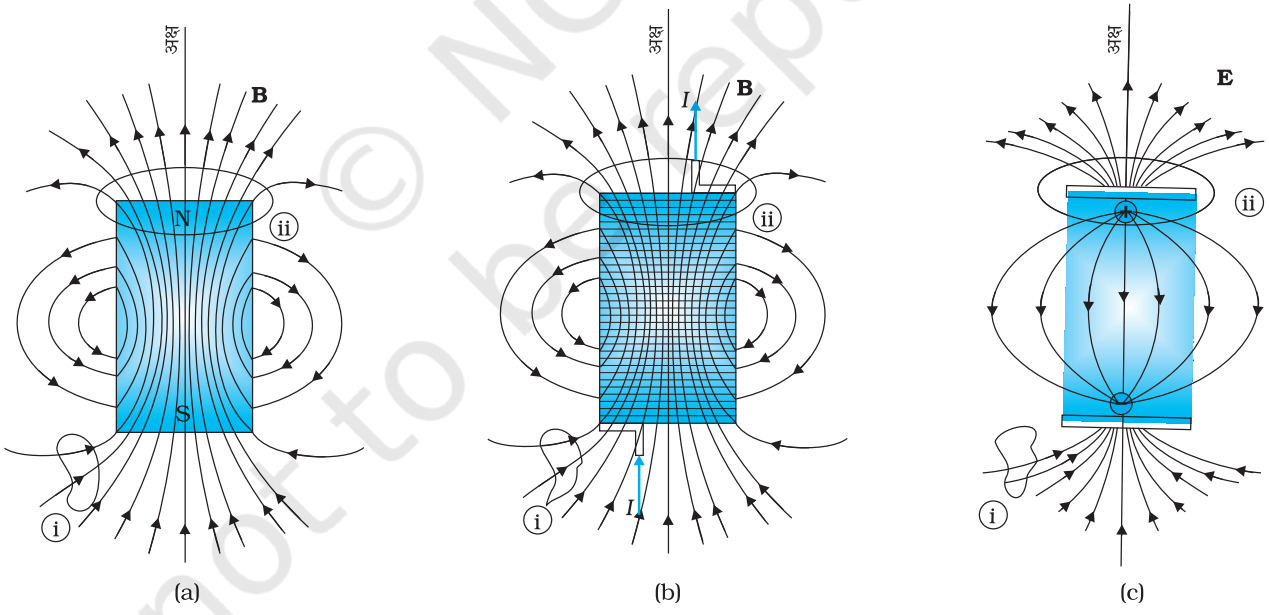
चित्र 5.2 एक छड़ चुंबक के इर्द-गिर्द लौह रेतन की व्यवस्था। यह पैटर्न चुंबकीय क्षेत्र रेखाओं की अनुकृति है। ये इंगित करते हैं कि छड़ चुंबक एक चुंबकीय द्विध्रुव है।

5.2.1 चुंबकीय क्षेत्र रेखाएँ

लौह रेतन के बने पैटर्नों के आधार पर हम चुंबकीय क्षेत्र रेखाएँ* खींच सकते हैं। चित्र 5.3 में यह छड़ चुंबक और धारावाही परिनालिका, दोनों के लिए दर्शाया गया है। तुलना के लिए अध्याय एक चित्र 1.17(d) देखिए। विद्युत द्विध्रुव की वैद्युत बल रेखाएँ चित्र 5.3(c) में भी दर्शायी गई हैं। चुंबकीय क्षेत्र रेखाएँ, चुंबकीय क्षेत्र का दृश्य और अंतर्दृष्टिपरक प्रस्तुतीकरण हैं। इनके गुण हैं:

(i) किसी चुंबक (या धारावाही परिनालिका) की चुंबकीय क्षेत्र रेखाएँ संतत बंद लूप बनाती हैं। यह वैद्युत-द्विध्रुव के जैसी नहीं है, जहाँ ये रेखाएँ धनावेश से शुरू होकर ऋणावेश पर खत्म हो जाती हैं [चित्र 5.3(c) देखिए] या फिर अनंत की ओर चली जाती हैं।

(ii) क्षेत्र रेखा के किसी बिंदु पर खींची गई स्पर्श रेखा उस बिंदु पर परिणामी चुंबकीय क्षेत्र **B** की दिशा बताती है।



चित्र 5.3 क्षेत्र रेखाएँ (a) एक छड़ चुंबक की (b) एक सीमित आकार वाली धारावाही परिनालिका की, और (c) एक वैद्युत द्विध्रुव की। बहुत अधिक दूरी पर तीनों रेखा समुच्चय एक से हैं। (i) एवं (ii) अंकित वक्र, बंद गाउसीय पृष्ठ हैं।

* कुछ पाठ्यपुस्तकों में चुंबकीय क्षेत्र रेखाओं को *चुंबकीय बल रेखाएँ* कहा गया है। इस नामावली से बचना उचित होगा क्योंकि यह भ्रामक है। स्थिरवैद्युत के विपरीत चुंबकत्व में क्षेत्र रेखाएँ (गतिमान) आवेश पर बल की दिशा की सूचक नहीं हैं।

© NCERT not to be republished

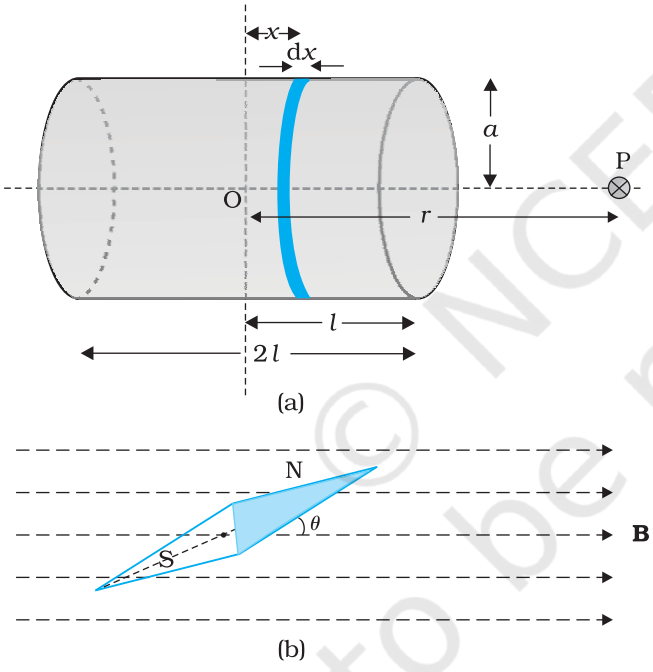
(iii) क्षेत्र के लंबवत रखे गए तल के प्रति इकाई क्षेत्रफल से जितनी अधिक क्षेत्र रेखाएँ गुजरती हैं, उतना ही अधिक उस स्थान पर चुंबकीय क्षेत्र **B** का परिमाण होता है। चित्र 5.3 (a) में, क्षेत्र (ii) के आसपास **B** का परिमाण क्षेत्र (i) की तुलना में अधिक है।

(iv) चुंबकीय क्षेत्र रेखाएँ एक-दूसरे को काटती नहीं हैं। ऐसा इसलिए है क्योंकि इस स्थिति में कटान बिंदु पर चुंबकीय क्षेत्र की दिशा एक ही नहीं रह जाती।

आप चाहें तो कई तरह से चुंबकीय क्षेत्र रेखाएँ आलेखित कर सकते हैं। एक तरीका यह है कि भिन्न-भिन्न जगहों पर एक छोटी चुंबकीय कंपास सुई रखिए और इसके दिक्विन्यास को अंकित कीजिए। इस तरह आप चुंबक के आस-पास विभिन्न बिंदुओं पर चुंबकीय क्षेत्र की दिशा जान सकेंगे।

5.2.2 छड़ चुंबक का एक धारावाही परिनालिका की तरह व्यवहार

पिछले अध्याय में हमने यह समझाया है कि किस प्रकार एक धारा लूप एक चुंबकीय द्विध्रुव की तरह व्यवहार करता है (अनुभाग 4.10 देखिए)। हमने ऐम्पियर की इस परिकल्पना का जिक्र भी किया था कि सभी चुंबकीय परिघटनाओं को परिवाही धाराओं के प्रभावों के रूप में समझाया जा सकता है। याद कीजिए कि किसी धारावाही लूप से जुड़े चुंबकीय द्विध्रुव आघूर्ण **m** की परिभाषा $\mathbf{m} = NI\mathbf{A}$ से दी जाती है, जहाँ N लूप में फेरों की संख्या, I धारा एवं **A** क्षेत्रफल-सदिश है [समीकरण (4.30) देखिए]।



चित्र 5.4 (a) एक सीमित परिनालिका के अक्षीय क्षेत्र का परिकलन, ताकि इसकी छड़ चुंबक से साम्यता प्रदर्शित की जा सके। (b) एक समान चुंबकीय क्षेत्र **B** में रखी हुई चुंबकीय सूई। यह प्रबंध चुंबकीय क्षेत्र **B** अथवा चुंबकीय आघूर्ण **m** का आकलन करने में सहायक है।

एक छड़ चुंबक की चुंबकीय क्षेत्र रेखाओं की, एक धारावाही परिनालिका की चुंबकीय क्षेत्र रेखाओं से साम्यता यह सुझाती है कि जैसे परिनालिका बहुत-सी परिवाही धाराओं का योग है वैसे ही छड़ चुंबक भी बहुत-सी परिसंचारी धाराओं का योग हो सकता है। एक छड़ चुंबक के दो बराबर टुकड़े करना वैसा ही है जैसे एक परिनालिका को काटना। जिससे हमें दो छोटी परिनालिकाएँ मिल जाती हैं जिनके चुंबकीय क्षेत्र अपेक्षाकृत क्षीण होते हैं। क्षेत्र रेखाएँ संतत बनी रहती हैं, एक सिरे से बाहर निकलती हैं और दूसरे सिरे से अंदर प्रवेश करती हैं। एक छोटी चुंबकीय कंपास सुई को एक छड़ चुंबक एवं एक धारावाही सीमित परिनालिका के पास एक जगह से दूसरी जगह ले जाकर यह देखा जा सकता है कि दोनों के लिए चुंबकीय सुई में विक्षेपण एक जैसा है और इस तरह इस साम्यता का परीक्षण आसानी से किया जा सकता है।

इस साम्यता को और अधिक सुदृढ़ करने के लिए हम चित्र 5.4 (a) में दर्शायी गई सीमित परिनालिका के अक्षीय क्षेत्र की गणना करते हैं। हम यह प्रदर्शित करेंगे कि बहुत अधिक दूरी पर यह अक्षीय क्षेत्र छड़ चुंबक के अक्षीय क्षेत्र जैसा ही है।

माना कि चित्र 5.4 (a) में दर्शायी गई धारावाही परिनालिका की प्रति इकाई लंबाई में n फेरे हैं और इसकी त्रिज्या 'a' है। माना इसकी लंबाई $2l$ है। परिनालिका के केंद्र से r दूरी पर (बिंदु P) हम अक्षीय क्षेत्र ज्ञात कर सकते हैं। यह करने के लिए, परिनालिका का एक छोटा वृत्ताकार अंश dx मोटाई का लेते हैं जो इसके केंद्र से x दूरी पर है। इसमें $n\,dx$ फेरे हैं। माना कि परिनालिका में I धारा प्रवाहित हो रही है। पिछले अध्याय के अनुभाग 4.6 में हमने एक वृत्ताकार लूप के अक्ष

© NCERT not to be republished

पर चुंबकीय क्षेत्र की गणना की थी। समीकरण (4.17) के अनुसार, वृत्ताकार अंश के कारण बिंदु P पर चुंबकीय क्षेत्र का परिमाण

$$dB = \frac{\mu_0 n\, dx\, I\, a^2}{2[(r-x)^2 + a^2]^{3/2}}$$

कुल क्षेत्र का परिमाण प्राप्त करने के लिए ऐसे सभी अंशों के योगदान जोड़ने होंगे। दूसरे शब्दों में $x = -l$ से $x = +l$ तक समाकलन करना होगा।

$$B = \frac{\mu_0 n I a^2}{2} \int_{-l}^{l} \frac{dx}{[(r-x)^2 + a^2]^{3/2}}$$

यह समाकलन त्रिकोणमितीय प्रतिस्थापन द्वारा किया जा सकता है। किंतु, हमारा उद्देश्य पूरा करने के लिए ऐसा करना आवश्यक नहीं है। ध्यान दें कि x का परास $-l$ से $+l$ तक है। धारावाही परिनालिका के बहुत दूर स्थित अक्षीय बिंदु के लिए $r >> a$ एवं $r >> l$। तब भिन्न में हर का लगभग मान हो जाएगा :

$$[(r-x)^2 + a^2]^{3/2} \approx r^3$$

और $$B = \frac{\mu_0\, n\, I\, a^2}{2r^3} \int_{-l}^{l} dx$$

$$= \frac{\mu_0\, n\, I}{2} \frac{2l a^2}{r^3} \qquad (5.1)$$

ध्यान दीजिए कि धारावाही परिनालिका के चुंबकीय आघूर्ण का परिमाण $m = n\,(2l)\,I\,(\pi a^2)$ [अर्थात कुल फेरों की संख्या × धारा × अनुप्रस्थ काट का क्षेत्रफल]। अत:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2m}{r^3} \qquad (5.2)$$

यही समीकरण छड़ चुंबक की अक्ष पर दूर स्थित बिंदु के लिए भी है जिसे कोई भी प्रयोगात्मक विधि से प्राप्त कर सकता है। इस प्रकार, छड़ चुंबक और धारावाही परिनालिका एक जैसे चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करते हैं। अत: एक छड़ चुंबक का चुंबकीय आघूर्ण, उतना ही चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करने वाली समतुल्य धारावाही परिनालिका के चुंबकीय आघूर्ण के बराबर है।

कुछ पाठ्यपुस्तकें $2l$ लंबाई के एक छड़ चुंबक के उत्तर ध्रुव के लिए एक *चुंबकीय आवेश* $+q_m$ एवं दक्षिण (इसे *ध्रुव शक्ति* कहते हैं) ध्रुव के लिए $-q_m$ नियत करके इसका चुंबकीय आघूर्ण $+q_m(2l)$ नियत करती हैं। r दूरी पर q_m के कारण क्षेत्र की तीव्रता $\mu_0 q_m/4\pi r^2$ होगी और तब अक्षीय एवं अनुप्रस्थ दोनों स्थितियों में इस छड़ चुंबक के कारण चुंबकीय क्षेत्र उसी प्रकार ज्ञात किया जा सकता है जैसा कि वैद्युत द्विध्रुव के लिए किया गया था (देखिए अध्याय 1)। यह तरीका सरल भी है और आकर्षक भी। *परंतु, चुंबकीय एकध्रुवों का अस्तित्व तो होता नहीं, इसलिए, हमने इस प्रस्तुति-विधि का उपयोग नहीं किया है।*

5.2.3 एकसमान चुंबकीय क्षेत्र में द्विध्रुव

लौह रेतन (iron filling) से बने पैटर्न अर्थात चुंबकीय क्षेत्र रेखाएँ हमें चुंबकीय क्षेत्र **B** का एक सन्निकट मान बताते हैं। प्राय: हमें **B** का सही-सही मान जानने की आवश्यकता होती है। इसके लिए हम एक पतली चुंबकीय सुई का, जिसका चुंबकीय आघूर्ण **m** एवं जड़त्वाघूर्ण g ज्ञात हों, इस चुंबकीय क्षेत्र में दोलन कराते हैं। यह व्यवस्था चित्र 5.4 (b) में दर्शायी गई है।

चुंबकीय सुई पर बलआघूर्ण [समीकरण (4.29) देखिए]

© NCERT not to be republished

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{m} \times \mathbf{B} \quad (5.3)$$

जिसका परिमाण $\tau = mB \sin\theta$

यहाँ $\boldsymbol{\tau}$ प्रत्यानयन आघूर्ण है तथा कोण θ, $\mathbf{m}$ और $\mathbf{B}$ के बीच का कोण है।

अतः, संतुलनावस्था में $\mathcal{I}\dfrac{d^2\theta}{dt^2} = -mB\sin\theta$

$mB\sin\theta$ के साथ ऋणात्मक चिह्न यह निर्दिष्ट करता है कि प्रत्यानयन आघूर्ण विस्थापनकारी आघूर्ण के विपरीत दिशा में है। रेडियन में बहुत छोटे कोण के लिए हम $\sin\theta \approx \theta$ लेते हैं। अतः,

$$\mathcal{I}\frac{d^2\theta}{dt^2} \approx -mB\theta$$

अथवा $\dfrac{d^2\theta}{dt^2} = -\dfrac{mB}{\mathcal{I}}\theta$

यह सरल आवर्त गति दर्शाता है, जिसके लिए, कोणीय आवृत्ति का वर्ग $\omega^2 = mB/\mathcal{I}$ तथा दोलन काल है,

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\mathcal{I}}{mB}} \quad (5.4)$$

अथवा $$B = \frac{4\pi^2\mathcal{I}}{mT^2} \quad (5.5)$$

चुंबकीय स्थितिज ऊर्जा के लिए व्यंजक प्राप्त करने के लिए हम उसी विधि का अनुसरण कर सकते हैं जो हमने वैद्युत स्थितिज ऊर्जा का व्यंजक प्राप्त करने के लिए अपनायी थी।

किसी चुंबकीय द्विध्रुव की चुंबकीय स्थितिज ऊर्जा U_m इस प्रकार है

$$U_m = \int \tau(\theta)d\theta$$

$$= \int mB\sin\theta\, d\theta = -mB\cos\theta$$

$$= -\mathbf{m}\cdot\mathbf{B} \quad (5.6)$$

इस बात को हमने पहले भी काफी जोर देकर कहा था कि स्थितिज ऊर्जा का शून्य हम अपनी सुविधानुसार निर्धारित कर सकते हैं। समाकलन नियंताक को शून्य लेने का अर्थ है कि हमने स्थितिज ऊर्जा का शून्य $\theta = 90^\circ$ पर, अर्थात उस स्थिति को ले लिया है जिस पर सुई क्षेत्र के लंबवत है। समीकरण (5.6) यह दर्शाती है कि न्यूनतम स्थितिज ऊर्जा (= $-mB$) (अर्थात सर्वाधिक स्थायी अवस्था) $\theta = 0^\circ$ पर होती है एवं अधिकतम स्थितिज ऊर्जा (= $+mB$) (अर्थात अधिकतम अस्थायी अवस्था) $\theta = 180^\circ$ पर होती है।

उदाहरण 5.1

उदाहरण 5.1 चित्र 5.4 (b) में, चुंबकीय सुई का चुंबकीय आघूर्ण 6.7×10^{-2} A m^2 और जड़त्वाघूर्ण $\mathcal{I} = 7.5 \times 10^{-6}$ kg m^2 है। यह 6.70 s में 10 पूरे दोलन करती है। चुंबकीय क्षेत्र का परिमाण क्या है?

हल दोलनकाल

$$T = \frac{6.70}{10} = 0.67\,\text{s}$$

समीकरण (5.5) से प्राप्त होता है

$$B = \frac{4\pi^2\mathcal{I}}{mT^2}$$

$$= \frac{4\times(3.14)^2\times 7.5\times10^{-6}}{6.7\times10^{-2}\times(0.67)^2}$$

$$= 0.01\ \text{T}$$

© NCERT not to be republished

उदाहरण 5.2

उदाहरण 5.2 एक छोटे छड़ चुंबक को जब 800 G के बाह्य चुंबकीय क्षेत्र में इस तरह रखा जाता है कि इसकी अक्ष क्षेत्र से 30° का कोण बनाए, तो यह 0.016 N m का बलआघूर्ण अनुभव करता है। (a) चुंबक का चुंबकीय आघूर्ण कितना है? (b) सर्वाधिक स्थायी स्थिति से सर्वाधिक अस्थायी स्थिति तक इसको घुमाने में कितना कार्य करना पड़ेगा? (c) छड़ चुंबक को यदि एक परिनालिका से प्रतिस्थापित कर दें जिसमें 1000 फेरे हों, जिसके अनुप्रस्थ काट का क्षेत्रफल 2×10^{-4} m^2 हो और जिसका चुंबकीय आघूर्ण उतना ही हो जितना छड़ चुंबक का है, तो परिनालिका में प्रवाहित होने वाली धारा ज्ञात कीजिए।

हल

(a) समीकरण (5.3) के अनुसार $\tau = m B \sin \theta$, $\theta = 30°$, इसलिए $\sin\theta = 1/2$

अत:, $0.016 = m \times (800 \times 10^{-4}\ T) \times (1/2)$

$m = 160 \times 2/800 = 0.40\ A\ m^2$

(b) समीकरण (5.6) के अनुसार सर्वाधिक स्थायी स्थिति तब है जब $\theta = 0°$ एवं सर्वाधिक अस्थायी स्थिति तब है जब $\theta = 180°$

$W = U_m(\theta = 180°) - U_m(\theta = 0°)$

$= 2\ m B = 2 \times 0.40 \times 800 \times 10^{-4} = 0.064\ J$

(c) समीकरण (4.30) के अनुसार $m_s = NIA$ भाग (a) में हमने ज्ञात किया है कि $m_s = 0.40\ A\ m^2$

$0.40 = 1000 \times I \times 2 \times 10^{-4}$

$I = 0.40 \times 10^4/(1000 \times 2) = 2A$

उदाहरण 5.3

उदाहरण 5.3

(a) क्या होता है जबकि एक चुंबक को दो खंडों में विभाजित करते हैं (i) इसकी लंबाई के लंबवत (ii) लंबाई के अनुदिश?

(b) एकसमान चुंबकीय क्षेत्र में रखी गई किसी चुंबकीय सुई पर बल आघूर्ण तो प्रभावी होता है पर इस पर कोई परिणामी बल नहीं लगता। तथापि, एक छड़ चुंबक के पास रखी लोहे की कील पर बल आघूर्ण के साथ-साथ परिणामी बल भी लगता है। क्यों?

(c) क्या प्रत्येक चुंबकीय विन्यास का एक उत्तरी और एक दक्षिणी ध्रुव होना आवश्यक है? एक टोरॉयड के चुंबकीय क्षेत्र के संबंध में इस विषय में अपनी टिप्पणी दीजिए।

(d) दो एक जैसी दिखाई पड़ने वाली छड़ें A एवं B दी गई हैं जिनमें कोई एक निश्चित रूप से चुंबकीय है, यह ज्ञात है (पर, कौन सी यह ज्ञात नहीं है)। आप यह कैसे सुनिश्चित करेंगे कि दोनों छड़ें चुंबकित हैं या केवल एक? और यदि केवल एक छड़ चुंबकित है तो यह कैसे पता लगाएँगे कि वह कौन सी है। [आपको छड़ों A एवं B के अतिरिक्त अन्य कोई चीज प्रयोग नहीं करनी है।]

हल

(a) दोनों ही प्रकरणों में आपको दो चुंबक प्राप्त होते हैं जिनमें से प्रत्येक में एक उत्तरी और एक दक्षिणी ध्रुव होता है।

(b) यदि क्षेत्र एकसमान हों केवल तभी चुंबक पर कोई बल नहीं लगता। परंतु छड़ चुंबक के कारण कील पर असमान क्षेत्र आरोपित होता है जिसके कारण कील में चुंबकीय आघूर्ण प्रेरित होता है। अत: इस पर परिणामी बल भी लगता है और बल आघूर्ण भी। परिणामी बल आकर्षण बल होता है, क्योंकि कील में प्रेरित दक्षिण ध्रुव (माना) इसमें प्रेरित उत्तरी ध्रुव की अपेक्षा चुंबक के अधिक निकट होता है।

(c) आवश्यक नहीं है। यह तभी सत्य होगा जब चुंबकीय क्षेत्र के स्रोत का परिणामी चुंबकीय आघूर्ण शून्य नहीं होगा। टोरॉयड या अनंत लंबाई की परिनालिका के लिए ऐसा नहीं होता।

(d) चुंबकों के अलग-अलग सिरों को एक-दूसरे के पास लाने की कोशिश कीजिए। यदि किसी स्थिति में प्रतिकर्षण बल का अनुभव हो तो दोनों छड़ें चुंबकित हैं। यदि हमेशा आकर्षण बल

© NCERT not to be republished

उदाहरण 5.3

ही लगे तो उनमें से एक छड़ चुंबकित नहीं है। यह देखने के लिए कि कौन-सी छड़ चुंबकित है, एक छड़ A मान लीजिए और इसका एक सिरा नीचे कीजिए; पहले दूसरी छड़ B के सिरे के पास लाइए और फिर बीच में। अगर आप पाएँ कि B के बीच में छड़ A आकर्षण बल अनुभव नहीं करती तो B चुंबकित है। और यदि आप पाएँ कि सिरे पर और बीच में आकर्षण बल बराबर है, तो छड़ A चुंबकित है।

5.2.4 स्थिरवैद्युत अनुरूप

समीकरणों (5.2), (5.3) एवं (5.4) के संगत विद्युत द्विध्रुव के समीकरणों (अध्याय 1 देखिए) से तुलना करने पर हम इस परिणाम पर पहुँचते हैं कि **m** चुंबकीय आघूर्ण वाले छड़ चुंबक का चुंबकीय क्षेत्र, इससे बहुत दूरी पर स्थित किसी बिंदु पर ज्ञात करने के लिए, हमें द्विध्रुव आघूर्णों वाले विद्युत द्विध्रुव के कारण उत्पन्न विद्युत क्षेत्र के समीकरण में, केवल निम्नलिखित प्रतिस्थापन करने होंगे–

$$\mathbf{E} \rightarrow \mathbf{B}, \ \mathbf{p} \rightarrow \mathbf{m}, \ \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \rightarrow \frac{\mu_0}{4\pi}$$

विशेषत:, r दूरी ($r >> l$ के लिए, जहाँ l चुंबक की लंबाई है)पर एक छड़ चुंबक का विषुवतीय चुंबकीय क्षेत्र

$$\mathbf{B}_E = -\frac{\mu_0 \mathbf{m}}{4\pi r^3} \tag{5.7}$$

इसी प्रकार, r दूरी ($r >> l$ के लिए) पर एक छड़ चुंबक का अक्षीय चुंबकीय क्षेत्र

$$\mathbf{B}_A = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\mathbf{m}}{r^3} \tag{5.8}$$

समीकरण (5.8), समीकरण (5.2) का सदिश रूप है। सारणी 5.1 विद्युत एवं चुंबकीय द्विध्रुवों के मध्य समानता दर्शाती है।

सारणी 5.1 द्विध्रुवों की सादृश्यता

	स्थिर वैद्युत	चुंबकीय
	$1/\varepsilon_0$	μ_0
द्विध्रुव आघूर्ण	$\mathbf{p}$	$\mathbf{m}$
विषुवतीय क्षेत्र	$-\mathbf{p}/4\pi\varepsilon_0 r^3$	$-\mu_0 \mathbf{m} / 4\pi r^3$
अक्षीय क्षेत्र	$2\mathbf{p}/4\pi\varepsilon_0 r^3$	$\mu_0 2\mathbf{m} / 4\pi r^3$
बाह्य क्षेत्र–बल आघूर्ण	$\mathbf{p} \times \mathbf{E}$	$\mathbf{m} \times \mathbf{B}$
बाह्य क्षेत्र–स्थितिज ऊर्जा	$-\mathbf{p} \cdot \mathbf{E}$	$-\mathbf{m} \cdot \mathbf{B}$

उदाहरण 5.4

उदाहरण 5.4 5 cm लंबाई के छड़ चुंबक के केंद्र से 50 cm की दूरी पर स्थित बिंदु पर, विषुवतीय एवं अक्षीय स्थितियों के लिए चुंबकीय क्षेत्र का परिकलन कीजिए। छड़ चुंबक का चुंबकीय आघूर्ण 0.40 A m^2, जैसा कि उदाहरण 5.2 में है।

हल समीकरण (5.7) के अनुसार,

$$B_E = \frac{\mu_0 m}{4\pi r^3} = \frac{10^{-7} \times 0.4}{(0.5)^3} = \frac{10^{-7} \times 0.4}{0.125} = 3.2 \times 10^{-7} \text{ T}$$

समीकरण (5.8) के अनुसार, $B_A = \frac{\mu_0 2m}{4\pi r^3} = 6.4 \times 10^{-7}$ T

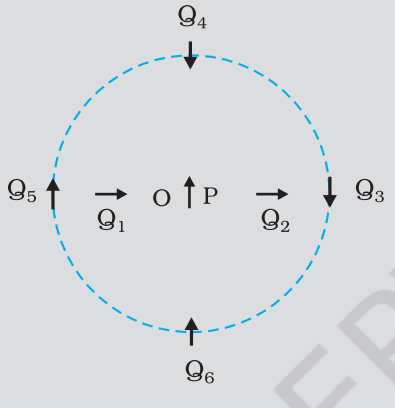
© NCERT not to be republished

उदाहरण 5.5 चित्र 5.5 में O बिंदु पर रखी गई एक छोटी चुंबकीय सुई P दिखाई गई है। तीर इसके चुंबकीय आघूर्ण की दिशा दर्शाता है। अन्य तीर, दूसरी समरूप चुंबकीय सुई Q की विभिन्न स्थितियों (एवं चुंबकीय आघूर्ण के दिक्विन्यासों) को प्रदर्शित करते हैं।

(a) किस विन्यास में यह निकाय संतुलन में नहीं होगा?

(b) किस विन्यास में निकाय (i) स्थायी (ii) अस्थायी संतुलन में होंगे?

(c) दिखाए गए सभी विन्यासों में किसमें न्यूनतम स्थितिज ऊर्जा है?



चित्र 5.5

हल

किसी विन्यास की स्थितिज ऊर्जा, एक चुंबकीय द्विध्रुव (माना Q) की, दूसरे चुंबकीय द्विध्रुव (माना P) के चुंबकीय क्षेत्र के कारण उत्पन्न स्थितिज ऊर्जा है। आप समीकरण (5.7) एवं (5.8) द्वारा व्यक्त निम्नलिखित परिणाम प्रयोग में ला सकते हैं–

$$\mathbf{B}_P = -\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{\mathbf{m}_P}{r^3} \quad \text{(लंब समद्विभाजक पर)}$$

$$\mathbf{B}_P = \frac{\mu_0 2}{4\pi}\frac{\mathbf{m}_P}{r^3} \quad \text{(अक्ष पर)}$$

जहाँ $\mathbf{m}_P$ द्विध्रुव P का चुंबकीय आघूर्ण है।

संतुलन तब स्थायी होगा जब $\mathbf{m}_Q$ एवं $\mathbf{B}_P$ एक-दूसरे के समांतर होंगी और संतुलन अस्थायी तब होगा जब वे प्रतिसमांतर होंगी।

उदाहरणार्थ, विन्यास Q_3 में, जिसके लिए Q द्विध्रुव P के लंब समद्विभाजक के अनुदिश है, Q का चुंबकीय आघूर्ण, स्थिति 3 में, चुंबकीय क्षेत्र के समांतर है, अतः Q_3 स्थायी है

इस प्रकार,

(a) PQ_1 एवं PQ_2

(b) (i) PQ_3, PQ_6 (स्थायी); (ii) PQ_5, PQ_4 (अस्थायी)

(c) PQ_6

उदाहरण 5.5

5.3 चुंबकत्व एवं गाउस नियम

अध्याय 1 में हमने स्थिरवैद्युत के लिए गाउस के नियम का अध्ययन किया था। चित्र 5.3 (c) में हम देखते हैं कि (i) द्वारा अंकित बंद गाउसीय सतह से क्षेत्र रेखाओं की जितनी संख्या बाहर आती है, उतनी ही इसके अंदर प्रवेश करती है। इस बात की इस तथ्य से संगति बैठती है कि सतह द्वारा परिवेष्ठित कुल आवेश का परिमाण शून्य है। किंतु, उसी चित्र में, बंद सतह (ii) जो किसी धनावेश को घेरती है, के लिए परिणामी निर्गत फ्लक्स होता है।

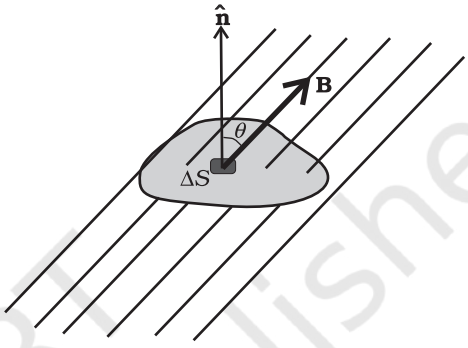
© NCERT not to be republished



कार्ल फ्रेड्रिक गाउस (1777 – 1855)

कार्ल फ्रेड्रिक गाउस (1777 – 1855) वे एक विलक्षण बाल-प्रतिभा थे। गणित, भौतिकी, अभियांत्रिकी, खगोलशास्त्र और यहाँ तक कि भू-सर्वेक्षण में भी उनको प्रकृति की अनुपम देन थी। संख्याओं के गुण उनको लुभाते थे और उनके कार्य में उनके बाद आने वाले जमाने के प्रमुख गणितीय विकास का पूर्वाभास होता है। 1833 में विल्हेम वेलसर के साथ मिलकर उन्होंने पहला विद्युतीय टेलिग्राफ बनाया। वक्र-पृष्ठों से संबंधित उनके गणितीय सिद्धांत ने बाद में रीमन द्वारा किए गए कार्य की आधारशिला रखी।

यह स्थिति उन चुंबकीय क्षेत्रों के लिए पूर्णत: भिन्न है, जो संतत हैं और बंद लूप बनाते हैं। चित्र 5.3 (a) या 5.3 (b) में (i) या (ii) द्वारा अंकित गाउसीय सतहों का निरीक्षण कीजिए। आप पाएँगे कि सतह से बाहर आने वाली बल रेखाओं की संख्या इसके अंदर प्रवेश करने वाली संख्या के बराबर है। *दोनों ही सतहों के लिए कुल चुंबकीय फ्लक्स शून्य है* और यह बात किसी भी बंद सतह के लिए सत्य है।



चित्र 5.6

किसी बंद सतह S का एक छोटा सदिश क्षेत्रफल अवयव $\Delta\mathbf{S}$ लीजिए। जैसा कि चित्र 5.6 में दर्शाया गया है। $\Delta\mathbf{S}$ से गुजरने वाला चुंबकीय फ्लक्स $\Delta\phi_B = \mathbf{B}.\Delta\mathbf{S}$ है, जहाँ **B**, $\Delta\mathbf{S}$ पर चुंबकीय क्षेत्र है। हम S को कई छोटे-छोटे अवयवों में बाँट लेते हैं और उनमें से प्रत्येक से गुजरने वाले फ्लक्सों के मान अलग-अलग निकालते हैं। तब, कुल फ्लक्स ϕ_B का मान है,

$$\phi_B = \sum_{\text{'सभी'}} \Delta\phi_B = \sum_{\text{'सभी'}} \mathbf{B}\cdot\Delta\mathbf{S} = 0 \qquad (5.9)$$

जहाँ 'सभी' का अर्थ है सभी क्षेत्रफल अवयव $\Delta\mathbf{S}$ । इसकी तुलना वैद्युतस्थितिकी के गाउस के नियम से कीजिए। जहाँ एक बंद सतह से गुजरने वाला वैद्युत फ्लक्स

$$\sum \mathbf{E}\cdot\Delta\mathbf{S} = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

जहाँ q बंद सतह द्वारा परिबद्ध आवेश है।

चुंबकत्व एवं स्थिरवैद्युतिकी के गाउस नियमों के बीच का अंतर इसी तथ्य की अभिव्यक्ति है कि *पृथक्कृत चुंबकीय ध्रुवों (जिन्हें एकध्रुव भी कहते हैं) का अस्तित्व नहीं होता।* **B** का कोई उद्गम या अभिगम नहीं होता है। सरलतम चुंबकीय अवयव एक द्विध्रुव या धारा लूप है। सभी चुंबकीय परिघटनाएँ एक धारा लूप एवं/या द्विध्रुव व्यवस्था के रूप में समझायी जा सकती हैं।

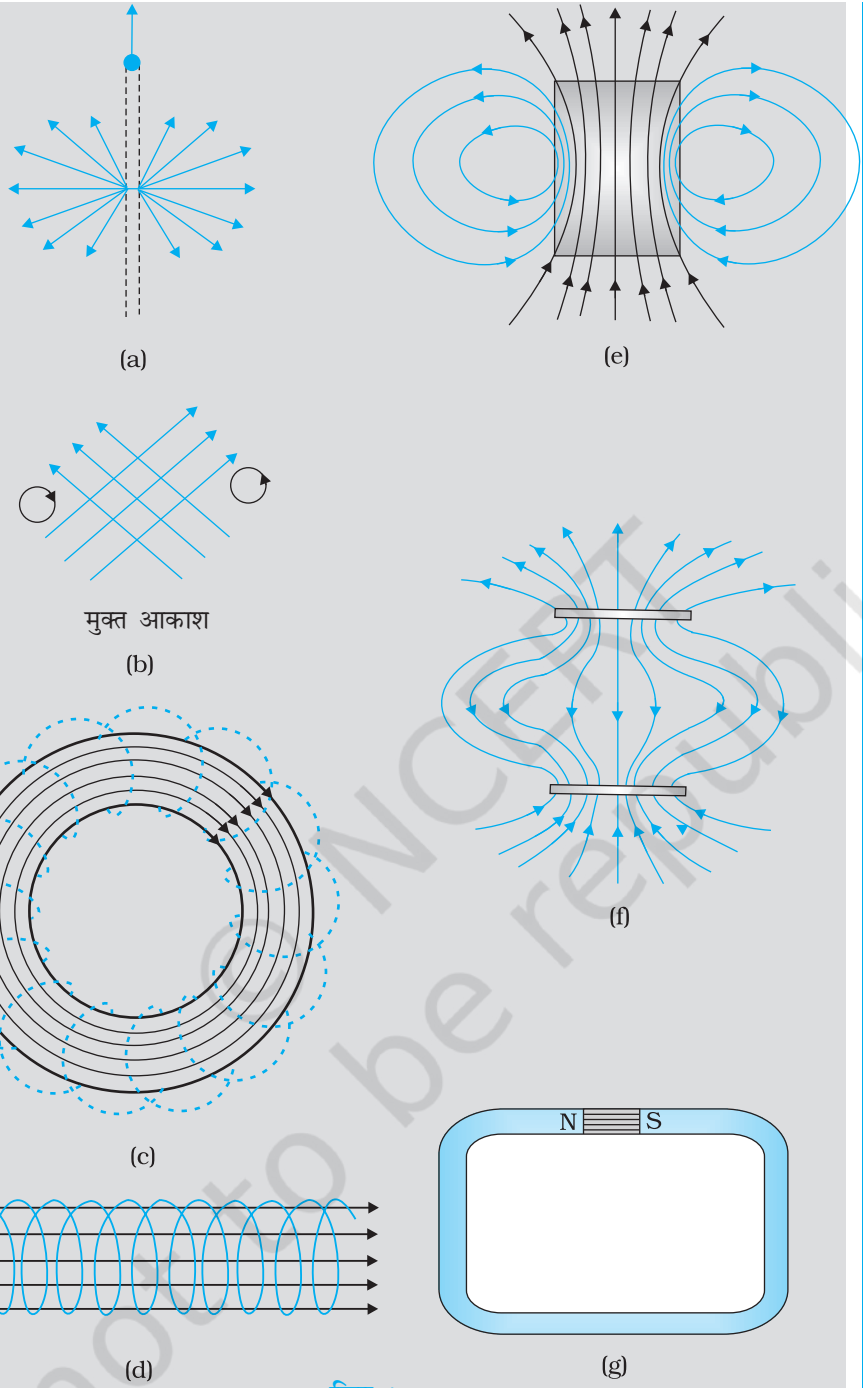
चुंबकत्व के लिए गाउस का नियम है–

किसी भी बंद सतह से गुज़रने वाला कुल चुंबकीय फ्लक्स हमेशा शून्य होता है।

उदाहरण 5.6

उदाहरण 5.6 नीचे दिए गए चित्रों में से कई में चुंबकीय क्षेत्र रेखाएँ गलत दर्शायी गई हैं [चित्रों में मोटी रेखाएँ]। पहचानिए कि उनमें गलती क्या है? इनमें से कुछ में वैद्युत क्षेत्र रेखाएँ ठीक-ठीक दर्शायी गई हैं। बताइए, वे कौन से चित्र हैं?

© NCERT not to be republished



चित्र 5.7

हल

(a) *गलत* है। चुंबकीय बल रेखाएँ एक बिंदु से इस प्रकार नहीं निकल सकतीं जैसा कि चित्र में दिखाया गया है। किसी बंद सतह पर **B** का कुल फ्लक्स हमेशा शून्य ही होना चाहिए अर्थात, चित्र में जितनी क्षेत्र रेखाएँ सतह में प्रवेश करें उतनी ही इससे बाहर निकलनी चाहिए। दिखायी गई क्षेत्र रेखाएँ, वास्तव में, एक लंबे धनावेशित तार का विद्युत क्षेत्र प्रदर्शित करती हैं। सही चुंबकीय क्षेत्र रेखाएँ जैसा अध्याय 4 में बताया गया है, सीधे तार को चारों ओर से घेरने वाले वृत्तों के रूप में हैं।

© NCERT not to be republished

उदाहरण 5.6

(b) *गलत* है। चुंबकीय क्षेत्र रेखाएँ (विद्युत क्षेत्र रेखाओं की तरह ही) कभी भी एक-दूसरे को काट नहीं सकतीं। क्योंकि, अन्यथा कटान बिंदु पर क्षेत्र की दिशा संदिग्ध हो जाएगी। चित्र में एक गलती और भी है। स्थिर-चुंबकीय क्षेत्र रेखाएँ मुक्त आकाश में कभी भी बंद वक्र नहीं बना सकतीं। स्थिर-चुंबकीय क्षेत्र रेखा के बंद लूप को निश्चित रूप से एक ऐसे प्रदेश को घेरना चाहिए जिसमें से होकर धारा प्रवाहित हो रही हो [इसके विपरीत वैद्युत क्षेत्र रेखाएँ कभी भी बंद लूप नहीं बना सकतीं, न तो मुक्त आकाश में और न ही तब जब लूप आवेश को घेरते हैं।]

(c) *ठीक* है। चुंबकीय रेखाएँ पूर्णत: एक टोरॉइड में समाहित हैं। यहाँ चुंबकीय क्षेत्र रेखाओं द्वारा बंद लूप बनाने में कोई त्रुटि नहीं है, क्योंकि प्रत्येक लूप एक ऐसे क्षेत्र को घेरता है जिसमें से होकर धारा गुजरती है। ध्यान दीजिए कि चित्र में स्पष्टता लाने के लिए ही टोरॉइड के अंदर मात्र कुछ क्षेत्र रेखाएँ दिखायी गई हैं। तथ्य यह है कि टोरॉइड के फेरों के अंदर के संपूर्ण भाग में चुंबकीय क्षेत्र मौजूद रहता है।

(d) *गलत* है। परिनालिका की क्षेत्र रेखाएँ, इसके सिरों पर और इसके बाहर पूर्णत: सीधी और सिमटी हुई नहीं हो सकती हैं। ऐसा होने से ऐम्पियर का नियम भंग होता है। ये रेखाएँ सिरों पर वक्रित हो जानी चाहिए और इनको अंत में मिल कर बंद पाश बनाने चाहिए।

(e) *सही* है। एक छड़ चुंबक के अंदर एवं बाहर दोनों ओर चुंबकीय क्षेत्र होता है। अंदर क्षेत्र की दिशा पर अच्छी तरह ध्यान दीजिए। सभी क्षेत्र रेखाएँ उत्तर ध्रुव से नहीं निकलतीं (और न ही दक्षिण ध्रुव पर समाप्त होती हैं)। N-ध्रुव एवं S-ध्रुव के चारों तरफ क्षेत्र के कारण कुल फ्लक्स शून्य होता है।

(f) *गलत* है। संभावना यही है कि ये क्षेत्र रेखाएँ चुंबकीय क्षेत्र प्रदर्शित नहीं करतीं। ऊपरी भाग को देखिए। सभी क्षेत्र रेखाएँ छायित प्लेट से निकलती जान पड़ती हैं। इस प्लेट को घेरने वाली सतह से गुजरने वाले क्षेत्र का कुल फ्लक्स शून्य नहीं है। चुंबकीय क्षेत्र के संदर्भ में ऐसा होना संभव नहीं है। दिखायी गई क्षेत्र रेखाएँ, वास्तव में, धनावेशित ऊपरी प्लेट एवं ऋणावेशित निचली प्लेट के बीच स्थिरवैद्युत क्षेत्र रेखाएँ हैं। [चित्र 5.7(e) एवं (f)] के बीच के अंतर को ध्यानपूर्वक ग्रहण करना चाहिए।

(g) *गलत* है। दो ध्रुवों के बीच चुंबकीय क्षेत्र रेखाएँ, सिरों पर, ठीक सरल रेखाएँ नहीं हो सकतीं। रेखाओं में कुछ फैलाव अवश्यम्भावी है अन्यथा, ऐम्पियर का नियम भंग होता है। यह बात वैद्युत क्षेत्र रेखाओं के लिए भी लागू होती है।

उदाहरण 5.7

उदाहरण 5.7

(a) चुंबकीय क्षेत्र रेखाएँ (हर बिंदु पर) वह दिशा बताती हैं जिसमें (उस बिंदु पर रखी) चुंबकीय सुई संकेत करती है। क्या चुंबकीय क्षेत्र रेखाएँ प्रत्येक बिंदु पर गतिमान आवेशित कण पर आरोपित *बल रेखाएँ* भी हैं?

(b) एक टोरॉइड में तो चुंबकीय क्षेत्र पूर्णत: क्रोड के अंदर सीमित रहता है, पर परिनालिका में ऐसा नहीं होता। क्यों?

(c) यदि चुंबकीय एकल ध्रुवों का अस्तित्व होता तो चुंबकत्व संबंधी गाउस का नियम क्या रूप ग्रहण करता?

(d) क्या कोई छड़ चुंबक अपने क्षेत्र की वजह से अपने ऊपर बल आघूर्ण आरोपित करती है? क्या किसी धारावाही तार का एक अवयव उसी तार के दूसरे अवयव पर बल आरोपित करता है।

(e) गतिमान आवेशों के कारण चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न होते हैं। क्या कोई ऐसी प्रणाली है जिसका चुंबकीय आघूर्ण होगा, यद्यपि उसका नेट आवेश शून्य है?

© NCERT not to be republished

उदाहरण 5.7

हल

(a) *नहीं।* चुंबकीय बल सदैव **B** के लंबवत होता है (क्योंकि चुंबकीय बल = $q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ अत: **B** की क्षेत्र रेखाओं को बल रेखाएँ कहना भ्रामक वक्तव्य है।

(b) यदि क्षेत्र रेखाएँ सिर्फ सीधी परिनालिका के दो सिरों के बीच सीमित होतीं तो प्रत्येक सिरे के अनुप्रस्थ काट से गुज़रने वाला फ्लक्स शून्य न होता। लेकिन, क्षेत्र **B** का किसी बंद सतह से गुज़रने वाला फ्लक्स तो सदैव शून्य ही होता है। टोरॉइड के विषय में यह समस्या ही खड़ी नहीं होती क्योंकि इसके कोई सिरे नहीं होते।

(c) चुंबकत्व संबंधी गाउस का नियम यह कहता है कि क्षेत्र **B** के कारण, किसी बंद सतह से गुज़रने वाला कुल फ्लक्स सदैव शून्य होता है। किसी बंद सतह S के लिए $\int_S \mathbf{B}.d\mathbf{s} = 0$

यदि एकल ध्रुवों का अस्तित्व होता तो (स्थिरवैद्युतिकी के गाउस नियम के अनुरूप) समीकरण के दायीं ओर सतह S से घिरे एकल ध्रुवों (चुंबकीय आवेशों) q_m का योग आता। अर्थात समीकरण का रूप होता

$\int_S \mathbf{B}\cdot d\mathbf{s} = \mu_0 q_m$ जहाँ q_m, S से घिरा चुंबकीय आवेश (एकल ध्रुव) है।

(d) *नहीं।* तार के अल्पांश द्वारा उत्पन्न चुंबकीय क्षेत्र के कारण इसके स्वयं के ऊपर कोई बल या बल आघूर्ण नहीं लगता। लेकिन इसके कारण उसी तार के दूसरे अल्पांश पर बल (या बल आघूर्ण) लगता है। (सीधे तार के विशेष मामले में, यह बल शून्य ही होता है)।

(e) *हाँ।* संपूर्ण व्यवस्था को देखें तो सभी आवेशों का औसत शून्य हो सकता है। फिर भी, यह हो सकता है कि विभिन्न धारा लूपों के कारण उत्पन्न चुंबकीय आघूर्णों का औसत शून्य न हो। हमारे समक्ष अनुचुंबकीय पदार्थों के संदर्भ में ऐसे कई उदाहरण आएँगे जहाँ परमाणुओं का आवेश शून्य है लेकिन उनका द्विध्रुव-आघूर्ण शून्य नहीं है।

5.4 भू-चुंबकत्व

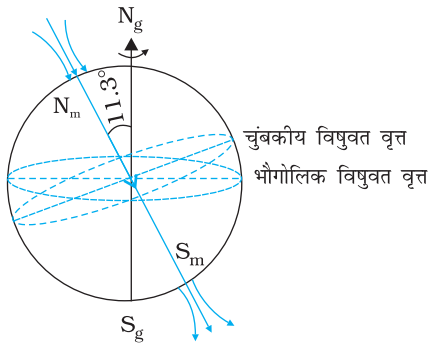
हमने पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र का जिक्र पहले भी किया है। पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता, इसकी सतह पर, भिन्न स्थानों पर भिन्न होती है, पर इसका मान 10^{-5} T की कोटि का होता है।

पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र का कारण क्या है, यह बहुत स्पष्ट नहीं है। प्रारंभ में यह सोचा गया कि पृथ्वी का चुंबकीय क्षेत्र इसके अंदर बहुत गहराई में रखे एक विशाल चुंबक के कारण है जो लगभग पृथ्वी के घूर्णन अक्ष के अनुदिश रखा है। परंतु, यह सरलीकृत चित्र निश्चित रूप से सही नहीं है। अब यह माना जाता है कि पृथ्वी का चुंबकीय क्षेत्र इसके बाह्य क्रोड के धात्विक तरलों (जो अधिकांशत: पिघला लोहा एवं निकिल है) की संवाहक गति के कारण उत्पन्न विद्युत धाराओं के परिणामस्वरूप अस्तित्व में आता है। इसको *डायनेमो प्रभाव* कहा जाता है।

पृथ्वी की चुंबकीय क्षेत्र रेखाएँ, पृथ्वी के केंद्र पर रखे (काल्पनिक) चुंबकीय द्विध्रुव के जैसी ही होती हैं। इस द्विध्रुव की अक्ष पृथ्वी के घूर्णन अक्ष के संपाती नहीं होती है, बल्कि वर्तमान में यह इससे लगभग 11.3° पर झुकी हुई है। इस दृष्टि से देखें तो चुंबकीय ध्रुव वहाँ अवस्थित है जहाँ चुंबकीय बल रेखाएँ पृथ्वी में प्रवेश करती हैं अथवा इससे बाहर निकलती हैं। पृथ्वी के उत्तरी चुंबकीय ध्रुव की स्थिति 79.74° N अक्षांश एवं 71.8° W देशांतर पर है। यह स्थान उत्तरी कनाडा में है। चुंबकीय दक्षिणी ध्रुव अंटार्कटिका में, 79.74° S अक्षांश एवं 108.22° E देशांतर पर है।

वह ध्रुव जो पृथ्वी के भौगोलिक उत्तरी ध्रुव के निकट है *उत्तरी चुंबकीय ध्रुव* कहलाता है। इसी प्रकार पृथ्वी के भौगोलिक दक्षिण ध्रुव के निकट स्थित ध्रुव *दक्षिणी चुंबकीय ध्रुव* कहलाता

© NCERT not to be republished



चित्र 5.8 पृथ्वी, एक विशाल चुंबकीय द्विध्रुव की भाँति।

है। ध्रुवों के नामकरण के संबंध में कुछ संभ्रम हैं। यदि आप पृथ्वी की चुंबकीय क्षेत्र रेखाओं को देखें (चित्र 5.8), तो छड़ चुंबक के विपरीत क्षेत्र रेखाएँ उत्तरी चुंबकीय ध्रुव (N_m) से पृथ्वी के अंदर प्रवेश करती हैं और दक्षिणी चुंबकीय ध्रुव (S_m) से बाहर आती हैं। यह परिपाटी इसलिए शुरू हुई क्योंकि चुंबकीय उत्तर वह दिशा थी जिसमें चुंबकीय सुई का उत्तरी सिरा संकेत करता था; चुंबक के ध्रुव को उत्तरी ध्रुव इसलिए कहा गया क्योंकि यह उत्तर दिशा का ज्ञान कराने में सहायक था। इस प्रकार, वास्तव में, उत्तरी चुंबकीय ध्रुव पृथ्वी के अंदर के छड़ चुंबक के दक्षिणी ध्रुव की तरह व्यवहार करता है एवं दक्षिणी चुंबकीय ध्रुव इस छड़ चुंबक के उत्तरी ध्रुव की तरह।

उदाहरण 5.8

उदाहरण 5.8 विषुवत रेखा पर पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र का परिमाण लगभग 0.4 G है। पृथ्वी के चुंबक के द्विध्रुव आघूर्ण की गणना कीजिए।

हल समीकरण (5.7) के अनुसार विषुवतीय चुंबकीय क्षेत्र का परिमाण,

$$B_E = \frac{\mu_0 m}{4\pi r^3}$$

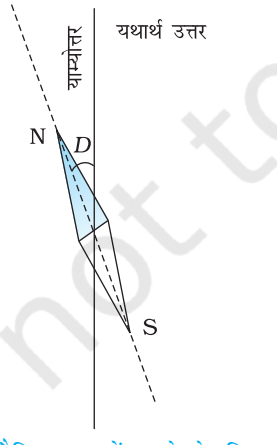
दिया है: $B_E \sim 0.4\ \text{G} = 4 \times 10^{-5}\ \text{T}$, r यहाँ पृथ्वी की त्रिज्या है, $6.4 \times 10^6\ \text{m}$ अत:

$$m = \frac{4\times10^{-5} \times (6.4\times10^6)^3}{\mu_0 / 4\pi} = 4 \times 10^2 \times (6.4 \times 10^6)^3 \quad (\mu_0/4\pi = 10^{-7})$$

$$= 1.05 \times 10^{23}\ \text{A m}^2$$

यह मान भू-चुंबकत्व संबंधी पुस्तकों में दिए गए मान $8 \times 10^{22}\ \text{A m}^2$ के बहुत निकट है।

5.4.1 चुंबकीय दिक्पात एवं नति



चित्र 5.9 क्षैतिज तल में घूमने के लिए स्वतंत्र चुंबकीय सुई, चुंबकीय उत्तर-दक्षिण दिशा में इंगित करती है।

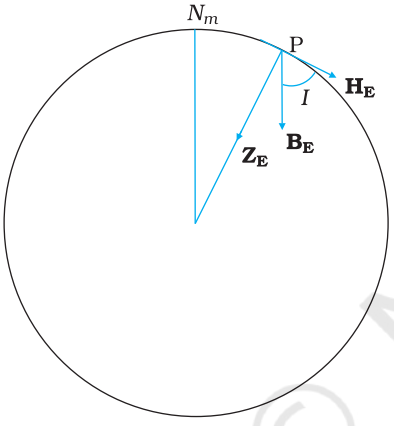
पृथ्वी की सतह पर कोई बिंदु लीजिए। इस बिंदु से गुज़रने वाला देशांतर वृत्त भौगोलिक उत्तर-दक्षिण दिशा निर्दिष्ट करता है जिसकी उत्तरी ध्रुव की ओर जाने वाली रेखा यथार्थ उत्तर की ओर इंगित करती है। देशांतर वृत्त एवं पृथ्वी के घूर्णन अक्ष में से गुजरने वाला ऊर्ध्वाधर तल *भौगोलिक याम्योत्तर* कहलाता है। इसी प्रकार आप किसी स्थान विशेष पर *चुंबकीय याम्योत्तर* भी उस स्थान और चुंबकीय उत्तरी एवं दक्षिणी ध्रुवों को मिल जाने वाली काल्पनिक रेखा से गुज़रने वाले ऊर्ध्वाधर तल के रूप में परिभाषित कर सकते हैं। यह तल भी पृथ्वी की सतह को देशांतर जैसे ही एक वृत्त में काटेगा। एक चुंबकीय सुई जो क्षैतिज तल में घूमने के लिए स्वतंत्र है, तब चुंबकीय याम्योत्तर में रहेगी और इसका उत्तरी ध्रुव पृथ्वी के चुंबकीय उत्तरी ध्रुव की ओर संकेत करेगा। चूँकि चुंबकीय ध्रुवों को मिलाने वाली रेखा, पृथ्वी के भौगोलिक अक्ष की तुलना में किसी कोण पर झुकी रहती है, किसी स्थान पर चुंबकीय याम्योत्तर, भौगोलिक याम्योत्तर से एक कोण बनाती है। यही वह कोण है जो यथार्थ भौगोलिक उत्तर एवं चुंबकीय सुई द्वारा इंगित उत्तर के बीच बनता है। इस कोण को चुंबकीय दिक्पात अथवा केवल *दिक्पात* कहते हैं (चित्र 5.9)।

दिक्पात उच्चतर अक्षांशों पर अधिक एवं विषुवत रेखा के पास कम होता है, भारत में दिक्पात का मान कम है, यह दिल्ली में $0^\circ 41'$ E एवं मुंबई

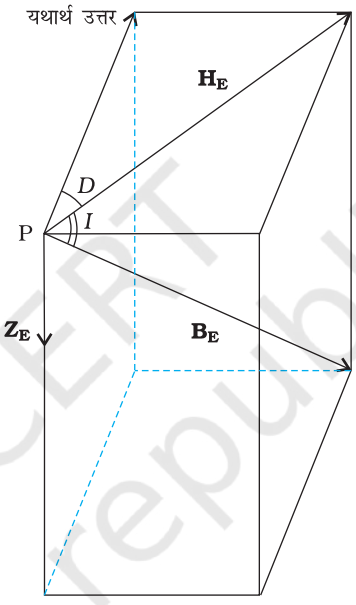
© NCERT not to be republished

में 0°58′ W है। अत: दोनों ही स्थानों पर चुंबकीय सुई काफ़ी हद तक सही उत्तर दिशा दर्शाती है।

एक अन्य महत्वपूर्ण राशि भी है जिसमें आपकी रुचि हो सकती है। यदि कोई चुंबकीय सुई, एक क्षैतिज अक्ष पर इस प्रकार पूर्ण संतुलन में हो कि चुंबकीय याम्योत्तर के तल में घूम सके तो यह सुई क्षैतिज से एक कोण बनाएगी (चित्र 5.10)। यह *नमन कोण* (या आनति) कहलाता है। अत: आनति वह कोण है जो पृथ्वी का कुल चुंबकीय क्षेत्र $\mathbf{B}_E$ पृथ्वी की सतह से बनाता है। चित्र (5.11) पृथ्वी की सतह के किसी बिंदु P पर चुंबकीय याम्योत्तर तल दर्शाता है। यह तल पृथ्वी से गुजरने वाला एक खंड है। बिंदु P पर कुल चुंबकीय क्षेत्र को हम एक क्षैतिज अवयव $\mathbf{H}_E$ एवं एक ऊर्ध्वाधर अवयव $\mathbf{Z}_E$ में वियोजित कर सकते हैं। $\mathbf{B}_E$, $\mathbf{H}_E$ से जो कोण बनाता है वही नमन कोण I है।



चित्र 5.10 दर्शाया गया वृत्त, पृथ्वी से गुज़रने वाला चुंबकीय याम्योत्तर का खंड है। $\mathbf{B}_E$ एवं क्षैतिज अवयव $\mathbf{H}_E$ के बीच बना कोण आनति है।



चित्र 5.11 पृथ्वी का चुंबकीय क्षेत्र $\mathbf{B}_E$, एवं इसके क्षैतिज एवं ऊर्ध्वाधर अवयव $\mathbf{H}_E$ एवं $\mathbf{Z}_E$। दिक्पात कोण D एवं नमन कोण I भी दर्शाए गए हैं।

अधिकतर उत्तरी गोलार्ध में नमन वृत्त की सुई का उत्तरी ध्रुव नीचे की ओर झुकता है। इसी प्रकार अधिकांश दक्षिणी गोलार्ध में नमन सुई का दक्षिणी ध्रुव नीचे झुकता है।

पृथ्वी की सतह पर स्थित किसी बिंद पर चुंबकीय क्षेत्र को पूरी तरह निर्दिष्ट करने के लिए हमें तीन राशियों का विवरण देना होता है, ये हैं- दिक्पात कोण D, आनति या नमन कोण I एवं *पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र का क्षैतिज अवयव* H_E। ये *पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र के घटक कहलाते हैं।*

यहाँ ऊर्ध्वाधर घटक,

$$Z_E = B_E \sin I$$

क्षैतिज घटक, [5.10(a)]

$$H_E = B_E \cos I \quad [5.10(b)]$$

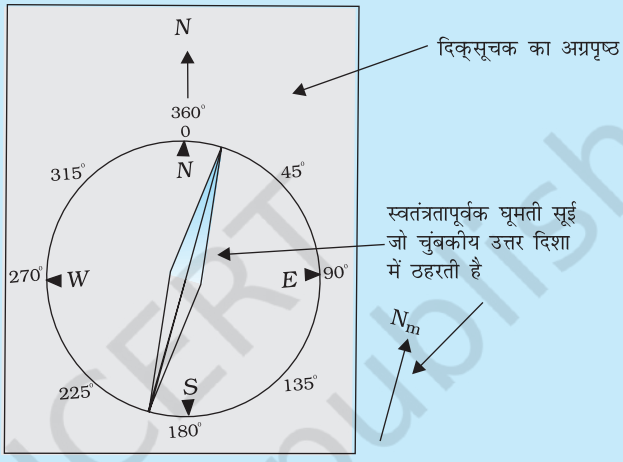
जिससे हमें प्राप्त होता है

$$\tan I = \frac{Z_E}{H_E} \quad [5.10(c)]$$

© NCERT not to be republished

ध्रुवों पर हमारी चुंबकीय सुई को क्या हो जाता है?

चुंबकीय दिक्सूचक में एक चुंबकीय सुई एक धुरी पर स्वतंत्रतापूर्वक घूम सकती है। जब दिकसूचक को समतल में रखा जाता है तो इसकी चुंबकीय सुई उस स्थान पर पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र के क्षैतिज अवयव की दिशा में ठहरती है। पृथ्वी पर कुछ स्थानों पर चुंबकीय खनिजों के भंडार पाए जाते हैं जिनके कारण दिक्सूचक सुई चुंबकीय याम्योत्तर से हट जाती है। किसी स्थान पर दिक्पात का ज्ञान, हमें उस स्थान पर दिक्सूचक सुई के मान में संशोधन कर यथार्थ उत्तर दिशा जानने में सहायता करता है



अतः चुंबकीय सुई को ध्रुव पर ले जाने का परिणाम क्या होगा? ध्रुव पर, या तो चुंबकीय क्षेत्र रेखाएँ ऊर्ध्वाधरतः अभिसरित होंगी या अपसरित होंगी इससे क्षैतिज घटक का मान उपेक्षणीय होगा। यदि सुई केवल क्षैतिज तल में ही घूमने के लिए स्वतंत्र होगी तो यह किसी भी दिशा में संकेत कर सकती है और इस कारण दिक्सूचक के रूप में इसकी कोई उपयोगिता नहीं रह जाएगी। इस स्थिति में जिस वस्तु की हमें आवश्यकता है वह है नमनदर्शी सुई जो एक ऐसी दिक्सूचक सुई है जिसको पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र से युक्त ऊर्ध्वाधर तल में घूमने के लिए धुरी पर रखा गया है। तब इस दिक्सूचक की सुई वह कोण दर्शाती है जो चुंबकीय क्षेत्र ऊर्ध्वाधर से बनाता है। चुंबकीय ध्रुवों पर यह सुई सीधे नीचे की ओर इंगित करती है।

उदाहरण 5.9 किसी स्थान के चुंबकीय याम्योत्तर में पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र का क्षैतिज अवयव 0.26 G है एवं नमन कोण 60° है। इस स्थान पर पृथ्वी का चुंबकीय क्षेत्र क्या है?

हल

यह दिया गया है कि $H_E = 0.26$ G, चित्र 5.11 से हम पाते हैं कि–

$$\cos 60^0 = \frac{H_E}{B_E}$$

$$B_E = \frac{H_E}{\cos 60^0}$$

$$= \frac{0.26}{(1/2)} = 0.52\,\text{G}$$

उदाहरण 5.9

© NCERT not to be republished

पृथ्वी का चुंबकीय क्षेत्र

यह नहीं मानना चाहिए कि पृथ्वी के अंदर गहराई में कोई विशाल छड़ चुंबक रखा है जो पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र के लिए उत्तरदायी है। यद्यपि पृथ्वी के अंदर लोहे के प्रचुर भंडार हैं तथापि इसकी संभावना बहुत ही कम है कि लोहे का कोई विशाल ठोस खंड चुंबकीय उत्तरी ध्रुव से चुंबकीय दक्षिणी ध्रुव तक फैला हो। पृथ्वी का क्रोड बहुत गर्म तथा पिघली हुई अवस्था में है तथा लोहे एवं निकिल के आयन पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र के लिए उत्तरदायी हैं। यह परिकल्पना संभावित जान पड़ती है। चंद्रमा जिसमें कोई द्रवीभूत क्रोड नहीं है, इसका कोई चुंबकीय क्षेत्र भी नहीं है। शुक्र ग्रह जिसकी घूर्णन गति अत्यंत मंद है इसका चुंबकीय क्षेत्र भी बहुत क्षीण है, जबकि बृहस्पति, जिसकी घूर्णन गति ग्रहों में सर्वाधिक है, इसका चुंबकीय क्षेत्र भी पर्याप्त शक्तिशाली है। किंतु, इन परिवाही धाराओं की उत्पत्ति के सही कारण और उनको बनाए रखने के लिए आवश्यक ऊर्जा आदि को बहुत अच्छी तरह से समझा नहीं जा सका है। ये ऐसे प्रश्न हैं जो सतत शोध के लिए एक महत्वपूर्ण क्षेत्र प्रदान करते हैं।

स्थान परिवर्तन के साथ पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र में होने वाले परिवर्तन भी अध्ययन का रोचक विषय है। सूर्य से उत्सर्जित होने वाले आवेशित कण एक प्रवाह के रूप में पृथ्वी की ओर आते हैं जिसे सौर पवन कहा जाता है। इन कणों की गति पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र से प्रभावित होती है और ये स्वयं पृथ्वी की चुंबकीय क्षेत्र व्यवस्था में बदलाव ला देते हैं। ध्रुवों के निकट पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र की संरचना अन्य भागों से बिलकुल अलग होती है।

समय के साथ पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र में होने वाले परिवर्तन भी कोई कम लुभावने नहीं हैं। इनमें अल्पकालिक परिवर्तन भी शामिल हैं जो शताब्दियों में नजर आने लगते हैं और दीर्घकालीन परिवर्तन भी जो लाखों वर्षों के दीर्घकाल में दृष्टिगत होते हैं। ज्ञात स्रोतों के अनुसार, 1580 ई. से 1820 ई. के बीच के 240 वर्षों के समय काल में लंदन में चुंबकीय दिक्पात के मान में 3.5° का अंतर रिकार्ड किया गया, जिससे यह संकेत मिलता है कि पृथ्वी का चुंबकीय क्षेत्र समय के साथ परिवर्तित होता है। यह पाया गया है कि 10 लाख वर्षों में पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र की दिशा उलट जाती है। असिताश्म (Basalt) में लोहा होता है और असिताश्म ज्वालामुखी विस्फोट में बाहर निकलता है। जब यह ठंडा होकर ठोस में बदलता है तो इसके अंदर के छोटे-छोटे लौह-चुंबक चुंबकीय क्षेत्र की दिशा के समांतर समरेखित हो जाते हैं। ऐसे चुंबकीय क्षेत्रों से युक्त असिताश्म भंडारों के भूवैज्ञानिक अध्ययनों से इस बात के प्रमाण मिले हैं कि पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र की दिशा अतीत में कई बार उलट चुकी है।

5.5 चुंबकीकरण एवं चुंबकीय तीव्रता

पृथ्वी तत्वों एवं यौगिकों की विस्मयकारी विभिन्नताओं से भरपूर है। इसके अतिरिक्त, हम नए-नए मिश्रधातु, यौगिक, यहाँ तक कि तत्व भी संश्लेषित करते जा रहे हैं। आप इन सब पदार्थों को चुंबकीय गुणों के आधार पर वर्गीकृत करना चाहेंगे। प्रस्तुत अनुभाग में हम ऐसे कुछ पदों की परिभाषा देंगे और उनके बारे में समझाएँगे जो इस वर्गीकरण में हमारी सहायता करेंगे।

हम यह देख चुके हैं कि परमाणु में परिक्रमण करते इलेक्ट्रॉन का एक चुंबकीय आघूर्ण होता है। पदार्थ के किसी बड़े टुकड़े में ये चुंबकीय आघूर्ण सदिश रूप से समाकलित होकर शून्येतर परिणामी चुंबकीय आघूर्ण प्रदान कर सकते हैं। किसी दिए गए नमूने का *चुंबकन* **M** हम इस प्रकार उत्पन्न हुए प्रति इकाई आयतन परिणामी चुंबकीय आघूर्ण के रूप में परिभाषित कर सकते हैं,

$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{m}_{\text{नेट}}}{V} \qquad (5.11)$$

M एक सदिश राशि है जिसका विमीय सूत्र $L^{-1} A$ एवं मात्रक $A\ m^{-1}$ है।

एक लंबी परिनालिका लीजिए जिसकी प्रति इकाई लंबाई में n फेरे हों, और जिसमें I धारा प्रवाहित हो रही हो। इस परिनालिका के अंदर चुंबकीय क्षेत्र का परिमाण है,

© NCERT not to be republished

$$\mathbf{B}_0 = \mu_0 nI \tag{5.12}$$

यदि परिनालिका के अंदर शून्येतर चुंबकन का कोई पदार्थ भरा हो तो यहाँ क्षेत्र $\mathbf{B}_0$ से अधिक होगा। परिनालिका के अंदर परिणामी क्षेत्र $\mathbf{B}$ को लिख सकते हैं

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_m \tag{5.13}$$

जहाँ $\mathbf{B}_m$ क्रोड के पदार्थ द्वारा प्रदत्त क्षेत्र है। यह पाया गया है कि यह अतिरिक्त क्षेत्र $\mathbf{B}_m$ पदार्थ के चुंबकन $\mathbf{M}$ के अनुक्रमानुपाती होता है और इसको हम निम्नवत व्यक्त कर सकते हैं

$$\mathbf{B}_m = \mu_0 \mathbf{M} \tag{5.14}$$

जहाँ μ_0 वही नियंताक है (निर्वात की पारगम्यता) जो बायो-सावर्ट के नियम में उपयोग किया गया था।

सुविधा के लिए हम एक अन्य सदिश क्षेत्र $\mathbf{H}$ की बात करते हैं जिसे *चुंबकीय तीव्रता* कहा जाता है और जिसको निम्नलिखित समीकरण द्वारा परिभाषित किया जाता है

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M} \tag{5.15}$$

जहाँ $\mathbf{H}$ की विमाएँ वहीं हैं जो $\mathbf{M}$ की और इसका मात्रक भी $\mathrm{A\,m^{-1}}$ ही है।

इस प्रकार कुल चुंबकीय क्षेत्र $\mathbf{B}$ को लिख सकते हैं

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \tag{5.16}$$

उपरोक्त विवरण में आए पदों को व्युत्पन्न करने में हमने जिस पद्धति का प्रयोग किया है उसको दोहराते हैं। परिनालिका के अंदर के कुल चुंबकीय क्षेत्र को हमने दो अलग-अलग योगदानों के रूप में प्रस्तुत किया– *पहला* बाह्य कारक, जैसे कि परिनालिका में प्रवाहित होने वाली धारा का योगदान। यह $\mathbf{H}$ द्वारा व्यक्त किया गया है; और *दूसरा* चुंबकीय पदार्थ की विशेष प्रकृति के कारण अर्थात $\mathbf{M}$। बाद वाली राशि ($\mathbf{M}$) बाह्य कारकों द्वारा प्रभावित की जा सकती है। यह प्रभाव गणितीय रूप में इस प्रकार व्यक्त कर सकते हैं:

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H} \tag{5.17}$$

जहाँ χ एक विमाविहीन राशि है और इसे *चुंबकीय प्रवृत्ति* कहते हैं। यह किसी चुंबकीय पदार्थ पर बाह्य चुंबकीय क्षेत्र के प्रभाव का माप है। सारणी 5.2 में कुछ तत्वों की चुंबकीय प्रवृत्ति को सूचीबद्ध किया गया है। हम देखते हैं कि χ बहुत छोटे परिमाण वाली राशि है। कुछ पदार्थों के लिए इसका मान छोटा और धनात्मक है जिन्हें *अनुचुंबकीय* पदार्थ कहते हैं। कुछ पदार्थों के लिए इसका मान छोटा एवं ऋणात्मक है जिन्हें *प्रतिचुंबकीय* पदार्थ कहते हैं। प्रतिचुंबकीय पदार्थों में $\mathbf{M}$ एवं $\mathbf{H}$ विपरीत दिशाओं में होते हैं। समीकरण (5.16) एवं (5.17) से हम पाते हैं,

$$\mathbf{B} = \mu_0(1 + \chi)\mathbf{H} \tag{5.18}$$

$$= \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$$

$$= \mu \mathbf{H} \tag{5.19}$$

जहाँ, $\mu_r = (1 + \chi)$ एक विमाविहीन राशि है जिसे हम पदार्थ की *आपेक्षिक चुंबकशीलता* या 'आपेक्ष चुंबकीय पारगम्यता' कहते हैं। यह स्थिरवैद्युतिकी के परावैद्युतांक के समतुल्य राशि है। पदार्थ की *चुंबकशीलता* μ है और इसकी विमाएँ तथा मात्रक वही हैं जो μ_0 के हैं।

$$\mu = \mu_0 \mu_r = \mu_0 (1+\chi)$$

χ, μ_r एवं μ में तीन राशियाँ परस्पर संबंधित हैं। यदि इनमें से किसी एक का मान ज्ञात हो तो बाकी दोनों के मान ज्ञात किए जा सकते हैं।

© NCERT not to be republished

सारणी 5.2 300 K पर कुछ तत्वों की चुंबकीय प्रवृत्ति

प्रतिचुंबकीय पदार्थ	χ	अनुचुंबकीय पदार्थ	χ
बिस्मथ	-1.66×10^{-5}	ऐलुमिनियम	2.3×10^{-5}
ताँबा	-9.8×10^{-6}	कैल्शियम	1.9×10^{-5}
हीरा	-2.2×10^{-5}	क्रोमियम	2.7×10^{-4}
सोना	-3.6×10^{-5}	लिथियम	2.1×10^{-5}
सीसा	-1.7×10^{-5}	मैग्नीशियम	1.2×10^{-5}
पारा	-2.9×10^{-5}	नियोबियम	2.6×10^{-5}
नाइट्रोजन (STP)	-5.0×10^{-9}	ऑक्सीजन (STP)	2.1×10^{-6}
चाँदी	-2.6×10^{-5}	प्लैटिनम	2.9×10^{-4}
सिलिकन	-4.2×10^{-6}	टंगस्टन	6.8×10^{-5}

उदाहरण 5.10 एक परिनालिका के क्रोड में भरे पदार्थ की आपेक्षिक चुंबकशीलता 400 है। परिनालिका के विद्युतीय रूप से पृथक्कृत फेरों में 2A की धारा प्रवाहित हो रही है। यदि इसकी प्रति 1m लंबाई में फेरों की संख्या 1000 है तो (a) H, (b) M, (c) B एवं (d) चुंबककारी धारा I_m की गणना कीजिए।

हल

(a) क्षेत्र H क्रोड के पदार्थ पर निर्भर करता है और इसके लिए सूत्र है

$H = nI = 1000 \times 2.0 = 2 \times 10^3$ A/m

(b) चुंबकीय क्षेत्र B के लिए सूत्र है

$B = \mu_r \mu_0 H$

$= 400 \times 4\pi \times 10^{-7}$ (N/A^2) $\times 2 \times 10^3$ (A/m)

$= 1.0$ T

(c) चुंबकन

$M = (B - \mu_0 H)/\mu_0$

$= (\mu_r \mu_0 H - \mu_0 H)/\mu_0 = (\mu_r - 1)H = 399 \times H$

$\cong 8 \times 10^5$ A/m

(d) चुंबकन धारा I_M वह अतिरिक्त धारा है जो क्रोड की अनुपस्थिति में परिनालिका के फेरों में प्रवाहित किए जाने पर इसके अंदर उतना ही क्षेत्र B उत्पन्न करेगी जितना क्रोड की उपस्थिति में होता। अत: $B = \mu_r n (I + I_M)$ लेने पर $I = 2$ A, $B = 1$ T हमें प्राप्त होता है

$I_M = 794$ A

उदाहरण 5.10

5.6 पदार्थों के चुंबकीय गुण

पिछले अनुभाग में वर्णित विचार हमें पदार्थों को प्रतिचुंबकीय, अनुचुंबकीय एवं लोहचुंबकीय श्रेणियों में वर्गीकृत करने में सहायता प्रदान करते हैं। चुंबकीय प्रवृत्ति χ की दृष्टि से देखें तो कोई पदार्थ प्रतिचुंबकीय है यदि इसके लिए χ ऋणात्मक है, अनुचुंबकीय होगा यदि χ धनात्मक एवं अल्प मान वाला है, और लोहचुंबकीय होगा यदि χ धनात्मक एवं अधिक मान वाला है।

अधिक मूर्त रूप में सारणी 5.3 पर एक दृष्टि हमें इन पदार्थों का एक अच्छा अनुभव प्रदान करती है। यहाँ ε एक छोटी धन संख्या है जो अनुचुंबकत्व का परिमाण निर्धारित करने के लिए लाई गई है। अब हम इन पदार्थों के बारे में कुछ विस्तार से चर्चा करेंगे।

© NCERT not to be republished

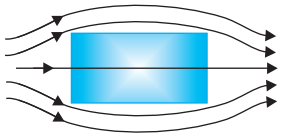
सारणी 5.3

प्रतिचुंबकीय	अनुचुंबकीय	लोहचुंबकीय
$-1 \le \chi < 0$	$0 < \chi < \varepsilon$	$\chi >> 1$
$0 \le \mu_r < 1$	$1 < \mu_r < 1+\varepsilon$	$\mu_r >> 1$
$\mu < \mu_0$	$\mu > \mu_0$	$\mu >> \mu_0$

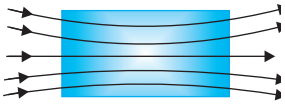
5.6.1 प्रतिचुंबकत्व

प्रतिचुंबकीय पदार्थ वह होते हैं जिनमें बाह्य चुंबकीय क्षेत्र में अधिक तीव्रता वाले भाग से कम तीव्रता वाले भाग की ओर जाने की प्रवृत्ति होती है। दूसरे शब्दों में कहें तो चुंबक लोहे जैसी धातुओं को तो अपनी ओर आकर्षित करता है, परंतु यह प्रतिचुंबकीय पदार्थों को विकर्षित करेगा।

चित्र 5.12 (a), बाह्य चुंबकीय क्षेत्र में रखी प्रतिचुंबकीय पदार्थ की एक छड़ दर्शाता है। क्षेत्र रेखाएँ विकर्षित होती हैं या दूर हटती हैं इसलिए पदार्थ के अन्दर क्षेत्र कम हो जाता है सारणी 5.2 से यह स्पष्ट है कि अधिकांश मामलों में क्षेत्र की तीव्रता में यह कमी अत्यल्प होती है (10^5 भागों में एक भाग)। छड़ को किसी असमान चुंबकीय क्षेत्र में रखने पर इसकी प्रवृत्ति अधिक क्षेत्र से कम क्षेत्र की ओर जाने की होती है।



(a)



(b)

चित्र 5.12
एक (a) प्रतिचुंबकीय (b) अनुचुंबकीय पदार्थ के निकट किसी बाह्य चुंबकीय क्षेत्र के कारण चुंबकीय क्षेत्र रेखाओं का व्यवहार।

प्रतिचुंबकत्व की सरलतम व्याख्या इस प्रकार है–नाभिक के चारों ओर घूमते इलेक्ट्रॉनों के कारण कक्षीय कोणीय संवेग होता है। ये प्रक्रमण करते इलेक्ट्रॉन एक धारावाही लूप के समतुल्य होते हैं और इस कारण इनका कक्षीय चुंबकीय आघूर्ण होता है, प्रतिचुंबकीय पदार्थ वे होते हैं जिनके परमाणु में परिणामी चुंबकीय आघूर्ण शून्य होता है। जब कोई बाह्य चुंबकीय क्षेत्र आरोपित किया जाता है तो जिन इलेक्ट्रॉनों के कक्षीय चुंबकीय आघूर्ण क्षेत्र की दिशा में होते हैं उनकी गति मंद हो जाती है और जिनके चुंबकीय आघूर्ण क्षेत्र के विपरीत दिशा में होते हैं उनकी गति बढ़ जाती है। ऐसा लेंज के नियम के अनुसार प्रेरित धारा के कारण होता है जिसके विषय में आप अध्याय 6 में अध्ययन करेंगे। इस प्रकार पदार्थ में परिणामी चुंबकीय आघूर्ण आरोपित क्षेत्र के विपरीत दिशा में विकसित होता है और इस कारण यह प्रतिकर्षित होता है।

कुछ प्रतिचुंबकीय पदार्थ हैं– बिस्मथ, ताँबा, सीसा, सिलिकन, नाइट्रोजन (STP पर), पानी एवं सोडियम क्लोराइड। प्रति चुंबकत्व सभी पदार्थों में विद्यमान होता है। परंतु, अधिकांश पदार्थों के लिए यह इतना क्षीण होता है कि अनुचुंबकत्व एवं लौह चुंबकत्व जैसे प्रभाव इस पर हावी हो जाते हैं।

सबसे अधिक असामान्य प्रतिचुंबकीय पदार्थ हैं *अति चालक।* ये ऐसी धातुएँ हैं, जिनको यदि बहुत निम्न ताप तक ठंडा कर दिया जाता है तो ये पूर्ण चालकता एवं पूर्ण प्रतिचुंबकत्व दोनों प्रदर्शित करती हैं। चुंबकीय क्षेत्र रेखाएँ पूर्णत: इनके बाहर रहती हैं, $\chi = -1$ एवं $\mu_r = 0$। एक अतिचालक, एक चुंबक को प्रतिकर्षित करेगा और (न्यूटन के तृतीय नियमानुसार) स्वयं इसके द्वारा प्रतिकर्षित होगा। अतिचालकों में पूर्ण प्रतिचुंबकत्व की यह परिघटना इसके आविष्कारक के नाम पर *माइस्नर प्रभाव* कहलाती है। अनेक भिन्न परिस्थितियों में जैसे कि, चुंबकीकृत अधरगामी अति तीव्र रेलगाड़ियों को चलाने में अतिचालक चुंबकों का लाभ उठाया जा सकता है।

5.6.2 अनुचुंबकत्व

अनुचुंबकीय पदार्थ ऐसे पदार्थ होते हैं जो बाह्य चुंबकीय क्षेत्र में रखे जाने पर क्षीण चुंबकत्व प्राप्त कर लेते हैं। उनमें क्षीण चुंबकीय क्षेत्र से सशक्त चुंबकीय क्षेत्र की ओर जाने की प्रवृत्ति होती है अर्थात ये चुंबक की ओर क्षीण बल द्वारा आकर्षित होते हैं।

© NCERT not to be republished

किसी अनुचुंबकीय पदार्थ के परमाणुओं (या आयनों या अणुओं) का अपना स्वयं का स्थायी चुंबकीय द्विध्रुव आघूर्ण होता है। परमाणुओं की सतत यादृच्छिक तापीय गति के कारण कोई परिणामी चुंबकीकरण दृष्टिगत नहीं होता। पर्याप्त शक्तिशाली बाह्य चुंबकीय क्षेत्र $\mathbf{B}_0$ की उपस्थिति में एवं निम्न तापों पर अलग-अलग परमाणुओं के द्विध्रुव आघूर्ण सरल रेखाओं में और $\mathbf{B}_0$ की दिशा के अनुदिश संरेखित किए जा सकते हैं। चित्र 5.12 (b) बाह्य चुंबकीय क्षेत्र में रखी हुई अनुचुंबकीय पदार्थ की एक छड़ प्रदर्शित करता है। चुंबकीय क्षेत्र रेखाएँ पदार्थ के अंदर संकेंद्रित हो जाती हैं और अंदर चुंबकीय क्षेत्र बढ़ जाता है। अधिकतर मामलों में, जैसा सारणी 5.2 से प्रकट है कि यह वृद्धि अति न्यून है, 10^5 भागों में एक भाग। असमान चुंबकीय क्षेत्र में रखने पर यह छड़ निम्न क्षेत्र से उच्च क्षेत्र की ओर चलने की चेष्टा करेगी।

भौतिकी

कुछ अनुचुंबकीय पदार्थ हैं–ऐलुमिनियम, सोडियम, कैल्शियम, ऑक्सीजन (STP पर) एवं कॉपर क्लोराइड। प्रयोगात्मक रूप से किसी अनुचुंबकीय पदार्थ का चुंबकन लगाए गए चुंबकीय क्षेत्र के अनुक्रमानुपाती एवं परम ताप T के व्युत्क्रमानुपाती होता है।

$$M = C\frac{B_0}{T} \qquad [5.20(a)]$$

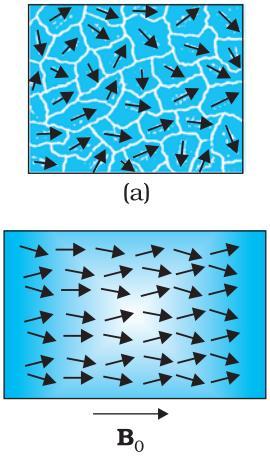
या दूसरे समतुल्य रूप में, समीकरण (5.12) एवं (5.17) के प्रयोग से

$$\chi = C\frac{\mu_0}{T} \qquad [5.20(b)]$$

यह इसके शोधकर्ता पियरे क्यूरी (1859-1906) के सम्मान में *क्यूरी का नियम* कहलाता है। नियतांक C को *क्यूरी नियतांक* कहते हैं। अत: किसी अनुचुंबकीय पदार्थ के लिए χ एवं μ_r दोनों का मान न केवल पदार्थ पर निर्भर करता है, वरन् (एक सरल रूप में) इसके ताप पर भी निर्भर करता है। बहुत उच्च चुंबकीय क्षेत्रों में या बहुत निम्न ताप पर, चुंबकन अपना अधिकतम मान ग्रहण करने लगता है, जबकि सभी परमाण्वीय द्विध्रुव आघूर्ण चुंबकीय क्षेत्र में रेखाओं के अनुदिश संरेखित हो जाते हैं। यह संतृप्त चुंबकन मान M_s कहलाता है। इसके परे, क्यूरी का नियम [समीकरण (5.20)] मान्य नहीं रह जाता है।

5.6.3 लौह चुंबकत्व

लौह चुंबकीय पदार्थ ऐसे पदार्थ होते हैं जो बाह्य चुंबकीय क्षेत्र में रखे जाने पर शक्तिशाली चुंबक बन जाते हैं। उनमें चुंबकीय क्षेत्र के क्षीण भाग शक्तिशाली भाग की ओर चलने की तीव्र प्रवृत्ति होती है अर्थात वे चुंबक की ओर भारी आकर्षण बल का अनुभव करते हैं। किसी लौह चुंबकीय पदार्थ के एकल परमाणुओं (या आयनों या अणुओं) का भी अनुचुंबकीय पदार्थों की तरह ही चुंबकीय द्विध्रुव आघूर्ण होता है। परंतु, वे एक-दूसरे के साथ इस प्रकार अन्योन्य क्रिया करते हैं कि एक स्थूल आयतन में (जिसे डोमेन कहते हैं) सब एक साथ एक दिशा में संरेखित हो जाते हैं। इस सहकारी प्रभाव की व्याख्या के लिए क्वांटम यांत्रिकी की आवश्यकता होती है, जो इस पाठ्यपुस्तक के क्षेत्र से बाहर है। प्रत्येक डोमेन का अपना परिणामी चुंबकन होता है। प्रारूपी डोमेन का आकार 1 mm है, और एक डोमेन में लगभग 10^{11} परमाणु होते हैं। प्रथमदृष्टया चुंबकन एक डोमेन से दूसरे डोमेन तक जाने पर यादृच्छिक रूप से बदलता है तथा कुल पदार्थ में कोई चुंबकन नहीं होता। यह चित्र 5.13 (a) में दिखाया गया है। जब हम बाह्य चुंबकीय क्षेत्र $\mathbf{B}_0$ लगाते हैं, तो डोमेन $\mathbf{B}_0$ के अनुदिश उन्मुख होने लगते हैं और साथ ही वे डोमेन जो $\mathbf{B}_0$ की दिशा में हैं, साइज़ में बढ़ने लगते हैं। डोमेनों का अस्तित्व और $\mathbf{B}_0$ के अनुदिश उनके होने वाली गति केवल अनुमान नहीं है। लौह चुंबकीय पदार्थ के पाउडर को किसी द्रव में छिड़क कर उसके निलंबन



चित्र 5.13
(a) यादृच्छिक अभिविन्यासित डोमेन, (b) संरेखित डोमेन।

© NCERT not to be republished

को सूक्ष्मदर्शी के द्वारा उसकी यादृच्छिक गति को देखा जा सकता है। चित्र 5.12 (b) वह स्थिति दर्शाता है जब सभी डोमेन पंक्तिबद्ध हो गए हैं और उन्होंने घुल-मिलकर एक अकेला विशाल डोमेन बना लिया है।

इस प्रकार एक लौह चुंबकीय पदार्थ में चुंबकीय क्षेत्र रेखाएँ बहुत अधिक संकेंद्रित हो जाती हैं। एक असमान चुंबकीय क्षेत्र में इस पदार्थ का नमूना अधिक शक्तिशाली चुंबकीय क्षेत्र वाले भाग की ओर चलने को प्रवृत्त होता है। हम यह सोच सकते हैं कि बाह्य क्षेत्र हटा लेने पर क्या होगा? कुछ चुंबकीय पदार्थों में चुंबकन बना रह जाता है। ऐसे पदार्थों को कठोर चुंबकीय पदार्थ या कठोर लौह चुंबक कहा जाता है। एलनिको (लोहे, ऐलुमिनियम, निकल, कोबाल्ट एवं ताँबे का एक मिश्रातु) ऐसा ही एक पदार्थ है और प्राकृतिक रूप में उपलब्ध लोडस्टोन दूसरा। इन पदार्थों से स्थायी चुंबक बनते हैं और इनका उपयोग चुंबकीय सुई बनाने के अलावा अन्य कार्यों में भी होता है। दूसरी ओर लौह चुंबकीय पदार्थों की एक श्रेणी ऐसी है जिनका चुंबकन बाह्य क्षेत्र को हटाते ही खत्म हो जाता है। नर्म लोहा ऐसा ही एक पदार्थ है। उचित रूप से ही, ऐसे पदार्थों को *नर्म लौह चुंबकीय पदार्थ* कहा जाता है। बहुत से तत्व लौह चुंबकीय हैं; जैसे–लोहा, कोबाल्ट, निकल, गैडोलिनियम आदि। इनकी आपेक्षिक चुंबकशीलता 1000 से अधिक है।

लौह चुंबकीय गुण भी ताप पर निर्भर करता है। पर्याप्त उच्च ताप पर एक लौह चुंबक, अनुचुंबक बन जाता है। ताप बढ़ने पर डोमेन संरचनाएँ विघटित होने लगती हैं। ताप बढ़ने पर चुंबकन का विलोपन धीरे-धीरे होता है। यह एक तरह का प्रावस्था (Phase) परिवर्तन है वैसे ही जैसे किसी ठोस मणिभ (क्रिस्टल) का पिघलना। वह ताप जिस पर कोई लौह चुंबक, अनुचुंबक में परिवर्तित हो जाता है *क्यूरी ताप* (T_c) कहलाता है। सारणी 5.4 कुछ लौह चुंबकों के क्यूरी ताप दर्शाती है।

क्यूरी ताप से उच्चतर ताप पर अर्थात अनुचुंबकीय प्रावस्था में चुंबकीय प्रवृत्ति,

$$\chi = \frac{C}{T - T_c} \quad (T > T_c) \tag{5.21}$$

सारणी 5.4 कुछ लौह चुंबकीय पदार्थों के क्यूरी ताप T_c

पदार्थ का नाम	T_c (K)
कोबाल्ट	1394
लोहा	1043
Fe_2O_3	893
निकल	631
गैडोलिनियम	317

उदाहरण 5.11

उदाहरण 5.11 लौह चुंबकीय पदार्थ लोहे में कोई डोमेन 10^{-4}m भुजा वाले घन के रूप में है। डोमेन में लौह परमाणुओं की संख्या, अधिकतम संभावित चुंबकीय द्विध्रुव आघूर्ण और इसके चुंबकन का मान ज्ञात कीजिए। लोहे का परमाण्विक द्रव्यमान 55 g/mole और इसका घनत्व 7.9 g/cm^3 है। यह मान लीजिए कि प्रत्येक लौह परमाणु का चुंबकीय द्विध्रुव आघूर्ण 9.27×10^{-24} A m^2 है।

© NCERT not to be republished

उदाहरण 5.11

हल घनीय डोमेन का आयतन होगा

$V = (10^{-6}\ \text{m})^3 = 10^{-18}\ \text{m}^3 = 10^{-12}\ \text{cm}^3$

इसका द्रव्यमान = आयतन × घनत्व = $7.9\ \text{g cm}^{-3} \times 10^{-12}\ \text{cm}^3 = 7.9 \times 10^{-12}\ \text{g}$

यह दिया गया है कि एक एवोगाद्रो संख्या (6.023×10^{23}) के बराबर लौह परमाणुओं का द्रव्यमान 55 g है। अत: डोमेन में परमाणुओं की संख्या,

$$N = \frac{7.9\times10^{-12}\times6.023\times10^{23}}{55}$$

$= 8.65 \times 10^{10}$ परमाणु

अधिकतम संभावित चुंबकीय द्विध्रुव आघूर्ण $m_{\text{अधिकतम}}$ तब प्राप्त होता है (यद्यपि यह एक अवास्तविक स्थिति है), जब सभी परमाण्विक आघूर्ण पूर्णत: पंक्तिबद्ध हो जाते हैं। अत:

$m_{\text{अधिकतम}} = (8.65 \times 10^{10}) \times (9.27 \times 10^{-24})$

$= 8.0 \times 10^{-13}\ \text{A m}^2$

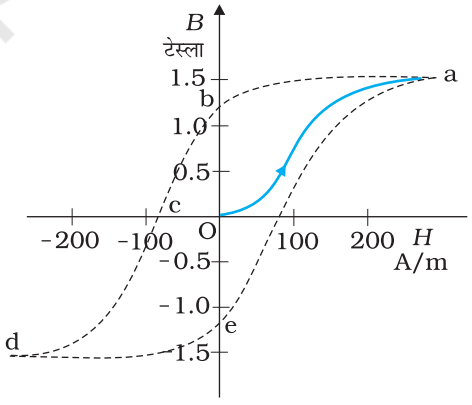
परिणामी चुंबकन का मान

$M_{\text{अधिकतम}} = m_{\text{अधिकतम}}/\text{डोमेन आयतन}$

$= 8.0 \times 10^{-13}\ \text{A m}^2/10^{-18}\ \text{m}^3$

$= 8.0 \times 10^{5}\ \text{A m}^{-1}$

लौह-चुंबकीय पदार्थों में **B** एवं **H** का संबंध बहुत जटिल है। प्राय: यह रैखिक संबंध नहीं होता एवं नमूने के चुंबकीय अतीत पर निर्भर करता है। चित्र 5.14 चुंबकन के एक चक्र में पदार्थ का व्यवहार चित्रित करता है। माना कि पदार्थ शुरू में बिलकुल विचुंबकित है। हम इसको परिनालिका में रखते हैं और परिनालिका में धारा का मान बढ़ाते हैं। पदार्थ में चुंबकीय क्षेत्र B का मान बढ़ता है और अंत में संतृप्त हो जाता है जैसा कि वक्र Oa में चित्रित है। यह व्यवहार दर्शाता है कि डोमेन तब तक पंक्तिबद्ध और एक-दूसरे में विलीन होते रहते हैं जब तक कि आगे वृद्धि असंभव न हो जाए। इससे आगे धारा (और इस कारण चुंबकीय तीव्रता H) को बढ़ाने का कोई उपयोग नहीं है। फिर, हम H को घटाते हुए शून्य पर ले आते हैं। $H = 0$ पर $B \neq 0$ है। यह वक्र ab द्वारा प्रदर्शित है। $H = 0$ पर B का मान पदार्थ की *चुंबकीय धारणशीलता* या *चुंबकत्वावशेष* कहलाता है। चित्र 5.14 में $B_R \sim 1.2$ T है, यहाँ निम्नष्ठ R धारणशीलता को इंगित करता है। बाह्य चुंबकनकारी क्षेत्र हटा लेने पर भी डोमेन पूर्णत: बेतरतीब विन्यास ग्रहण नहीं कर पाते। अब, परिनालिका में धारा की दिशा उलट देते हैं और धीरे-धीरे इसका मान बढ़ाते हैं। फलस्वरूप कुछ डोमेन पलटकर अपना विन्यास बदल लेते हैं, जब तक कि अंदर परिणामी क्षेत्र शून्य न हो जाए। यह वक्र bc द्वारा दर्शाया गया है। c बिंदु पर H का मान, पदार्थ की *निग्राहिता* कहलाती है। चित्र 5.14 में, $H_c \sim -90\ \text{A m}^{-1}$। प्रतिलोम धारा का परिमाण बढ़ाते जाने पर हम एक बार फिर संतृप्तता की स्थिति प्राप्त कर लेते हैं। वक्र cd यही दर्शाता है। संतृप्त चुंबकीय क्षेत्र $B_s \sim 1.5$ T है। एक बार फिर, धारा को कम किया जाता है (वक्र de) और फिर उलट दिया जाता है (वक्र ea)। यह चक्र दोहराया जाता रहता है। इस विषय में हम निम्नलिखित प्रेक्षण लेते हैं: (i) जब H को कम किया जाता है, तो वक्र Oa पुन: अनुरेखित नहीं होता। H के दिए गए मान के लिए, B का कोई अद्वितीय मान लब्ध नहीं होता, बल्कि यह नमूने के पूर्व इतिहास पर निर्भर करता है। यह परिघटना चुंबकीय शैथिल्य (Hysterisis) कहलाती है। शब्द *हिस्टेरिसिस* का अर्थ *चुंबकीय पश्चता* है ('इतिहास' नहीं)।



चित्र 5.14 चुंबकीय शैथिल्य पाश लौह-चुंबकीय पदार्थों के लिए B-H वक्र है।

5.7 स्थायी चुंबक एवं विद्युत चुंबक

वह पदार्थ जो कमरे के ताप पर अपने लौह-चुंबकीय गुण दीर्घ काल के लिए बनाए रख सकते हैं, *स्थायी चुंबक* कहलाते हैं। स्थायी चुंबक विभिन्न तरीकों से बनाए जा सकते हैं। लोहे की एक

2022-23



चित्र 5.15 एक लोहार, उत्तर-दक्षिण दिशा में रखी एक लाल गर्म लोहे की छड़ को हथौड़े से पीट कर चुंबक में बदलते हुए। यह आरेख सन 1600 में प्रकाशित, डॉ. विलियम गिल्बर्ट (जो इंग्लैंड की महारानी एलिजाबेथ के शाही चिकित्सक थे) की पुस्तक, डे मैग्नेटे (De Magnete) से है।

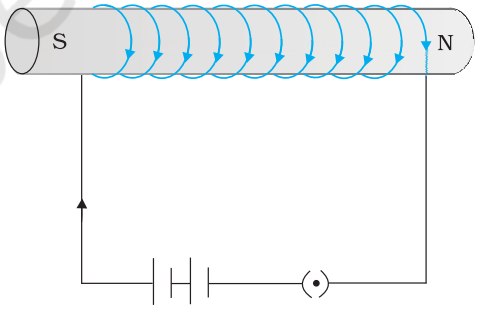
छड़ को उत्तर-दक्षिण दिशा में रख कर बार-बार इस पर हथौड़े से प्रहार करते हैं तो वह चुंबक बन जाती है। यह विधि चित्र 5.15 में दर्शायी गई है। यह चित्र एक 400 साल पुरानी पुस्तक से यह दर्शाने के लिए लिया गया है कि स्थायी चुंबक बनाने की कला काफी पुरानी है। स्थायी चुंबक बनाने के लिए एक स्टील की छड़ को पकड़ कर उसके ऊपर किसी छड़ चुंबक का एक सिरा एक ओर से दूसरी ओर स्पर्श कराते हुए बार-बार ले जाते हैं।

स्थायी चुंबक बनाने का एक प्रभावी तरीका यह है कि किसी परिनालिका के अंदर एक लौह चुंबकीय पदार्थ की छड़ रखी जाए और उस परिनालिका में नियत दिष्ट धारा प्रवाहित की जाए। परिनालिका का चुंबकीय क्षेत्र छड़ को चुंबकित कर देता है।

चुंबकीय शैथिल्य वक्र (चित्र 5.14) हमें स्थायी चुंबकों के लिए उचित पदार्थ चुनने में सहायता करते हैं। शक्तिशाली चुंबक बनाने के लिए पदार्थ की उच्च चुंबकीय धारणशीलता और उच्च निग्राहिता होनी चाहिए ताकि इधर-उधर के चुंबकीय क्षेत्रों या तापीय उतार-चढ़ावों या क्षुद्र यांत्रिक हानियों के कारण इसका चुंबकत्व आसानी से खत्म न हो जाए।

इसके अलावा पदार्थ की उच्च चुंबकशीलता होनी चाहिए। स्टील ऐसा ही एक पदार्थ है। इसकी धारणशीलता नर्म लोहे से कुछ कम है पर नर्म लोहे की निग्राहिता इतनी कम है कि सब गुणों को सोचें तो स्थायी चुंबक बनाने के लिए स्टील नर्म लोहे से बेहतर है। स्थायी चुंबकों के लिए उपयुक्त अन्य पदार्थों के नाम हैं–ऐलनिको (लोहे, एलुमिनियम, निकल, कोबाल्ट एवं ताँबे का एक मिश्रातु), कोबाल्ट-स्टील एवं टिकोनल।

विद्युत चुंबक ऐसे लौह चुंबकीय पदार्थों के बने होते हैं जिनकी चुंबकशीलता बहुत अधिक एवं धारणशीलता बहुत कम होती है। नर्म लोहा विद्युत चुंबकों के लिए एक उपयुक्त पदार्थ है। किसी परिनालिका के अंदर नर्म लोहे की छड़ रख कर हम उसमें नियत दिष्ट धारा प्रवाहित करते हैं, तो परिनालिका का चुंबकीय क्षेत्र हज़ार गुना बढ़ जाता है। जब हम परिनालिका में धारा प्रवाहित करना बंद कर देते हैं तो चुंबकीय क्षेत्र भी वस्तुतः समाप्त हो जाता है क्योंकि नर्म लोहे वाले क्रोड की चुंबकीय धारणशीलता बहुत कम है। यह व्यवस्था चित्र 5,16 में दर्शायी गई है।



चित्र 5.16 एक नर्म लौह-क्रोड युक्त परिनालिका विद्युत चुंबक की तरह व्यवहार करती है।

कुछ अनुप्रयोगों में पदार्थ एक लंबे समय तक चुंबकन के प्रत्यावर्ती चक्र से गुजरता है। ट्रांसफॉर्मर के क्रोड एवं टेलीफोन के डायफ्राम में ऐसा ही होता है। इनमें प्रयुक्त पदार्थों के चुंबकीय शैथिल्य वक्र संकीर्ण होने चाहिए। परिणामस्वरूप इनमें ऊष्मा क्षय एवं ताप वृद्धि कम होगी। इन पदार्थों की प्रतिरोधकता भी कम होनी चाहिए ताकि भँवर धाराओं के कारण ऊर्जा क्षय में कमी रहे। भँवर धाराओं के विषय में हम अध्याय 6 में अध्ययन करेंगे।

विद्युत चुंबकों का अनुप्रयोग विद्युत घंटियों, ध्वनि विस्तारक एवं दूरभाष यंत्रों में होता है। विशालकाय विद्युत चुंबकों का क्रेनों में मशीनों या लोहे एवं स्टील की भारी वस्तुओं को उठाने के लिए इस्तेमाल किया जाता है।

© NCERT not to be republished

भारत के चुंबकीय क्षेत्र का मानचित्रण

अन्वेषण, संचार एवं नाविकी में व्यावहारिक अनुप्रयोगों के कारण दुनिया के अधिकतर देशों ने पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र के ऐसे नक्शे बनाए हैं जिनकी परिशुद्धता भौगोलिक नक्शों के साथ तुलनीय है। भारत में, दक्षिण में त्रिवेंद्रम से उत्तर में गुलमर्ग तक एक दर्जन से अधिक वेधशालाएँ हैं। ये वेधशालाएँ मुंबई के कोलाबा में स्थित, भारतीय भू-चुंबकत्व संस्थान (IIG) के अधीन कार्य करती हैं। भारतीय भू-चुंबकत्व संस्थान, कोलाबा एवं अलीबाग वेधशालाओं के विस्तार स्वरूप, औपचारिक रूप से 1971 में स्थापित किया गया। भारतीय भू-चुंबकत्व संस्थान अपनी देशव्यापी वेधशालाओं के माध्यम से भू, समुद्र तल एवं अंतरिक्ष के चुंबकीय क्षेत्र एवं उनमें होने वाले उतार-चढ़ावों पर निगाह रखता है। इसकी सेवाएँ तेल एवं प्राकृतिक गैस आयोग (ONGC), राष्ट्रीय समुद्र-विज्ञान संस्थान (NIO) एवं भारतीय अंतरिक्ष अनुसंधान संगठन (ISRO) द्वारा प्रयोग की जाती हैं। यह उस विश्वव्यापी व्यवस्था का अंग है जो लगातार प्रयत्नपूर्वक भू-चुंबकीय आंकड़ों को सुधारती रहती है। अब भारत का 'गंगोत्री' नामक एक स्थायी केंद्र है।

सारांश

1. चुंबकत्व विज्ञान एक प्राचीन विज्ञान है। यह अत्यंत प्राचीन काल से ज्ञात रहा है कि चुंबकीय पदार्थों में उत्तर-दक्षिण दिशा में संकेत करने की प्रवृत्ति होती है। समान ध्रुव एक-दूसरे को प्रतिकर्षित करते हैं और विपरीत ध्रुव आकर्षित। किसी छड़ चुंबक को काटकर दो भागों में विभाजित करें तो दो छोटे चुंबक बन जाते हैं। चुंबक के ध्रुव अलग नहीं किए जा सकते।
2. जब **m** चुंबकीय द्विध्रुव आघूर्ण वाले छड़ चुंबक को समांग चुंबकीय क्षेत्र **B** में रखते हैं, तो
   (a) इस पर लगने वाला कुल बल शून्य होता है।
   (b) बल आघूर्ण $\mathbf{m} \times \mathbf{B}$ होता है।
   (c) इसकी स्थितिज ऊर्जा $-\mathbf{m}.\mathbf{B}$ होती है, जहाँ हमने शून्य ऊर्जा को उस विन्यास में लिया है जब **m** चुंबकीय क्षेत्र **B** के लंबवत है।
3. लंबाई l एवं चुंबकीय आघूर्ण **m** का एक छड़ चुंबक लीजिए। इसके मध्य बिंदु से r दूरी पर, जहाँ $r >> l$, इस छड़ के कारण चुंबकीय क्षेत्र **B** का मान होगा,

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \mathbf{m}}{2\pi r^3} \qquad \text{(अक्ष के अनुदिश)}$$

$$= -\frac{\mu_0 \mathbf{m}}{4\pi r^3} \qquad \text{(विषुवत वृत्त के अनुदिश)}$$

4. चुंबकत्व संबंधी गाउस के नियमानुसार, किसी बंद पृष्ठ में से गुजरने वाला कुल चुंबकीय फ्लक्स हमेशा शून्य होता है।

$$\phi_B = \sum_{\substack{\text{सभी क्षेत्रफल} \\ \text{अंशों } \Delta\mathbf{S} \text{ के लिए}}} \mathbf{B}.\Delta\mathbf{S} = 0$$

5. पृथ्वी का चुंबकीय क्षेत्र, पृथ्वी के केंद्र पर रखे एक चुंबकीय द्विध्रुव (परिकल्पित) के समतुल्य है। पृथ्वी के भौगोलिक उत्तरी ध्रुव के समीप के ध्रुव को *उत्तरी चुंबकीय ध्रुव* कहते हैं। इसी प्रकार से, पृथ्वी के भौगोलिक दक्षिणी ध्रुव के समीप के ध्रुव को *दक्षिण चुंबकीय ध्रुव* कहते हैं। यह द्विध्रुव पृथ्वी के घूर्णन अक्ष से एक छोटा कोण बनाता है। पृथ्वी की सतह पर चुंबकीय क्षेत्र का परिमाण $\approx 4 \times 10^{-5}$ T है।

© NCERT not to be republished

6. पृथ्वी की सतह पर इसके चुंबकीय क्षेत्र का विवरण देने के लिए तीन राशियाँ आवश्यक हैं– चुंबकीय क्षेत्र का क्षैतिज अवयव, चुंबकीय दिक्पात एवं चुंबकीय नति। ये पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र के अवयव हैं।
7. माना कि कोई पदार्थ एक बाह्य चुंबकीय क्षेत्र $\mathbf{B}_0$ में रखा है। *चुंबकीय तीव्रता* की परिभाषा है,
$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}_0}{\mu_0}$$
पदार्थ का चुंबकन **M** इसका द्विध्रुव आघूर्ण प्रति इकाई आयतन है। पदार्थ के अंदर चुंबकीय क्षेत्र
$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$$
8. रैखिक पदार्थ के लिए,
$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$ जिससे कि $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$
एवं χ पदार्थ की चुंबकीय प्रवृत्ति कहलाती है। राशियों χ, आपेक्षिक चुंबकशीलता μ_r एवं चुंबकशीलता μ में निम्नलिखित संबंध हैं–
$\mu = \mu_0 \mu_r$
$\mu_r = 1 + \chi$
9. चुंबकीय पदार्थों को मोटे तौर पर तीन श्रेणियों में विभाजित करते हैं : प्रतिचुंबकीय, अनुचुंबकीय एवं लौह चुंबकीय। प्रतिचुंबकीय पदार्थों के लिए χ का मान ऋणात्मक और प्राय: बहुत कम होता है, अनुचुंबकीय पदार्थों के लिए χ धनात्मक एवं बहुत कम है। लौह चुंबकों के लिए χ धनात्मक एवं बहुत अधिक मान वाला है और ये **B** एवं **H** के रैखिक संबंधों से भी पहचाने जाते हैं। वे शैथिल्यता का गुण प्रदर्शित करते हैं।
10. वे पदार्थ जो सामान्य ताप पर लंबे समय के लिए लौह चुंबकीय गुण दर्शाते हैं, स्थायी चुंबक कहलाते हैं।

भौतिक राशि	प्रतीक	प्रकृति	विमाएँ	मात्रक	टिप्पणी
निर्वात की चुंबकशीलता	μ_0	अदिश	$[M L T^{-2} A^{-2}]$	$T\ m\ A^{-1}$	$\mu_0/4\pi = 10^{-7}$
चुंबकीय क्षेत्र; चुंबकीय प्रेरण; चुंबकीय फ्लक्स घनत्व	**B**	सदिश	$[M T^{-2} A^{-1}]$	T (टेस्ला)	10^4 G (गाउस) = 1 T
चुंबकीय आघूर्ण	**m**	सदिश	$[L^2 A]$	$A\ m^2$	
चुंबकीय फ्लक्स	ϕ_B	अदिश	$[M L^2 T^{-2} A^{-1}]$	W (वेबर)	$W = T\ m^2$
चुंबकन	**M**	सदिश	$[L^{-1} A]$	$A\ m^{-1}$	$\frac{\text{चुंबकीय आघूर्ण}}{\text{आयतन}}$
चुंबकीय तीव्रता चुंबकीय क्षेत्र सामर्थ्य	**H**	सदिश	$[L^{-1} A]$	$A\ m^{-1}$	$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$
चुंबकीय प्रवृत्ति	χ	अदिश	-	-	$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$
आपेक्षिक चुंबकशीलता	μ_r	अदिश	-	-	$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$
चुंबकशीलता	μ	अदिश	$[M L T^{-2} A^{-2}]$	$T\ m\ A^{-1}$ $N\ A^{-2}$	$\mu = \mu_0 \mu_r$ $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$

© NCERT not to be republished

विचारणीय विषय

1. गतिमान आवेशों/धाराओं के माध्यम से चुंबकीय प्रक्रमों की संतोषजनक समझ सन 1800 ई. के बाद पैदा हुई। लेकिन, चुंबकों के दैशिक गुणों का प्रौद्योगिकीय उपयोग इस वैज्ञानिक समझ से दो हजार वर्ष पूर्व होने लगा था। अत: अभियांत्रिक अनुप्रयोगों के लिए, वैज्ञानिक समझ का होना कोई आवश्यक शर्त नहीं है। आदर्श स्थिति यह है कि विज्ञान और अभियांत्रिकी एक-दूसरे से सहयोग करते हुए चलते हैं। कभी विज्ञान अभियांत्रिकी को आगे बढ़ाता है तो कभी अभियांत्रिकी विज्ञान को।
2. एकल चुंबकीय ध्रुवों का अस्तित्व नहीं होता। यदि आप एक चुंबक को काट कर दो टुकड़े करते हैं तो आपको दो छोटे चुंबक प्राप्त होते हैं। इसके विपरीत पृथक्कृत धनात्मक एवं ऋणात्मक विद्युत आवेशों का अस्तित्व है। एक इलेक्ट्रॉन पर आवेश का परिमाण $|e| = 1.6 \times 10^{-19}$ C होता है जो आवेश का सूक्ष्मतम मान है। अन्य सभी आवेश इस न्यूनतम इकाई आवेश के पूर्ण गुणांक होते हैं। दूसरे शब्दों में, आवेश क्वांटीकृत होते हैं। हमें ज्ञात नहीं है कि एकल चुंबकीय ध्रुवों का अस्तित्व क्यों नहीं है अथवा विद्युत आवेश क्वांटीकृत क्यों होता है?
3. इस तथ्य का कि चुंबकीय एकल ध्रुवों का अस्तित्व नहीं होता, एक परिणाम यह है कि चुंबकीय क्षेत्र रेखाएँ संतत हैं और बंद लूप बनाती हैं। इसके विपरीत, वैद्युत बल रेखाएँ धनावेश से शुरू होकर ऋणावेश पर समाप्त हो जाती हैं (या अनंत में लीन हो जाती हैं)।
4. पृथ्वी का चुंबकीय क्षेत्र इसके अंदर रखे एक विशाल छड़ चुंबक के कारण नहीं है। पृथ्वी का क्रोड गर्म एवं पिघली हुई अवस्था में है। शायद इस क्रोड में प्रवाहित होने वाली संवहन धाराएँ ही पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र के लिए जिम्मेदार हैं। हम नहीं जानते कि वह कौन-सा 'जनित्र' प्रभाव है जो इन धाराओं को बनाये रखता है और पृथ्वी का चुंबकीय क्षेत्र लगभग हर दस लाख सालों में अपनी ध्रुवता क्यों उलट लेता है।
5. चुंबकीय प्रवृत्ति χ के मान में अत्यल्प अंतर से पदार्थ के व्यवहार में मूलभूत अंतर पाया जाता है, जैसे प्रतिचुंबक और अनुचुंबक के व्यवहारों में अंतर। प्रतिचुंबकीय पदार्थों के लिए $\chi = -10^{-5}$ जबकि अनुचुंबकीय पदार्थों के लिए $\chi = +10^{-5}$।
6. अतिचालक, परिपूर्ण प्रतिचुंबक (perfect diamagnetic) भी होते हैं। इसके लिए $\chi = -1$, $\mu_r = 0$, $\mu = 0$। बाह्य चुंबकीय क्षेत्र पूर्णत: इसके बाहर ही रहता है। एक मनोरंजक तथ्य यह है कि यह पदार्थ एक परिपूर्ण चालक भी है। परंतु, ऐसा कोई चिरसम्मत सिद्धांत नहीं है जो इन दोनों गुणों में एक सूत्रता ला सके। बार्डीन, कूपर एवं श्रीफर ने एक क्वांटम यांत्रिकीय सिद्धांत (BCS सिद्धांत) दिया है, जो इन प्रभावों की व्याख्या कर सकता है। BCS सिद्धांत 1957 में प्रस्तावित किया गया था और बाद में, 1970 में, भौतिकी के नोबेल पुरस्कार के रूप में इसको मान्यता प्राप्त हुई।
7. चुंबकीय शैथिल्यता की परिघटना, पदार्थों के प्रत्यास्थता संबंधी मिलते-जुलते व्यवहार की याद दिलाता है। जैसे–प्रतिबल, विकृति के अनुक्रमानुपाती होना आवश्यक नहीं है वैसे ही यहाँ H एवं B (या M) में रैखिक संबंध नहीं है। प्रतिबल-विकृति वक्र शैथिल्यता का प्रदर्शन करता है और इससे घिरा हुआ क्षेत्रफल प्रति इकाई आयतन में होने वाला ऊर्जा क्षय व्यक्त करता है। B-H चुंबकीय शैथिल्य वक्र की भी इसी तरह की व्याख्या की जा सकती है।
8. प्रतिचुंबकत्व सार्वत्रिक है। यह सभी पदार्थों में विद्यमान है। परंतु अनुचुंबकीय एवं लौह चुंबकीय पदार्थों में यह बहुत क्षीण होता है और इसका पता लगाना बहुत कठिन है।
9. हमने पदार्थों का प्रतिचुंबकीय, अनुचुंबकीय एवं लौह चुंबकीय रूपों में वर्गीकरण किया है। लेकिन चुंबकीय पदार्थों के इनके अलावा भी कुछ प्रकार हैं; जैसे–लघु लौह चुंबकीय (फेरी चुंबकीय), प्रतिलौह चुंबकीय, स्पिन-काँच आदि जिनके गुण बहुत ही असामान्य एवं रहस्यमय हैं।

© NCERT not to be republished

अभ्यास

5.1 भू-चुंबकत्व संबंधी निम्नलिखित प्रश्नों के उत्तर दीजिए–

(a) एक सदिश को पूर्ण रूप से व्यक्त करने के लिए तीन राशियों की आवश्यकता होती है। उन तीन स्वतंत्र राशियों के नाम लिखिए जो परंपरागत रूप से पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र को व्यक्त करने के लिए प्रयुक्त होती हैं।

(b) दक्षिण भारत में किसी स्थान पर नति कोण का मान लगभग 18° है। ब्रिटेन में आप इससे अधिक नति कोण की अपेक्षा करेंगे या कम की?

(c) यदि आप ऑस्ट्रेलिया के मेल्बोर्न शहर में भू-चुंबकीय क्षेत्र रेखाओं का नक्शा बनाएँ तो ये रेखाएँ पृथ्वी के अंदर जाएँगी या इससे बाहर आएँगी?

(d) एक चुंबकीय सुई जो ऊर्ध्वाधर तल में घूमने के लिए स्वतंत्र है, यदि भू-चुंबकीय उत्तर या दक्षिण ध्रुव पर रखी हो तो यह किस दिशा में संकेत करेगी?

(e) यह माना जाता है कि पृथ्वी का चुंबकीय क्षेत्र लगभग एक चुंबकीय द्विध्रुव के क्षेत्र जैसा है जो पृथ्वी के केंद्र पर रखा है और जिसका द्विध्रुव आघूर्ण $8 \times 10^{22}\ JT^{-1}$ है। कोई ढंग सुझाइए जिससे इस संख्या के परिमाण की कोटि जाँची जा सके।

(f) भू-गर्भशास्त्रियों का मानना है कि मुख्य N-S चुंबकीय ध्रुवों के अतिरिक्त, पृथ्वी की सतह पर कई अन्य स्थानीय ध्रुव भी हैं, जो विभिन्न दिशाओं में विन्यस्त हैं। ऐसा होना कैसे संभव है?

5.2 निम्नलिखित प्रश्नों के उत्तर दीजिए–

(a) एक जगह से दूसरी जगह जाने पर पृथ्वी का चुंबकीय क्षेत्र बदलता है। क्या यह समय के साथ भी बदलता है? यदि हाँ, तो कितने समय अंतराल पर इसमें पर्याप्त परिवर्तन होते हैं?

(b) पृथ्वी के क्रोड में लोहा है, यह ज्ञात है। फिर भी भूगर्भशास्त्री इसको पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र का स्रोत नहीं मानते। क्यों?

(c) पृथ्वी के क्रोड के बाहरी चालक भाग में प्रवाहित होने वाली आवेश धाराएँ भू-चुंबकीय क्षेत्र के लिए उत्तरदायी समझी जाती हैं। इन धाराओं को बनाए रखने वाली बैटरी (ऊर्जा स्रोत) क्या हो सकती है?

(d) अपने 4-5 अरब वर्षों के इतिहास में पृथ्वी अपने चुंबकीय क्षेत्र की दिशा कई बार उलट चुकी होगी। भूगर्भशास्त्री, इतने सुदूर अतीत के पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र के बारे में कैसे जान पाते हैं?

(e) बहुत अधिक दूरियों पर (30,000 km से अधिक) पृथ्वी का चुंबकीय क्षेत्र अपनी द्विध्रुवीय आकृति से काफी भिन्न हो जाता है। कौन से कारक इस विकृति के लिए उत्तरदायी हो सकते हैं?

(f) अंतरातारकीय अंतरिक्ष में 10^{-12} T की कोटि का बहुत ही क्षीण चुंबकीय क्षेत्र होता है। क्या इस क्षीण चुंबकीय क्षेत्र के भी कुछ प्रभावी परिणाम हो सकते हैं? समझाइए।

[**टिप्पणी :** प्रश्न 5.2 का उद्देश्य मुख्यत: आपकी जिज्ञासा जगाना है। उपरोक्त कई प्रश्नों के उत्तर या तो काम चलाऊ हैं या अज्ञात हैं। जितना संभव हो सका, प्रश्नों के संक्षिप्त उत्तर पुस्तक के अंत में दिए गए हैं। विस्तृत उत्तरों के लिए आपको भू-चुंबकत्व पर कोई अच्छी पाठ्यपुस्तक देखनी होगी।]

5.3 एक छोटा छड़ चुंबक जो एकसमान बाह्य चुंबकीय क्षेत्र 0.25 T के साथ 30° का कोण बनाता है, पर 4.5×10^{-2} J का बल आघूर्ण लगता है। चुंबक के चुंबकीय आघूर्ण का परिमाण क्या है?

© NCERT not to be republished

5.4 चुंबकीय आघूर्ण $m = 0.32\ JT^{-1}$ वाला एक छोटा छड़ चुंबक, 0.15 T के एकसमान बाह्य चुंबकीय क्षेत्र में रखा है। यदि यह छड़ क्षेत्र के तल में घूमने के लिए स्वतंत्र हो, तो क्षेत्र के किस विन्यास में यह (i) स्थायी संतुलन और (ii) अस्थायी संतुलन में होगा? प्रत्येक स्थिति में चुंबक की स्थितिज ऊर्जा का मान बताइए।

5.5 एक परिनालिका में पास-पास लपेटे गए 800 फेरे हैं, तथा इसका अनुप्रस्थ काट का क्षेत्रफल $2.5 \times 10^{-4}\ m^2$ है और इसमें 3.0 A धारा प्रवाहित हो रही है। समझाइए कि किस अर्थ में यह परिनालिका एक छड़ चुंबक की तरह व्यवहार करती है? इसके साथ जुड़ा हुआ चुंबकीय आघूर्ण कितना है?

5.6 यदि प्रश्न 5.5 में बताई गई परिनालिका ऊर्ध्वाधर दिशा के परितः घूमने के लिए स्वतंत्र हो और इस पर क्षैतिज दिशा में एक 0.25 T का एकसमान चुंबकीय क्षेत्र लगाया जाए, तो इस परिनालिका पर लगने वाले बल आघूर्ण का परिमाण उस समय क्या होगा, जब इसकी अक्ष आरोपित क्षेत्र की दिशा से 30° का कोण बना रही हो?

5.7 एक छड़ चुंबक जिसका चुंबकीय आघूर्ण $1.5\ JT^{-1}$ है, 0.22 T के एक एकसमान चुंबकीय क्षेत्र के अनुदिश रखा है।

(a) एक बाह्य बल आघूर्ण कितना कार्य करेगा यदि यह चुंबक को चुंबकीय क्षेत्र के (i) लंबवत (ii) विपरीत दिशा में संरेखित करने के लिए घुमा दे।

(b) स्थिति (i) एवं (ii) में चुंबक पर कितना बल आघूर्ण होता है?

5.8 एक परिनालिका जिसमें पास-पास 2000 फेरे लपेटे गए हैं तथा जिसके अनुप्रस्थ काट का क्षेत्रफल $1.6 \times 10^{-4}\ m^2$ है और जिसमें 4.0 A की धारा प्रवाहित हो रही है, इसके केंद्र से इस प्रकार लटकायी गई है कि यह एक क्षैतिज तल में घूम सके।

(a) परिनालिका के चुंबकीय आघूर्ण का मान क्या है?

(b) परिनालिका पर लगने वाला बल एवं बल आघूर्ण क्या है, यदि इस पर, इसकी अक्ष से 30° का कोण बनाता हुआ 7.5×10^{-2} T का एकसमान क्षैतिज चुंबकीय क्षेत्र लगाया जाए?

5.9 एक वृत्ताकार कुंडली जिसमें 16 फेरे हैं, जिसकी त्रिज्या 10 cm है और जिसमें 0.75 A धारा प्रवाहित हो रही है, इस प्रकार रखी है कि इसका तल, 5.0×10^{-2} T परिमाण वाले बाह्य क्षेत्र के लंबवत है। कुंडली, चुंबकीय क्षेत्र के लंबवत और इसके अपने तल में स्थित एक अक्ष के चारों तरफ घूमने के लिए स्वतंत्र है। यदि कुंडली को जरा-सा घुमा कर छोड़ दिया जाए तो यह अपनी स्थायी संतुलनावस्था के इधर-उधर $2.0\ s^{-1}$ की आवृत्ति से दोलन करती है। कुंडली का अपने घूर्णन अक्ष के परितः जड़त्व-आघूर्ण क्या है?

5.10 एक चुंबकीय सुई चुंबकीय याम्योत्तर के समांतर एक ऊर्ध्वाधर तल में घूमने के लिए स्वतंत्र है। इसका उत्तरी ध्रुव क्षैतिज से 22° के कोण पर नीचे की ओर झुका है। इस स्थान पर चुंबकीय क्षेत्र के क्षैतिज अवयव का मान 0.35 G है। इस स्थान पर पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र का परिमाण ज्ञात कीजिए।

5.11 दक्षिण अफ्रीका में किसी स्थान पर एक चुंबकीय सुई भौगोलिक उत्तर से 12° पश्चिम की ओर संकेत करती है। चुंबकीय याम्योत्तर में संरेखित नति-वृत्त की चुंबकीय सुई का उत्तरी ध्रुव क्षैतिज से 60° उत्तर की ओर संकेत करता है। पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र का क्षैतिज अवयव मापने पर 0.16 G पाया जाता है। इस स्थान पर पृथ्वी के क्षेत्र का परिमाण और दिशा बताइए।

5.12 किसी छोटे छड़ चुंबक का चुंबकीय आघूर्ण $0.48\ JT^{-1}$ है। चुंबक के केंद्र से 10 cm की दूरी पर स्थित किसी बिंदु पर इसके चुंबकीय क्षेत्र का परिमाण एवं दिशा बताइए यदि यह बिंदु (i) चुंबक के अक्ष पर स्थित हो (ii) चुंबक के अभिलंब समद्विभाजक पर स्थित हो।

© NCERT not to be republished

5.13 क्षैतिज तल में रखे एक छोटे छड़ चुंबक का अक्ष, चुंबकीय उत्तर-दक्षिण दिशा के अनुदिश है। संतुलन बिंदु चुंबक के अक्ष पर, इसके केंद्र से 14 cm दूर स्थित है। इस स्थान पर पृथ्वी का चुंबकीय क्षेत्र 0.36 G एवं नति कोण शून्य है। चुंबक के अभिलंब समद्विभाजक पर इसके केंद्र से उतनी ही दूर (14 cm) स्थित किसी बिंदु पर परिणामी चुंबकीय क्षेत्र क्या होगा?

5.14 यदि प्रश्न 5.13 में वर्णित चुंबक को 180° से घुमा दिया जाए तो संतुलन बिंदुओं की नयी स्थिति क्या होगी?

5.15 एक छोटा छड़ चुंबक जिसका चुंबकीय आघूर्ण $5.25 \times 10^{-2} JT^{-1}$ है, इस प्रकार रखा है कि इसका अक्ष पृथ्वी के क्षेत्र की दिशा के लंबवत है। चुंबक के केंद्र से कितनी दूरी पर, परिणामी क्षेत्र पृथ्वी के क्षेत्र की दिशा से 45° का कोण बनाएगा, यदि हम (a) अभिलंब समद्विभाजक पर देखें, (b) अक्ष पर देखें। इस स्थान पर पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र का परिमाण 0.42 G है। प्रयुक्त दूरियों की तुलना में चुंबक की लंबाई की उपेक्षा कर सकते हैं।

अतिरिक्त अभ्यास

5.16 निम्नलिखित प्रश्नों के उत्तर दीजिए–

(a) ठंडा करने पर किसी अनुचुंबकीय पदार्थ का नमूना अधिक चुंबकन क्यों प्रदर्शित करता है? (एक ही चुंबककारी क्षेत्र के लिए)

(b) अनुचुंबकत्व के विपरीत, प्रतिचुंबकत्व पर ताप का प्रभाव लगभग नहीं होता। क्यों?

(c) यदि एक टोरॉइड में बिस्मथ का क्रोड लगाया जाए तो इसके अंदर चुंबकीय क्षेत्र उस स्थिति की तुलना में (किंचित) कम होगा या (किंचित) ज्यादा होगा, जबकि क्रोड खाली हो?

(d) क्या किसी लौह चुंबकीय पदार्थ की चुंबकशीलता चुंबकीय क्षेत्र पर निर्भर करती है? यदि हाँ, तो उच्च चुंबकीय क्षेत्रों के लिए इसका मान कम होगा या अधिक?

(e) किसी लौह चुंबक की सतह के प्रत्येक बिंदु पर चुंबकीय क्षेत्र रेखाएँ सदैव लंबवत होती हैं [यह तथ्य उन स्थिरवैद्युत क्षेत्र रेखाओं के सदृश है जो कि चालक की सतह के प्रत्येक बिंदु पर लंबवत होती हैं]। क्यों?

(f) क्या किसी अनुचुंबकीय नमूने का अधिकतम संभव चुंबकन, लौह चुंबक के चुंबकन के परिमाण की कोटि का होगा?

5.17 निम्नलिखित प्रश्नों के उत्तर दीजिए–

(a) लौह चुंबकीय पदार्थ के चुंबकन वक्र की अनुत्क्रमणीयता, डोमेनो के आधार पर गुणात्मक दृष्टिकोण से समझाइए।

(b) नर्म लोहे के एक टुकड़े के शैथिल्य लूप का क्षेत्रफल, कार्बन-स्टील के टुकड़े के शैथिल्य लूप के क्षेत्रफल से कम होता है। यदि पदार्थ को बार-बार चुंबकन चक्र से गुजारा जाए तो कौन सा टुकड़ा अधिक ऊष्मा ऊर्जा का क्षय करेगा?

(c) लौह चुंबक जैसा शैथिल्य लूप प्रदर्शित करने वाली कोई प्रणाली स्मृति संग्रहण की युक्ति है। इस कथन की व्याख्या कीजिए।

(d) कैसेट के चुंबकीय फीतों पर पर्त चढ़ाने के लिए या आधुनिक कंप्यूटर में स्मृति संग्रहण के लिए, किस तरह के लौह चुंबकीय पदार्थों का इस्तेमाल होता है?

(e) किसी स्थान को चुंबकीय क्षेत्र से परिरक्षित करना है। कोई विधि सुझाइए।

5.18 एक लंबे, सीधे, क्षैतिज केबल में, 2.5 A धारा, 10° दक्षिण-पश्चिम से 10° उत्तर-पूर्व की ओर प्रवाहित हो रही है। इस स्थान पर चुंबकीय याम्योत्तर भौगोलिक याम्योत्तर के 10° पश्चिम में है। यहाँ पृथ्वी का चुंबकीय क्षेत्र 0.33 G एवं नति कोण शून्य है। उदासीन बिंदुओं की रेखा निर्धारित कीजिए। (केबल की मोटाई की उपेक्षा कर सकते हैं)।

(उदासीन बिंदुओं पर, धारावाही केबल द्वारा चुंबकीय क्षेत्र, पृथ्वी के क्षैतिज घटक के चुंबकीय क्षेत्र के समान एवं विपरीत दिशा में होता है।)

© NCERT not to be republished

5.19 किसी स्थान पर एक टेलिफोन केबल में चार लंबे, सीधे, क्षैतिज तार हैं जिनमें से प्रत्येक में 1.0 A की धारा पूर्व से पश्चिम की ओर प्रवाहित हो रही है। इस स्थान पर पृथ्वी का चुंबकीय क्षेत्र 0.39 G एवं नति कोण 35° है। दिक्पात कोण लगभग शून्य है। केबल के 4.0 cm नीचे और 4.0 cm ऊपर परिणामी चुंबकीय क्षेत्रों के मान क्या होंगे?

5.20 एक चुंबकीय सुई जो क्षैतिज तल में घूमने के लिए स्वतंत्र है, 30 फेरों एवं 12 cm त्रिज्या वाली एक कुंडली के केंद्र पर रखी है। कुंडली एक ऊर्ध्वाधर तल में है और चुंबकीय याम्योत्तर से 45° का कोण बनाती है। जब कुंडली में 0.35 A धारा प्रवाहित होती है, चुंबकीय सुई पश्चिम से पूर्व की ओर संकेत करती है।

(a) इस स्थान पर पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र के क्षैतिज अवयव का मान ज्ञात कीजिए।

(b) कुंडली में धारा की दिशा उलट दी जाती है और इसको अपनी ऊर्ध्वाधर अक्ष पर वामावर्त दिशा में (ऊपर से देखने पर) 90° के कोण पर घुमा दिया जाता है। चुंबकीय सुई किस दिशा में ठहरेगी? इस स्थान पर चुंबकीय दिक्पात शून्य लीजिए।

5.21 एक चुंबकीय द्विध्रुव दो चुंबकीय क्षेत्रों के प्रभाव में है। ये क्षेत्र एक-दूसरे से 60° का कोण बनाते हैं और उनमें से एक क्षेत्र का परिमाण 1.2×10^{-2} T है। यदि द्विध्रुव स्थायी संतुलन में इस क्षेत्र से 15° का कोण बनाए, तो दूसरे क्षेत्र का परिमाण क्या होगा?

5.22 एक समोर्जी 18 keV वाले इलेक्ट्रॉनों के किरण पुंज पर जो शुरू में क्षैतिज दिशा में गतिमान है, 0.04 G का एक क्षैतिज चुंबकीय क्षेत्र, जो किरण पुंज की प्रारंभिक दिशा के लंबवत है, लगाया गया है। आकलन कीजिए 30 cm की क्षैतिज दूरी चलने में किरण पुंज कितनी दूरी ऊपर या नीचे विस्थापित होगा? ($m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg, $e = 1.60 \times 10^{-19}$ C)।

[**नोट:** इस प्रश्न में आँकड़े इस प्रकार चुने गए हैं कि उत्तर से आपको यह अनुमान हो, कि TV सेट में इलेक्ट्रॉन गन से पर्दे तक इलेक्ट्रॉन किरण पुंज की गति भू-चुंबकीय क्षेत्र से किस प्रकार प्रभावित होती है]।

5.23 अनुचुंबकीय लवण के एक नमूने में 2.0×10^{24} परमाणु द्विध्रुव हैं जिनमें से प्रत्येक का द्विध्रुव आघूर्ण 1.5×10^{-23} J T^{-1} है। इस नमूने को 0.64 T के एक एकसमान चुंबकीय क्षेत्र में रखा गया और 4.2 K ताप तक ठंडा किया गया। इसमें 15% चुंबकीय संतृप्तता आ गई। यदि इस नमूने को 0.98 T के चुंबकीय क्षेत्र में 2.8 K ताप पर रखा हो तो इसका कुल द्विध्रुव आघूर्ण कितना होगा? (यह मान सकते हैं कि क्यूरी नियम लागू होता है।)

5.24 एक रोलैंड रिंग की औसत त्रिज्या 15 cm है और इसमें 800 आपेक्षिक चुंबकशीलता के लौह चुंबकीय क्रोड पर 3500 फेरे लिपटे हुए हैं। 1.2 A की चुंबककारी धारा के कारण इसके क्रोड में कितना चुंबकीय क्षेत्र (**B**) होगा?

5.25 किसी इलेक्ट्रॉन के नैज चक्रणी कोणीय संवेग **S** एवं कक्षीय कोणीय संवेग **l** के साथ जुड़े चुंबकीय आघूर्ण क्रमशः $\boldsymbol{\mu}_s$ और $\boldsymbol{\mu}_l$ है। क्वांटम सिद्धांत के आधार पर (और प्रयोगात्मक रूप से अत्यंत परिशुद्धतापूर्वक पुष्ट) इनके मान क्रमशः निम्न प्रकार दिए जाते हैं–

$\boldsymbol{\mu}_S = -(e/m)\mathbf{S}$, एवं $\boldsymbol{\mu}_l = -(e/2m)\mathbf{l}$

इनमें से कौन-सा व्यंजक चिरसम्मत सिद्धांतों के आधार पर प्राप्त करने की आशा की जा सकती है? उस चिरसम्मत आधार पर प्राप्त होने वाले व्यंजक को व्युत्पन्न कीजिए।

© NCERT not to be republished

अध्याय 6

वैद्युतचुंबकीय प्रेरण

© NCERT not to be republished

6.1 भूमिका

विद्युत तथा चुंबकत्व काफी लंबे समय तक अलग-अलग तथा असंबद्ध परिघटनाएँ मानी जाती रही हैं। उन्नीसवीं शताब्दी के प्रारंभिक दशकों में ऑर्स्टेड, ऐम्पियर तथा कुछ अन्य वैज्ञानिकों द्वारा विद्युत धारा पर किए गए प्रयोगों ने यह प्रमाणित किया कि विद्युत तथा चुंबकत्व परस्पर संबंधित हैं। उन्होंने ज्ञात किया कि गतिमान विद्युत आवेश चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करते हैं। उदाहरण के लिए, विद्युत धारा अपने पास रखी हुई एक चुंबकीय सुई को विक्षेपित करती है। इससे एक स्वाभाविक प्रश्न उत्पन्न होता है – क्या इसका विपरीत प्रभाव संभव है? क्या गतिमान चुंबक विद्युत धारा उत्पन्न कर सकते हैं? क्या प्रकृति विद्युत तथा चुंबकत्व के बीच इस प्रकार के संबंध की अनुमति देती है? इसका उत्तर एक निश्चित 'हाँ' है। लगभग सन 1830 में माइकल फैराडे द्वारा इंग्लैंड में तथा जोसेफ हेनरी द्वारा अमेरिका में किए गए प्रयोगों ने स्पष्ट रूप से दर्शाया कि परिवर्तनशील चुंबकीय क्षेत्र बंद कुंडलियों में विद्युत धारा उत्पन्न करता है। इस अध्याय में हम परिवर्तनशील चुंबकीय क्षेत्रों से संबंधित परिघटनाओं के बारे में अध्ययन करेंगे तथा इनमें निहित सिद्धांतों को समझेंगे। वह परिघटना जिसमें चुंबकीय क्षेत्रों द्वारा विद्युत धारा उत्पन्न होती है, उसे उचित रूप से ही *वैद्युतचुंबकीय प्रेरण* कहते हैं।

जब फैराडे ने प्रथम बार अपनी इस खोज को सार्वजनिक किया कि 'चालक तार से बने लूप तथा दंड चुंबक के बीच सापेक्ष गति कराने पर लूप में क्षीण धारा उत्पन्न होती है', तब उनसे पूछा गया कि 'इसका क्या उपयोग है'? फैराडे का उत्तर था, 'नवजात शिशु का क्या उपयोग होता है?'

वैद्युतचुंबकीय प्रेरण केवल सैद्धांतिक या शैक्षिक रूप से ही उपयोगी परिघटना नहीं है वरन व्यावहारिक दृष्टि से विद्युत न हो तो विद्युत प्रकाश न हो, ट्रेन न हो, टेलीफ़ोन न हो और कंप्यूटर न हो। फैराडे एवं हेनरी के इन पुरोगामी (pioneering) प्रयोगों ने ही आधुनिक जनित्रों एवं ट्रांसफार्मरों के विकास को संभव बनाया। आज की सभ्यता के विकास में वैद्युतचुंबकीय प्रेरण की खोज ने एक अहम भूमिका निभाई है।



जोसेफ हेनरी [1797 – 1878]

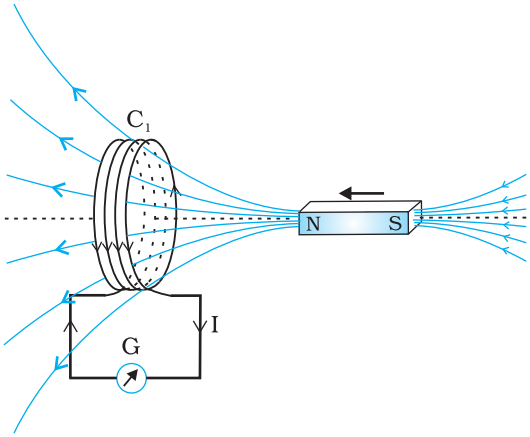
जोसेफ हेनरी अमेरिकी प्रायोगिक भौतिक-शास्त्री, प्रिंस्टन विश्वविद्यालय में प्रोफ़ेसर तथा स्मिथसोनियन इंस्टीट्यूशन के प्रथम निदेशक थे। लोहे के ध्रुवों के चारों ओर पृथक्कृत दंड चुंबक को स्थिर रखकर तथा इसके स्थान पर तार की कुंडलियाँ लपेटकर उन्होंने विद्युत चुंबकों में महत्वपूर्ण सुधार किए एवं एक विद्युत चुंबकीय मोटर तथा एक नए दक्ष टेलीग्राफ़ का आविष्कार किया। उन्होंने स्वप्रेरण की खोज की तथा इस बात का पता लगाया कि कैसे एक परिपथ में प्रवाहित धारा दूसरे परिपथ में धारा प्रेरित करती है।

6.2 फैराडे एवं हेनरी के प्रयोग

वैद्युतचुंबकीय प्रेरण की खोज तथा उसकी समझ फैराडे एवं हेनरी द्वारा किए गए अनेक प्रयोगों पर आधारित है। हम उनमें से कुछ प्रयोगों का वर्णन यहाँ करेंगे।

प्रयोग 6.1

चित्र 6.1 में धारामापी G से जुड़ी हुई एक कुंडली C_1* दर्शायी गई है। जब एक दंड चुंबक के उत्तरी ध्रुव को इस कुंडली की ओर धकेला जाता है तो धारामापी का संकेतक विक्षेपित होता है जो कुंडली में विद्युत धारा की उपस्थिति को दर्शाता है। यह विक्षेप तभी तक रहता है जब तक दंड चुंबक गति में रहता है। जब चुंबक स्थिर होता है तो धारामापी कोई विक्षेप नहीं दर्शाता। जब चुंबक को कुंडली से दूर ले जाते हैं तो धारामापी विपरीत दिशा में विक्षेप दर्शाता है, जो धारा प्रवाह की दिशा के विपरीत होने को दर्शाता है। इसके अतिरिक्त, जब दंड चुंबक के दक्षिणी ध्रुव को कुंडली की ओर या इससे दूर ले जाते हैं तो धारामापी में विक्षेप की दिशाएँ उत्तरी ध्रुव की इसी प्रकार की गति की अपेक्षा विपरीत हो जाती हैं। इसके अतिरिक्त, जब चुंबक को कुंडली की ओर या इससे दूर तेजी से गतिमान किया जाता है तो विक्षेप और इसलिए धारा अधिक प्राप्त होता है। यह भी देखा गया है कि यदि दंड चुंबक को स्थिर रखा जाए तथा इसके बजाय कुंडली C_1 को चुंबक की ओर या इससे दूर गतिमान किया जाए तो भी इसी प्रकार का प्रभाव उत्पन्न होता है। *यह दर्शाता है कि कुंडली में विद्युत धारा की उत्पत्ति (प्रेरण) चुंबक तथा कुंडली के मध्य सापेक्ष गति का प्रतिफल है।*



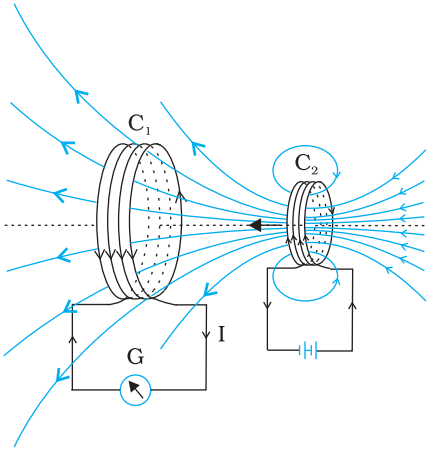
चित्र 6.1 जब दंड चुंबक को कुंडली की ओर धकेलते हैं, धारामापी G का संकेतक विक्षेपित होता है।

प्रयोग 6.2

चित्र 6.2 में दंड चुंबक को बैटरी से जुड़ी हुई एक दूसरी कुंडली C_2 से प्रतिस्थापित किया गया है। कुंडली C_2 में अपरिवर्ती धारा अपरिवर्ती चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करती है। जैसे ही कुंडली C_2 को कुंडली C_1 की ओर लाते हैं, धारामापी एक विक्षेप दर्शाता है। यह कुंडली C_1 में प्रेरित विद्युत धारा को निदर्शित करता है। जब C_2 को दूर ले जाते हैं तो धारामापी फिर से विक्षेप दर्शाता है, लेकिन इस बार यह विक्षेप विपरीत दिशा में होता है। यह विक्षेप तभी तक रहता है जब तक कुंडली C_2 गति में रहती है। जब कुंडली C_2 को

* जब भी कुंडली या 'लूप' शब्द का उपयोग किया जाता है तो यह मान लिया जाता है कि वे चालक पदार्थों से बने हैं तथा इन्हें जिन तारों से बनाया गया है उन पर अवरोधक पदार्थों की परत चढ़ी है।

© NCERT not to be republished



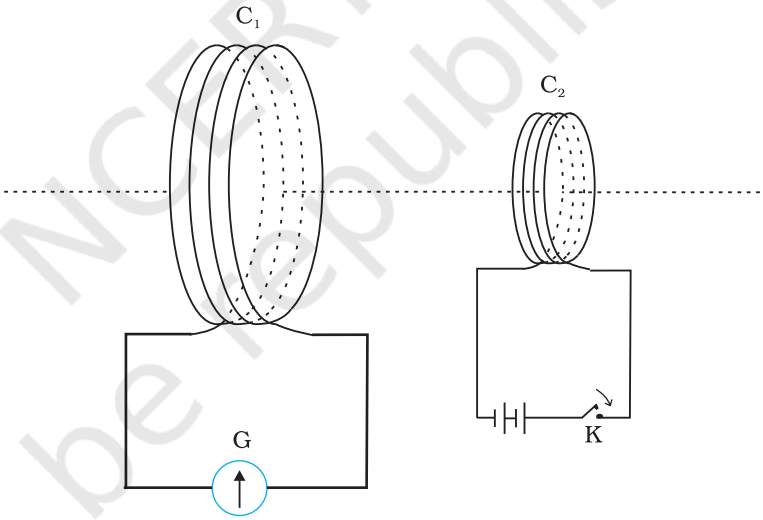
चित्र 6.2 धारायुक्त कुंडली C_2 की गति के कारण कुंडली C_1 में प्रेरित धारा उत्पन्न होती है।

स्थिर रखा जाता है तथा C_1 गतिमान होता है तो उन्हीं प्रभावों को फिर से देखा जा सकता है। यहाँ भी *कुंडलियों के मध्य सापेक्ष गति विद्युत धारा प्रेरित करती है।*

प्रयोग 6.3

उपरोक्त दोनों प्रयोगों में चुंबक तथा कुंडली के बीच तथा दो कुंडलियों के बीच सापेक्ष गति शामिल है। एक अन्य प्रयोग द्वारा फैराडे ने दर्शाया कि यह सापेक्ष गति कोई अति आवश्यक अनिवार्यता नहीं है। चित्र 6.3 में दो कुंडलियाँ C_1 तथा C_2 दर्शायी गई हैं जो स्थिर रखी गई हैं। कुंडली C_1 को एक धारामापी G से जोड़ा गया है जबकि दूसरी कुंडली C_2 को एक दाब-कुंजी K से होकर एक बैटरी से जोड़ा जाता है।

यह देखा जाता है कि दाब-कुंजी K को दबाने पर धारामापी एक क्षणिक विक्षेप दर्शाता है और फिर इसका संकेतक तत्काल शून्य पर वापस आ जाता है। यदि कुंजी



चित्र 6.3 प्रयोग 6.3 के लिए प्रयोगात्मक व्यवस्था

को लगातार दबाकर रखा जाए तो धारामापी में कोई विक्षेप नहीं होता। जब कुंजी को छोड़ा जाता है तो फिर से एक क्षणिक विक्षेप देखा जाता है, लेकिन यह विक्षेप विपरीत दिशा में होता है। यह भी देखा गया है कि यदि कुंडलियों में उनके अक्ष के अनुदिश एक लोहे की छड़ रख दी जाए तो विक्षेप नाटकीय रूप से बढ़ जाता है।

6.3 चुंबकीय फ्लक्स

फैराडे की विशाल अंतर्दृष्टि के कारण वैद्युतचुंबकीय प्रेरण पर उनके द्वारा किए गए प्रयोगों की शृंखला की व्याख्या करने वाले एक सरल गणितीय संबंध की खोज करना संभव हुआ। तथापि, इसके पहले कि हम वह नियम बताएँ तथा उसकी प्रशंसा में कुछ कहें, हमें चुंबकीय फ्लक्स Φ_B की अवधारणा से परिचित हो जाना आवश्यक है। चुंबकीय फ्लक्स को भी ठीक उसी प्रकार परिभाषित किया जाता है जिस प्रकार विद्युतीय फ्लक्स को अध्याय 1 में परिभाषित किया गया है।

© NCERT not to be republished

यदि क्षेत्रफल **A** वाले समतल को एकसमान चुंबकीय क्षेत्र **B** (चित्र 6.4) में रखा जाता है तो चुंबकीय फ्लक्स को व्यक्त किया जा सकता है –

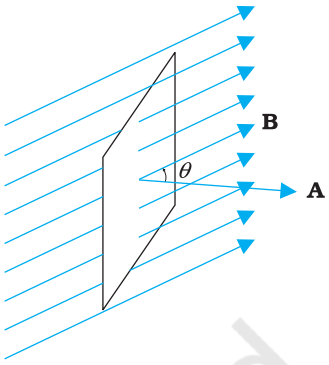
$$\Phi_B = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} = BA \cos\theta \qquad (6.1)$$

जहाँ पर θ **B** तथा **A** के बीच का कोण है। एक सदिश राशि के रूप में क्षेत्रफल की अवधारणा का विवेचन पहले ही अध्याय 1 में किया जा चुका है। समीकरण (6.1) को वक्र पृष्ठों एवं असमान क्षेत्रों के लिए विस्तारित किया जा सकता है।

यदि चित्र 6.5 में दर्शाए अनुसार किसी सतह के विभिन्न भागों पर चुंबकीय क्षेत्र के परिमाण तथा दिशाएँ भिन्न-भिन्न हों, तो सतह से होकर गुजरने वाला चुंबकीय फ्लक्स होगा

$$\Phi_B = \mathbf{B}_1 \cdot d\mathbf{A}_1 + \mathbf{B}_2 \cdot d\mathbf{A}_2 + \cdots = \sum_{\text{सभी}} \mathbf{B}_i \cdot d\mathbf{A}_i \qquad (6.2)$$

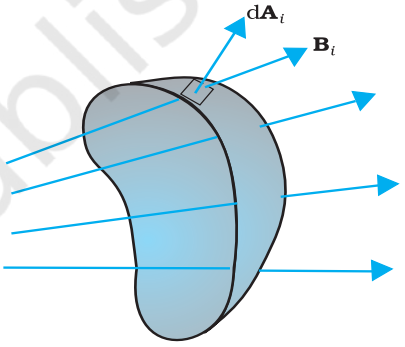
जहाँ 'सभी' का अर्थ है सतह के सभी सूक्ष्म क्षेत्र अवयवों $d\mathbf{A}_i$ के लिए योग तथा $\mathbf{B}_i$ क्षेत्र अवयव $d\mathbf{A}_i$ पर चुंबकीय क्षेत्र है। चुंबकीय फ्लक्स का SI मात्रक वेबर (Wb) है। इसे टेस्ला वर्ग मीटर (T m^2) द्वारा भी व्यक्त किया जाता है। चुंबकीय फ्लक्स एक अदिश राशि है।



चित्र 6.4 एकसमान चुंबकीय क्षेत्र **B** में रखा पृष्ठ क्षेत्रफल **A** वाला एक समतल।

6.4 फैराडे का प्रेरण का नियम

प्रायोगिक प्रेक्षणों के आधार पर फैराडे इस निष्कर्ष पर पहुँचे कि जब किसी कुंडली में चुंबकीय फ्लक्स समय के साथ परिवर्तित होता है तब कुंडली में विद्युत वाहक बल प्रेरित होता है। अनुभाग 6.2 में चर्चित प्रायोगिक प्रेक्षणों की इस अवधारणा का उपयोग करके व्याख्या कर सकते हैं।



चित्र 6.5 वे अवयव क्षेत्र पर चुंबकीय क्षेत्र B_i। dA_i, iवें क्षेत्र अवयव का क्षेत्र सदिश निरूपित करता है।

प्रयोग 6.1 में कुंडली C_1 की ओर अथवा इससे दूर चुंबक की गति तथा प्रयोग 6.2 में कुंडली C_1 की ओर अथवा इससे दूर एक धारा वाहक कुंडली C_2 की गति, कुंडली C_1 की ओर अथवा इससे दूर एक धारा वाहक कुंडली C_2 की गति, कुंडली C_1 से संबद्ध चुंबकीय फ्लक्स को परिवर्तित करती है। चुंबकीय फ्लक्स में परिवर्तन से कुंडली C_1 में विद्युत वाहक बल प्रेरित होता है। इसी प्रेरित विद्युत वाहक बल के कारण कुंडली C_1 तथा धारामापी में विद्युत धारा प्रवाहित होती है। प्रयोग 6.3 में किए गए प्रेक्षणों का एक युक्तियुक्त स्पष्टीकरण निम्न प्रकार है– जब दाब कुंजी K को दबाते हैं तो कुंडली C_2 में विद्युत धारा (तथा इसके कारण चुंबकीय क्षेत्र) अल्प समय में शून्य से अधिकतम मान तक बढ़ती है। परिणामस्वरूप, समीपस्थ कुंडली C_1 में भी चुंबकीय फ्लक्स बढ़ता है। कुंडली C_1 में होने वाले चुंबकीय फ्लक्स के इस परिवर्तन के कारण कुंडली C_1 में प्रेरित विद्युत वाहक बल उत्पन्न होता है। जब कुंजी को दबाकर रखा जाता है तो कुंडली C_2 में धारा स्थिर रहती है। इसीलिए कुंडली C_1 में चुंबकीय फ्लक्स में कोई परिवर्तन नहीं होता तथा कुंडली C_1 में धारा शून्य हो जाती है। जब कुंजी को छोड़ते हैं तो कुंडली C_2 में विद्युत धारा तथा इसके कारण उत्पन्न होने वाला चुंबकीय क्षेत्र अल्प समय में अधिकतम मान से घटकर शून्य हो जाता है। इसके परिणामस्वरूप कुंडली C_1* में चुंबकीय फ्लक्स घटता है और इस प्रकार कुंडली C_1 में पुनः प्रेरित विद्युत धारा उत्पन्न होती है। इन सभी प्रेक्षणों में एक सर्वनिष्ठ बात यह है कि किसी परिपथ में चुंबकीय फ्लक्स के परिवर्तन दर के कारण प्रेरित विद्युत वाहक बल उत्पन्न होता है। फैराडे ने प्रायोगिक प्रेक्षणों को एक नियम के रूप में व्यक्त किया जिसे *फैराडे का वैद्युतचुंबकीय*

* नोट कीजिए कि विद्युत चुंबक के समीप रखे सुग्राही विद्युत यंत्र विद्युत चुंबक को ऑन (ON) या ऑफ़ (OFF) करने पर उत्पन्न होने वाली धाराओं के कारण क्षतिग्रस्त हो जाते हैं।

© NCERT not to be republished

माइकल फैराडे (1791–1867)



माइकल फैराडे [1791–1867]
माइकल फैराडे ने विज्ञान के क्षेत्र में महत्वपूर्ण योगदान किया, उदाहरण के लिए वैद्युतचुंबकीय प्रेरण की खोज, विद्युत अपघटन के नियम, बेंजीन तथा यह तथ्य कि ध्रुवण तल विद्युत क्षेत्र में घूर्णन कर सकता है। विद्युत मोटर, विद्युत जनित्र तथा ट्रांसफार्मर की खोज का श्रेय भी फैराडे को ही जाता है। उन्हें उन्नीसवीं शताब्दी का महानतम प्रयोगात्मक वैज्ञानिक माना जाता है।

प्रेरण का नियम कहते हैं। इस नियम को निम्न प्रकार से अभिव्यक्त किया गया है।

प्रेरित विद्युत वाहक बल का परिमाण चुंबकीय फ्लक्स में समय के साथ होने वाले परिवर्तन की दर के बराबर होता है।

गणितीय रूप में प्रेरित विद्युत धारा बल को

$$\varepsilon = -\frac{\mathrm{d}\Phi_B}{\mathrm{d}t} \tag{6.3}$$

ऋण चिह्न ε की दिशा तथा परिणामतः बंद लूप में धारा की दिशा व्यक्त करता है। इसकी विस्तृत चर्चा हम अगले अनुच्छेद में करेंगे।

पास-पास लपेटे हुए N फेरों वाली किसी कुंडली के प्रत्येक फेरे से संबद्ध फ्लक्स में एकसमान परिवर्तन होता है। इसलिए कुल प्रेरित विद्युत वाहक बल का व्यंजक होगा–

$$\varepsilon = -N\frac{\mathrm{d}\Phi_B}{\mathrm{d}t} \tag{6.4}$$

बंद कुंडली में फेरों की संख्या N बढ़ा कर प्रेरित विद्युत वाहक बल को बढ़ाया जा सकता है।

समीकरण (6.1) तथा (6.2), से हमें ज्ञात होता है कि फ्लक्स में परिवर्तन **B**, **A** तथा θ में से किसी एक या अधिक पदों को बदल कर किया जा सकता है। अनुच्छेद 6.2 के प्रयोगों 6.1 तथा 6.2 में फ्लक्स को **B** में परिवर्तित करके बदला गया है। फ्लक्स में परिवर्तन चुंबकीय क्षेत्र में इसी कुंडली के आकार में परिवर्तन करके (जैसे इसे सिकोड़ कर या खींच कर) या कुंडली को चुंबकीय क्षेत्र में इस प्रकार घूर्णन कराकर कि **B** तथा **A** के बीच में कोण θ बदल जाए, भी किया जा सकता है। इन अवस्थाओं में भी क्रमानुसार कुंडलियों में एक विद्युत वाहक बल प्रेरित होता है।

उदाहरण 6.1

उदाहरण 6.1 प्रयोग 6.2 पर विचार करें। (a) धारामापी में अधिक विक्षेप प्राप्त करने के लिए आप क्या करेंगे? (b) धारामापी की अनुपस्थिति में आप प्रेरित धारा की उपस्थिति किस प्रकार दर्शाएँगे?

हल

(a) अधिक विक्षेप प्राप्त करने के लिए निम्न में से एक या अधिक उपाय किए जा सकते हैं– (i) कुंडली C_2 के अंदर नर्म लोहे की छड़ का उपयोग करेंगे, (ii) कुंडली को एक उच्च शक्ति की बैटरी से जोड़ेंगे, (iii) परीक्षण कुंडली C_1 की ओर संयोजन को अधिक तेजी से ले जाएँगे।

(b) धारामापी को टॉर्च में उपयोग किए जाने वाले छोटे बल्ब से बदल देंगे। दोनों कुंडलियों के बीच सापेक्ष गति से बल्ब क्षणिक अवधि के लिए चमकेगा जो प्रेरित धारा के उत्पन्न होने का द्योतक है।

प्रयोगात्मक भौतिकी में हमें नवीनता लाने का प्रयास करना चाहिए। उच्चतम श्रेणी के प्रयोग वैज्ञानिक माइकल फैराडे प्रयोगों में विविधता लाने के लिए प्रसिद्ध हैं।

उदाहरण 6.2

उदाहरण 6.2 एक वर्गाकार लूप जिसकी एक भुजा 10 cm लंबी है तथा जिसका प्रतिरोध 0.5 Ω है, पूर्व-पश्चिम तल में ऊर्ध्वाधर रखा गया है। 0.10 T के एक एकसमान चुंबकीय क्षेत्र को उत्तर-पूर्व दिशा में तल के आर-पार स्थापित किया गया है। चुंबकीय क्षेत्र को एकसमान दर से 0.70 s में घटाकर शून्य तक लाया जाता है। इस समय अंतराल में प्रेरित विद्युत वाहक बल तथा धारा का मान ज्ञात कीजिए।

© NCERT not to be republished

हल कुंडली का क्षेत्रफल-सदिश, चुंबकीय क्षेत्र के साथ $\theta = 45^\circ$ कोण बनाता है। समीकरण (6.1) से, प्रारंभिक चुंबकीय फ्लक्स है

$\Phi = BA \cos \theta$

$= \frac{0.1 \times 10^{-2}}{\sqrt{2}}$ Wb

अंतिम फ्लक्स, $\Phi_{\text{न्यूनतम}} = 0$

फ्लक्स में परिवर्तन 0.70 s में हुआ। समीकरण (6.3) से, प्रेरक विद्युत वाहक बल होगा

$$\varepsilon = \frac{|\Delta \Phi_B|}{\Delta t} = \frac{|(\Phi - 0)|}{\Delta t} = \frac{10^{-3}}{\sqrt{2} \times 0.7} = 1.0 \text{ mV}$$

और धारा का परिमाण होगा

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{10^{-3} \text{V}}{0.5 \Omega} = 2 \text{ mA}$$

ध्यान दें कि पृथ्वी का चुंबकीय क्षेत्र भी लूप में कुछ फ्लक्स उत्पन्न करता है। किन्तु पृथ्वी का चुंबकीय क्षेत्र स्थिर है (जो कि प्रयोग की अल्प अवधि में परिवर्तित नहीं होता) और कोई विद्युत वाहक बल प्रेरित नहीं करता।

उदाहरण 6.2

उदाहरण 6.3

10 cm त्रिज्या, 500 फेरों तथा 2 Ω प्रतिरोध की एक वृत्ताकार कुंडली को इसके तल के लंबवत पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र के क्षैतिज घटक में रखा गया है। इसे अपने ऊर्ध्व व्यास के परित: 0.25 s में 180º से घुमाया गया कुंडली में प्रेरित विद्युत वाहक बल तथा विद्युत धारा का आकलन कीजिए। दिए गए स्थान पर पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र के क्षैतिज घटक का मान 3.0×10^{-5} T है।

हल

कुंडली में प्रारंभिक फ्लक्स,

$\Phi_{\text{B (प्रारंभिक)}} = BA \cos \theta$

$= 3.0 \times 10^{-5} \times (\pi \times 10^{-2}) \times \cos 0^\circ$

$= 3\pi \times 10^{-7}$ Wb.

घूर्णन के पश्चात अंतिम फ्लक्स,

$\Phi_{\text{B (अंतिम)}} = 3.0 \times 10^{-5} \times (\pi \times 10^{-2}) \times \cos 180^\circ$

$= -3\pi \times 10^{-7}$ Wb

इसलिए प्रेरित विद्युत वाहक बल का आकलित मान है,

$$\varepsilon = N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

$= 500 \times (6\pi \times 10^{-7})/0.25$

$= 3.8 \times 10^{-3}$ V

$I = \varepsilon / R = 1.9 \times 10^{-3}$ A

ध्यान दें कि ये ε तथा I के परिमाणों के आकलित मान हैं। इनके तात्क्षणिक मान भिन्न हैं तथा वे किसी विशेष समय पर घूर्णन गति पर निर्भर करते हैं।

उदाहरण 6.3

© NCERT not to be republished

6.5 लेंज का नियम तथा ऊर्जा संरक्षण

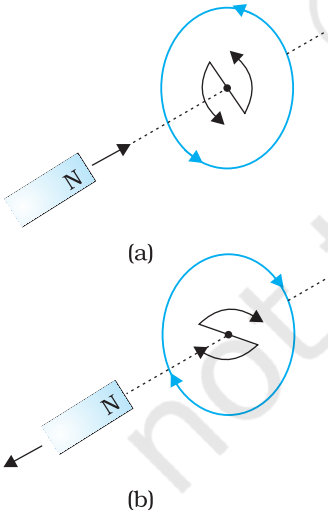
सन 1834 में जर्मन भौतिकविद हेनरिक फ्रेडरिच लेंज (1804-1865) ने एक नियम का निगमन किया जिसे *लेंज का नियम* के नाम से जाना जाता है। यह नियम प्रेरित विद्युत वाहक बल की ध्रुवता (दिशा) का स्पष्ट एवं संक्षिप्त रूप में वर्णन करता है। इस नियम का प्रकथन है–

प्रेरित विद्युत वाहक बल की ध्रुवता (polarity) इस प्रकार होती है कि वह उस दिशा में धारा प्रवाह प्रवृत्त करे जो उसे उत्पन्न करने वाले कारक (चुंबकीय क्षेत्र परिवर्तन) का विरोध करे।

समीकरण (6.3) में ऋण चिह्न इस प्रभाव को निरूपित करता है। अनुच्छेद 6.2.1 के प्रयोग 6.1 का निरीक्षण करके हम लेंज के नियम को समझ सकते हैं। चित्र 6.1 में हम देखते हैं कि दंड चुंबक का उत्तरी-ध्रुव बंद कुंडली की ओर ले जाया जा रहा है। जब दंड चुंबक का उत्तरी ध्रुव कुंडली की ओर गति करता है तब कुंडली में चुंबकीय फ्लक्स बढ़ता है। इस प्रकार कुंडली में प्रेरित धारा ऐसी दिशा में उत्पन्न होती है जिससे कि यह फ्लक्स के बढ़ने का विरोध कर सके। यह तभी संभव है जब चुंबक की ओर स्थित प्रेक्षक के सापेक्ष कुंडली में धारा वामावर्त दिशा में हो। ध्यान दीजिए, इस धारा से संबद्ध चुंबकीय आघूर्ण की ध्रुवता उत्तरी है जबकि इसकी ओर चुंबक का उत्तरी ध्रुव आ रहा हो। इसी प्रकार, यदि कुंडली में चुंबकीय फ्लक्स घटेगा। चुंबकीय फ्लक्स के इस घटने का विरोध करने के लिए कुंडली में प्रेरित धारा दक्षिणावर्त दिशा में बहती है तथा इसका दक्षिणी ध्रुव दूर हटते दंड चुंबक के उत्तरी ध्रुव की ओर होता है। इसके फलस्वरूप एक आकर्षण बल काम करेगा जो चुंबक की गति तथा इससे संबद्ध फ्लक्स के घटने का विरोध करेगा।

उपरोक्त उदाहरण में यदि बंद लूप के स्थान पर एक खुला परिपथ उपयोग किया जाए तो क्या होगा? इस दशा में भी, परिपथ के खुले सिरों पर एक प्रेरित विद्युत वाहक बल उत्पन्न होगा।

प्रेरित विद्युत वाहक बल की दिशा लेंज के नियम का उपयोग करके ज्ञात की जा सकती है। चित्र 6.6 (a) तथा (b) पर विचार करें। ये प्रेरित धाराओं की दिशा को समझने के लिए एक सरल विधि सुझाते हैं। ध्यान दीजिए कि ↻ तथा ↺ द्वारा दर्शायी गई दिशाएँ प्रेरित धारा की दिशाएँ निरूपित करती हैं।



चित्र 6.6
लेंज के नियम का चित्रण

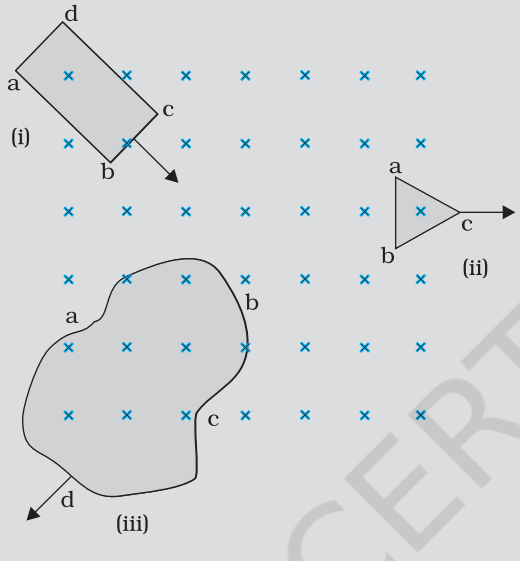
इस विषय पर थोड़े से गंभीर चिंतन से हम लेंज के नियम की सत्यता को स्वीकार कर सकते हैं। माना कि प्रेरित विद्युत धारा की दिशा चित्र 6.6(a) में दर्शायी गई दिशा के विपरीत है। उस दशा में, प्रेरित धारा के कारण दक्षिणी ध्रुव पास आते हुए चुंबक के उत्तरी ध्रुव की ओर होगा। इसके कारण दंड चुंबक कुंडली की ओर लगातार बढ़ते हुए त्वरण से आकर्षित होगा। चुंबक को दिया गया हलका-सा धक्का इस प्रक्रिया को प्रारंभ कर देगा तथा बिना किसी ऊर्जा निवेश के इसका वेग एवं गतिज ऊर्जा सतत रूप से बढ़ती जाएगी। यदि ऐसा हो सके तो उचित प्रबंध द्वारा एक शाश्वत गतिक मशीन (perpetual motion machine) का निर्माण किया जा सकता है। यह ऊर्जा के संरक्षण नियम का उल्लंघन है और इसीलिए ऐसा नहीं हो सकता।

अब चित्र 6.6(a) में दर्शायी गई सही स्थिति पर विचार करें। इस स्थिति में दंड चुंबक प्रेरित विद्युत धारा के कारण एक प्रतिकर्षण बल का अनुभव करता है। इसलिए चुंबक को गति देने के लिए हमें कार्य करना पड़ेगा। हमारे द्वारा खर्च की गई ऊर्जा कहाँ गई? वह ऊर्जा प्रेरित धारा द्वारा उत्पन्न जूल ऊष्मन के रूप में क्षयित होती है।

© NCERT not to be republished

उदाहरण 6.4

चित्र 6.7 में विभिन्न आकार के समतल लूप जो चुंबकीय क्षेत्र में प्रवेश कर रहे हैं अथवा क्षेत्र से बाहर निकल रहे हैं, दिखाए गए हैं। चुंबकीय क्षेत्र लूप के तल के अभिलंबवत किंतु प्रेक्षक से दूर जाते हुए हैं। लेंज के नियम का उपयोग करते हुए प्रत्येक लूप में प्रेरित विद्युत धारा की दिशा ज्ञात कीजिए।



चित्र 6.7

हल

(i) आयताकार लूप abcd में चुंबकीय फ्लक्स, लूप के चुंबकीय क्षेत्र के भाग की ओर गति करने के कारण बढ़ता है। प्रेरित धारा पथ bcdab के अनुदिश प्रवाहित होनी चाहिए जिससे कि यह बढ़ते हुए फ्लक्स का विरोध कर सके।

(ii) बाहर की ओर गति करने के कारण, त्रिभुजाकार लूप abc में चुंबकीय फ्लक्स घटता है जिसके कारण प्रेरित धारा bacb के अनुदिश प्रवाहित होती है, जिससे कि यह फ्लक्स परिवर्तन का विरोध कर सके।

(iii) चुंबकीय क्षेत्र से बाहर की ओर गति करने के कारण अनियमित आकार के लूप abcd में चुंबकीय फ्लक्स घटता है जिसके कारण प्रेरित धारा cdabc के अनुदिश प्रवाहित होती है जिससे कि यह फ्लक्स का विरोध कर सके।

नोट कीजिए कि जब तक लूप पूरी तरह से चुंबकीय क्षेत्र के अंदर या इससे बाहर रहता है तब कोई प्रेरित धारा उत्पन्न नहीं होती।

उदाहरण 6.4

उदाहरण 6.5

(a) एक बंद लूप, दो स्थिर रखे गए स्थायी चुंबकों के उत्तरी तथा दक्षिणी ध्रुवों के बीच चुंबकीय क्षेत्र में स्थिर रखा गया है। क्या हम अत्यंत प्रबल चुंबकों का उपयोग करके लूप में धारा उत्पन्न होने की आशा कर सकते हैं।

(b) एक बंद लूप विशाल संधारित्र की प्लेटों के बीच स्थिर विद्युत क्षेत्र के अभिलंबवत गति करता है। क्या लूप में प्रेरित धारा उत्पन्न होगी (i) जब लूप संधारित्र की प्लेटों के पूर्णतः अंदर हो (ii) जब लूप आंशिक रूप से प्लेटों के बाहर हो? विद्युत क्षेत्र लूप के तल के अभिलंबवत है।

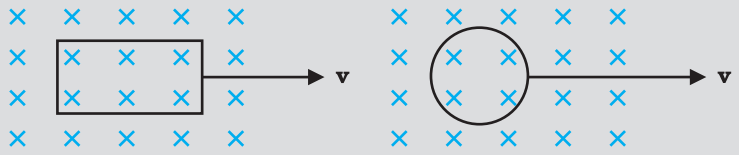
(c) एक आयताकार लूप एवं एक वृत्ताकार लूप एकसमान चुंबकीय क्षेत्र में से (चित्र 6.8) क्षेत्र विहीन भाग में *एकसमान वेग* **v** से निकल रहे हैं। चुंबकीय क्षेत्र से बाहर निकलते समय, आप

उदाहरण 6.5

© NCERT not to be republished

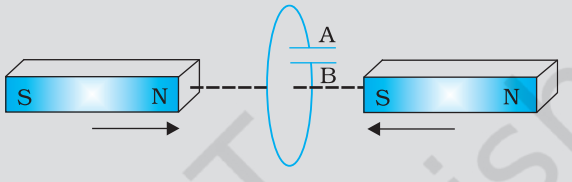
उदाहरण 6.5

किस लूप में प्रेरित विद्युत वाहक बल के स्थिर होने की अपेक्षा करते हैं? क्षेत्र, लूपों के तल के अभिलंबवत है।



चित्र 6.8

(d) चित्र 6.9 में वर्णित स्थिति के लिए संधारित्र की ध्रुवता की प्रागुक्ति (Predict) कीजिए।



चित्र 6.9

हल

(a) नहीं। चुंबक चाहे कितना भी प्रबल हो, प्रेरित धारा तभी उत्पन्न होगी जब लूप में से चुंबकीय फ्लक्स परिवर्तित हो।

(b) नहीं। विद्युत फ्लक्स परिवर्तित करके प्रेरित धारा प्राप्त नहीं हो सकती।

(c) आयताकार लूप के लिए प्रेरित विद्युत वाहक बल के स्थिर रहने की अपेक्षा कर सकते हैं। वृत्ताकार लूप में क्षेत्र के प्रभाव से बाहर निकलते समय लूप के क्षेत्रफल के परिवर्तन की दर स्थिर नहीं है, अतः प्रेरित विद्युत वाहक बल तदनुसार बदलेगा।

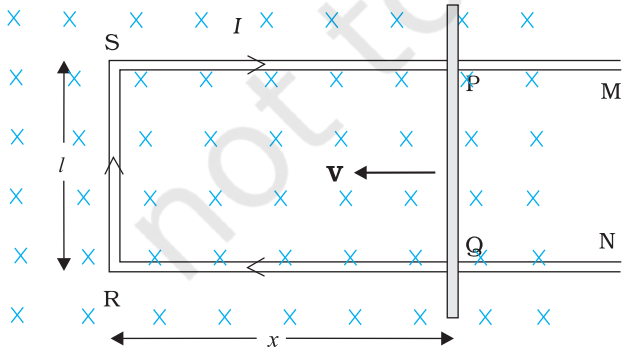
(d) संधारित्र की प्लेट 'A' की ध्रुवता प्लेट 'B' के सापेक्ष धनात्मक होगी।

6.6 गतिक विद्युत वाहक बल

किसी एकसमान, काल स्वतंत्र (time independent) चुंबकीय क्षेत्र में एक गतिमान ऋजु चालक पर विचार कीजिए। चित्र 6.10 में एक आयताकार चालक PQRS दर्शाया गया है जिसमें चालक PQ स्वतंत्र रूप से गति कर सकता है। छड़ PQ को स्थिर वेग **v** से बाईं ओर, चित्र में दर्शाए अनुसार, चलाया जाता है। मान लीजिए कि घर्षण के कारण किसी प्रकार का ऊर्जा का क्षय नहीं हो रहा है। PQRS एक बंद परिपथ बनाता है जिससे घिरा क्षेत्रफल PQ की गति के कारण परिवर्तित होता है। इसे एकसमान चुंबकीय क्षेत्र **B** में इस प्रकार रखा जाता है कि इसका तल चुंबकीय क्षेत्र के अभिलंबवत हो। यदि लंबाई RQ = x तथा RS = l, तो लूप PQRS से घिरा चुंबकीय फ्लक्स Φ_B होगा

$$\Phi_B = Blx$$

क्योंकि x समय के साथ बदल रहा है, फ्लक्स Φ_B के परिवर्तन की दर के कारण एक प्रेरित विद्युत वाहक बल उत्पन्न होगा जिसका मान होगा



चित्र 6.10 भुजा PQ बाईं ओर गतिमान है जिससे आयताकार लूप का क्षेत्रफल घट जाता है। इस गति के कारण दर्शाए अनुसार प्रेरित धारा I उत्पन्न होती है।

© NCERT not to be republished

$$\varepsilon = \frac{-\mathrm{d}\Phi_B}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(Blx)$$

$$= -Bl\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = Blv \qquad (6.5)$$

जहाँ हमने $\mathrm{d}x/\mathrm{d}t = -v$ लिया है जो कि चालक PQ की चाल है। प्रेरित विद्युत वाहक बल Blv को *गतिक विद्युत वाहक बल* कहते हैं। इस प्रकार हम चुंबकीय क्षेत्र को परिवर्तित करने की बजाय किसी चालक को गतिमान करके, किसी परिपथ द्वारा घिरे चुंबकीय फ्लक्स में परिवर्तन करके प्रेरित विद्युत वाहक बल उत्पन्न कर सकते हैं।

समीकरण (6.5) में दर्शाए गए गतिक विद्युत वाहक बल के व्यंजक को चालक PQ के स्वतंत्र आवेशों पर कार्य करने वाले लोरेंज बल की सहायता से भी समझाना संभव है। चालक PQ में कोई यादृच्छिक (arbitrary) आवेश q पर विचार करें। जब छड़ चाल v से गति करती है तो आवेश भी चुंबकीय क्षेत्र **B** में चाल v से गति करेगा। इस आवेश पर लोरेंज बल का परिमाण qvB है तथा इसकी दिशा Q के अनुदिश होगी। प्रत्येक आवेश परिमाण तथा दिशा में, छड़ PQ में उनकी स्थिति के निरपेक्ष, समान बल का अनुभव करेंगे।

आवेश को P से Q तक ले जाने में किया गया कार्य है, $W = qvBl$

चूँकि प्रति इकाई आवेश पर किया गया कार्य ही विद्युत वाहक बल है, अत:

$$\varepsilon = \frac{W}{q} = Blv$$

यह समीकरण छड़ PQ के सिरों के बीच प्रेरण द्वारा उत्पन्न हुए विद्युत वाहक बल का मान बताती है तथा समीकरण (6.5) के तुल्य है। हम इस बात को जोर देकर कहना चाहते हैं कि हमारी यह प्रस्तुति पूर्णत: यथार्थ नहीं है। परंतु यह किसी एकसमान एवं समय के साथ न बदलने वाले चुंबकीय क्षेत्र में गतिमान चालक के लिए फैराडे के नियम का आधार समझने में हमारी सहायता करती है।

दूसरी ओर, यह स्पष्ट नहीं होता है कि जब चालक स्थिर हो और चुंबकीय क्षेत्र परिवर्तित हो रहा हो तो इसमें emf कैसे प्रेरित होता है – जो एक ऐसा तथ्य है जो फैराडे के अनेक प्रयोग द्वारा पुष्ट होता है। स्थिर चालक के लिए इसके आवेशों पर लगने वाला बल,

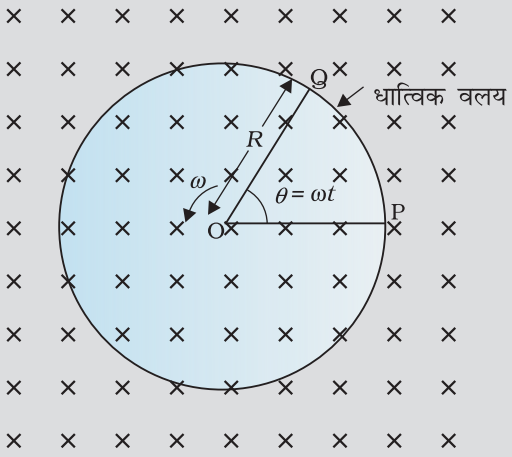
$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) = q\mathbf{E} \qquad (6.6)$$

क्योंकि $\mathbf{v} = 0$ है, अत: आवेश पर लगने वाला कोई भी बल केवल विद्युत क्षेत्र **E** के कारण होगा। इसलिए प्रेरित विद्युत वाहक बल या प्रेरित धारा के अस्तित्व की व्याख्या करने के लिए हमें यह मान लेना चाहिए कि समय के साथ परिवर्तनशील चुंबकीय क्षेत्र एक विद्युतीय क्षेत्र भी उत्पन्न करता है। तथापि, साथ ही हम यह भी कहना चाहेंगे कि स्थिर विद्युत आवेशों द्वारा उत्पन्न विद्युत क्षेत्र समय के साथ बदलते चुंबकीय क्षेत्रों द्वारा उत्पन्न विद्युत क्षेत्रों से भिन्न गुण रखते हैं। अध्याय 4 में हमने अध्ययन किया कि गतिमान आवेश (विद्युत धारा) स्थिर चुंबक पर बल/बल युग्म आरोपित कर सकते हैं। इसके विपरीत एक गतिमान दंड चुंबक (या अधिक व्यापक रूप में कहें तो एक परिवर्तनशील चुंबकीय क्षेत्र) स्थिर आवेश पर एक बल आरोपित कर सकता है। यही फैराडे की खोज की मूलभूत महत्ता है। विद्युत एवं चुंबकत्व परस्पर संबंधित होते हैं।

उदाहरण 6.6 एक मीटर लंबी धातु की एक छड़ को 50 चक्कर/सेंकड की आवृत्ति से घुमाया गया है। छड़ का एक सिरा वृत्ताकार धात्विक वलय जिसकी त्रिज्या 1 मीटर है, के केन्द्र पर तथा दूसरा सिरा वलय की परिधि पर कब्ज़े से इस प्रकार जुड़ा है कि छड़ की गति वलय के केन्द्र से जाने वाले तथा वलय के तल में अभिलंबवत अक्ष के परित: है (चित्र 6.11)। अक्ष के अनुदिश एक स्थिर तथा एकसमान चुंबकीय क्षेत्र 1 T सर्वत्र उपस्थित है। केन्द्र तथा धात्विक वलय के बीच विद्युत वाहक बल क्या होगा?

उदाहरण 6.6

© NCERT not to be republished



चित्र 6.11

हल

प्रथम विधि :

जब छड़ घूर्णन करती है तो छड़ में मुक्त इलेक्ट्रॉन लोरेंज बल के कारण बाहरी सिरे की ओर गति करते हैं तथा वलय के ऊपर वितरित हो जाते हैं। इस प्रकार, आवेशों के परिणामी पृथक्करण के कारण छड़ के सिरों के बीच एक विद्युत वाहक बल उत्पन्न होता है। विद्युत वाहक बल के एक निश्चित मान के लिए इलेक्ट्रॉनों का और अधिक प्रवाह नहीं होता तथा एक स्थायी दशा पहुँच जाती है। समीकरण (6.5) का उपयोग करने पर, जब छड़ चुंबकीय क्षेत्र के लंबवत गतिमान है तो इसकी लंबाई dr के आर-पार उत्पन्न विद्युत वाहक बल का परिमाण प्राप्त होगा

$d\varepsilon = Bv\,dr$ अतः,

$$\varepsilon = \int d\varepsilon = \int_0^R Bv\,dr = \int_0^R B\omega r\,dr = \frac{B\omega R^2}{2}$$

नोट कीजिए कि हमने $v = \omega r$ उपयोग किया है। इससे प्राप्त होता है

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \times 1.0 \times 2\pi \times 50 \times (1^2)$$

$= 157$ V

द्वितीय विधि–

विद्युत वाहक बल की गणना करने के लिए हम एक बंद लूप OPQ की कल्पना करते हैं जिसमें बिंदु O तथा P को प्रतिरोध R से जोड़ा गया है तथा OQ घूमती हुई छड़ है। प्रतिरोध के आर-पार विभवान्तर प्रेरित विद्युत वाहक बल के बराबर होगा तथा ये $B \times$ (लूप के क्षेत्रफल परिवर्तन की दर) के बराबर होगा। यदि t समय पर छड़ तथा P पर वृत्त की त्रिज्या के बीच का कोण θ है, तो खंड OPQ का क्षेत्रफल प्राप्त होगा

$$\pi R^2 \times \frac{\theta}{2\pi} = \frac{1}{2} R^2\theta$$

जहाँ पर R वृत्त की त्रिज्या है। अतः प्रेरित विद्युत वाहक बल है

$$\varepsilon = B \times \frac{d}{dt}\left[\frac{1}{2}R^2\theta\right] = \frac{1}{2}BR^2\frac{d\theta}{dt} = \frac{B\omega R^2}{2}$$

[नोट कीजिए : $\frac{d\theta}{dt} = \omega = 2\pi\nu$]

यह व्यंजक प्रथम विधि द्वारा प्राप्त व्यंजक के अनुरूप ही है और हम ε का समान मान पाते हैं।

उदाहरण 6.6

© NCERT not to be republished

उदाहरण 6.7

एक पहिया जिसमें 0.5 m लंबे 10 धात्विक स्पोक (spokes) हैं, को 120 चक्र प्रति मिनट की दर से घुमाया जाता है। पहिये का घूर्णन तल उस स्थान पर पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र के क्षैतिज घटक H_E के अभिलंबवत है। उस स्थान पर यदि $H_E = 0.4$ G है तो पहिये की धुरी (axle) तथा रिम के मध्य स्थापित प्रेरित विद्युत वाहक बल का मान क्या होगा? नोट कीजिए 1 G = 10^{-4} T

हल

प्रेरित विद्युत वाहक बल = $(1/2)\,\omega B R^2$

$= (1/2) \times 4\pi \times 0.4 \times 10^{-4} \times (0.5)^2$

$= 6.28 \times 10^{-5}$ V

क्योंकि स्पोक के आरपार विद्युत वाहक बल समांतर हैं इसलिए उनकी संख्या का कोई प्रभाव नहीं पड़ता।

उदाहरण 6.7

6.7 ऊर्जा दृष्टि : एक परिमाणात्मक अध्ययन

अनुच्छेद 6.5 के अंतर्गत हमने गुणात्मक विवेचन द्वारा यह दर्शाया कि लेंज का नियम ऊर्जा संरक्षण सिद्धांत के अनुरूप या सुसंगत है। अब हम इसी पक्ष को अधिक ठोस उदाहरण द्वारा देखेंगे।

मान लीजिए कि चित्र 6.10 में दर्शाए आयताकार चालक की चल भुजा (movable arm) PQ का प्रतिरोध r है। हमने यह मान लिया है कि अन्य भुजाओं QR, RS तथा SP का प्रतिरोध r की तुलना में नगण्य है। इस प्रकार आयताकार लूप का नेट प्रतिरोध r होगा तथा PQ की गति से भी यह नहीं बदलेगा। लूप में धारा I है,

$$I = \frac{\varepsilon}{r}$$

$$= \frac{Blv}{r} \qquad (6.7)$$

चुंबकीय क्षेत्र की उपस्थिति के कारण, भुजा PQ पर एक बल कार्य करेगा। यह बल I (**l × B**) छड़ के वेग की दिशा के विपरीत बहिर्मुखी निर्दिष्ट होगा। इस बल का परिमाण है

$$F = IlB = \frac{B^2 l^2 v}{r}$$

यहाँ हमने समीकरण (6.7) का उपयोग किया है। नोट कीजिए कि यह बल छड़ के अनुदिश (धारा के लिए उत्तरदायी) आवेशों के अपवाह वेग (drift velocity) तथा उनके परिणामस्वरूप प्रभावी होने वाले लोरेंज बलों के कारण उत्पन्न होता है।

क्योंकि भुजा PQ को एक स्थिर चाल v से धकेला जाता है,

इस क्रिया में प्रयुक्त शक्ति

$$P = Fv$$

$$= \frac{B^2 l^2 v^2}{r} \qquad (6.8)$$

इस कार्य को करने वाला एजेंट यांत्रिक है। इस यांत्रिक ऊर्जा का क्या हुआ? उत्तर है कि यह यांत्रिक ऊर्जा जूल ऊष्मा के रूप में क्षयित हो गई तथा इसका मान है

$$P_J = I^2 r = \left(\frac{Blv}{r}\right)^2 r = \frac{B^2 l^2 v^2}{r}$$

जो समीकरण (6.8) के सर्वसम है।

© NCERT not to be republished

इस प्रकार भुजा PQ को चलाने में प्रयुक्त हुई यांत्रिक ऊर्जा विद्युतीय ऊर्जा में परिवर्तित हुई (प्रेरित विद्युत वाहक बल) तथा अंततः ऊष्मीय ऊर्जा में बदल गई।

परिपथ में आवेश प्रवाह तथा चुंबकीय फ्लक्स के परिवर्तन में भी एक रोचक संबंध है। फैराडे के नियम से, हमने सीखा है कि प्रेरित विद्युत वाहक बल का परिमाण है

$$|\varepsilon| = \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}$$

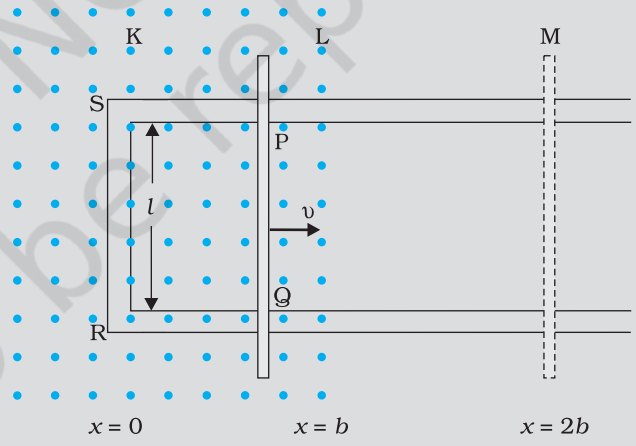
परंतु,

$$|\varepsilon| = Ir = \frac{\Delta Q}{\Delta t} r$$

इसलिए,

$$\Delta Q = \frac{\Delta \Phi_B}{r}$$

उदाहरण 6.8 चित्र 6.12 (a) को देखिए। आयताकार चालक की भुजा PQ को $x = 0$ से दायीं ओर चलाया जाता है। एकसमान चुंबकीय क्षेत्र तल के लंबवत है तथा $x = 0$ से $x = b$ तक विस्तारित है तथा $x > b$ के लिए शून्य है। केवल भुजा PQ में ही पर्याप्त प्रतिरोध r है। उस स्थिति की कल्पना कीजिए जब भुजा PQ को $x = 0$ से $x = 2b$ तक, बाहर की ओर खींचा जाता है तथा पुनः स्थिर चाल v से $x = 0$ तक वापस ले जाते हैं। फ्लक्स, प्रेरित विद्युत वाहक बल, भुजा को खींचने के लिए आवश्यक बल तथा जूल ऊष्मा के रूप में क्षयित शक्ति के लिए व्यंजक प्राप्त कीजिए। इन राशियों में दूरी के साथ होने वाले परिवर्तन का ग्राफ भी खींचिए।



चित्र 6.12 (a)

हल सर्वप्रथम अग्र गति $x = 0$ से $x = 2b$ पर विचार करते हैं।

परिपथ SPQR से संबद्ध फ्लक्स है,

$$\Phi_B = Blx \qquad 0 \le x < b$$
$$= Blb \qquad b \le x < 2b$$

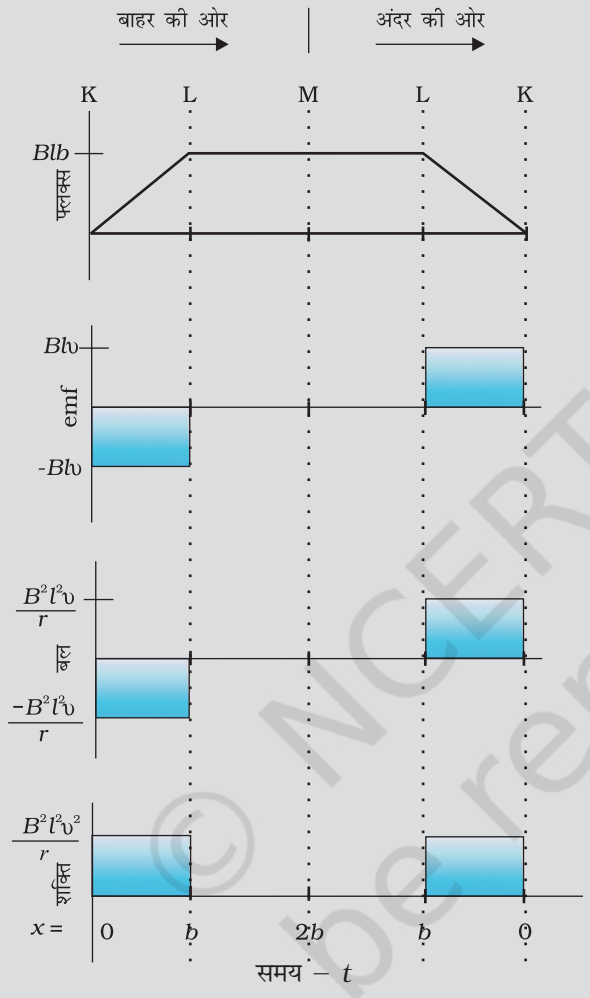
प्रेरित विद्युत वाहक बल है,

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$
$$= -Blv \qquad 0 \le x < b$$
$$= 0 \qquad b \le x < 2b$$

उदाहरण 6.8

© NCERT not to be republished

जब प्रेरित विद्युत वाहक बल शून्य नहीं है, तब धारा I (का परिमाण) $I = \frac{Blv}{r}$ है।



चित्र 6.12 (b)

भुजा PQ को स्थिर गति देने हेतु आवश्यक बल IlB होगा। इसकी दिशा बाईं ओर होगी। इसका परिमाण

$$F = \frac{B^2l^2v}{r} \qquad 0 \le x < b$$
$$= 0 \qquad b \le x < 2b$$

जूल ऊष्मन क्षय है

$$P_J = I^2r$$
$$= \frac{B^2l^2v^2}{r} \qquad 0 \le x < b$$
$$= 0 \qquad b \le x < 2b$$

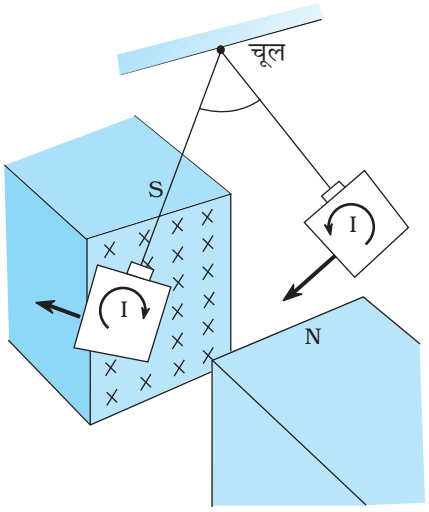
इसी प्रकार का व्यंजक भुजा PQ के अंदर की ओर $x = 2b$ से $x = 0$ तक की गति के लिए प्राप्त होता है। चित्र 6.12 (b) में प्रदर्शित विभिन्न राशियों के आरेख को देखकर कोई भी संपूर्ण प्रक्रिया को समझ सकता है।

उदाहरण 6.8

© NCERT not to be republished

6.8 भँवर धाराएँ

अभी तक हमने चालकों से बने वृत्ताकार लूपों जैसे सुपरिभाषित पथों में, प्रेरित हुई विद्युत धाराओं के विषय में अध्ययन किया है। लेकिन जब चालकों के स्थूल टुकड़ों को परिवर्तनशील चुंबकीय फ्लक्स के प्रभाव में रखते हैं तो उनमें भी प्रेरित धाराएँ उत्पन्न होती हैं। तथापि, उनके प्रवाह का पैटर्न पानी में चक्कर खाते भँवरों से मिलता है। इस प्रभाव को भौतिकविद फोको (1819-1868) ने खोजा तथा इन धाराओं को *भँवर धाराएँ* कहते हैं।

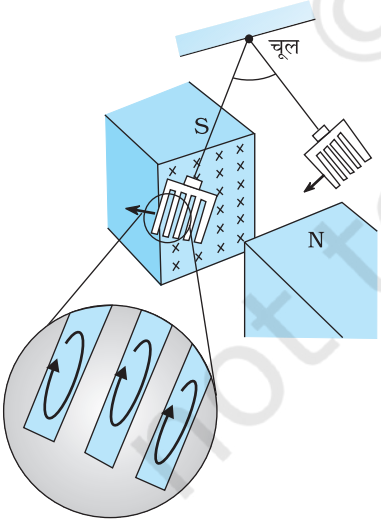


चित्र 6.13 ताम्र पट्टिका जब चुंबकीय क्षेत्र में अंदर बाहर आती-जाती है तो इसमें भँवर धाराएँ उत्पन्न होती हैं।

चित्र 6.13 में दर्शाए उपकरण पर विचार करें। इसमें एक ताम्र पट्टिका को एक शक्तिशाली चुंबक के ध्रुवों के बीच सरल लोलक की भाँति दोलित कराते हैं। यह देखा गया कि पट्टिका की गति अवमंदित है तथा कुछ ही क्षणों में वह चुंबकीय क्षेत्र में विराम अवस्था में आ जाती है। इस परिघटना की व्याख्या हम विद्युत चुंबकीय प्रेरण के आधार पर कर सकते हैं। जब पट्टिका चुंबकीय ध्रुवों के क्षेत्र में अंदर और बाहर गति करती है तो पट्टिका से संबद्ध चुंबकीय फ्लक्स परिवर्तित होता रहता है। फ्लक्स में परिवर्तन पट्टिका में भँवर धाराएँ प्रेरित करता है। जब पट्टिका दोलन करते हुए ध्रुवों के क्षेत्र के बीच में प्रवेश करती है तथा जब यह उस क्षेत्र से बाहर निकलती है तो भँवर धाराओं की दिशा विपरीत होती है।

यदि ताँबे की पट्टिका में चित्र 6.14 में दर्शाए अनुसार आयताकार खाँचे बनाए जाते हैं तो भँवर धाराओं के प्रवाह के लिए उपलब्ध क्षेत्रफल कम हो जाता है। इस प्रकार लोलक पट्टिका में छिद्र अथवा खाँचे विद्युत चुंबकीय अवमंदन को कम कर देते हैं तथा पट्टिका अधिक स्वतंत्रतापूर्वक दोलन करती है। नोट कीजिए कि प्रेरित धाराओं का चुंबकीय आघूर्ण (जो गति का विरोध करता है) धाराओं द्वारा परिबद्ध क्षेत्रफल पर निर्भर है (अध्याय 4 में समीकरण $\mathbf{m} = I\mathbf{A}$ का स्मरण कीजिए)।

यह तथ्य ट्रांसफार्मरों की धात्विक क्रोड में, विद्युत मोटरों तथा दूसरी ऐसी अन्य युक्तियों में जिनमें किसी धात्विक क्रोड पर कुंडली को लपेटना होता है, भँवर धाराओं को कम करने में सहायक है। भँवर धाराएँ अवांछनीय हैं क्योंकि ये क्रोड को गर्म करती हैं तथा विद्युत ऊर्जा का ऊष्मा के रूप में क्षय करती हैं। धात्विक क्रोड बनाने के लिए स्तरित धातु (Laminated) का उपयोग करके भँवर धाराओं को कम किया जा सकता है। स्तरों को कुचालक पदार्थ, जैसे लैकर (lacquer) से, पृथक्कृत करते हैं। स्तरों के तल को चुंबकीय क्षेत्र के समांतर व्यवस्थित करना आवश्यक है जिससे कि वे भँवर धाराओं के पथों को आरपार काट सकें। यह प्रबंध भँवर धाराओं की प्रबलता को घटा देता है। क्योंकि विद्युत ऊर्जा का ऊष्मा में क्षय विद्युत धारा की प्रबलता के वर्ग पर निर्भर है इसलिए ऊष्मा-हानि पर्याप्त मात्रा में कम हो जाती है।



चित्र 6.14 ताम्र पट्टिका में खाँचे बनाने से इसमें भँवर धाराओं का प्रभाव कम हो जाता है।

भँवर धाराएँ कुछ अनुप्रयोगों में उपयोग की जाती हैं, जैसे —

(i) *रेलगाड़ियों में चुंबकीय ब्रेक में*– कुछ विद्युत चालित रेलगाड़ियों में पटरियों के ऊपर प्रबल विद्युत चुंबक स्थित होते हैं। जब विद्युत चुंबकों को सक्रियित किया जाता है तो पटरियों में प्रेरित भँवर धाराएँ रेलगाड़ी की गति का विरोध करती हैं। क्योंकि यहाँ कोई यांत्रिक संयोजन नहीं है इसलिए ब्रेक के कारण किसी प्रकार के झटके नहीं लगेंगे।

(ii) *विद्युत चुंबकीय अवमंदन*– कुछ धारामापियों की क्रोड स्थिर होती है तथा अचुंबकीय धात्विक पदार्थों की बनी होती है। जब कुंडली दोलन करती है तो क्रोड में उत्पन्न होने वाली भँवर धाराएँ इसकी गति का विरोध करती हैं तथा कुंडली को तेजी से विरामावस्था में ले आती हैं।

© NCERT not to be republished

(iii) *प्रेरण भट्टी*– प्रेरण भट्टी उच्च ताप उत्पन्न करने के लिए उपयोग की जा सकती है तथा घटक धातुओं को पिघला कर मिश्र धातु तैयार करने के काम आ सकती है। एक कुंडली में उच्च आवृत्ति की प्रत्यावर्ती धारा (alternating current) प्रवाहित की जाती है। यह कुंडली उन धातुओं को घेरे होती है जिनको पिघलाना होता है। धातुओं में उत्पन्न होने वाली भँवर धाराएँ उच्च ताप उत्पन्न करती हैं जो उन धातुओं को पिघलाने के लिए पर्याप्त होता है।

(iv) *विद्युत शक्ति मीटर*– विद्युत शक्ति मीटर (अनुरूप प्रकार) में धातु की चमकदार डिस्क भँवर धाराओं के कारण ही घूर्णन करती है। कुंडली में ज्यावक्रीय (sinusoidally) परिवर्ती धाराओं से उत्पन्न चुंबकीय क्षेत्रों से डिस्क में प्रेरित विद्युत धाराएँ उत्पन्न होती हैं।

आप अपने घर के बिजली के मीटर में घूर्णन करती चमकदार डिस्क को देख सकते हैं।

विद्युत चुंबकीय अवमंदन

ऐलुमिनियम तथा पीवीसी (PVC) के बने समान आंतरिक व्यासों के दो पतले खोखले बेलनाकार पाइप लीजिए। इन्हें क्लैंप की सहायता से रिटॉर्ट स्टैंड पर ऊर्ध्वाधरत: लगाइए। एक छोटा बेलनाकार चुंबक लीजिए जिसका व्यास पाइपों के आंतरिक व्यास से थोड़ा-सा कम हो। इसे प्रत्येक पाइप में इस प्रकार गिराइए कि गिरते समय चुंबक पाइपों की दीवारों को न छुए। नोट कीजिए कि प्रत्येक दशा में पाइप से बाहर आने में यह कितना समय लेता है। आप देखेंगे कि पीवीसी (PVC) के बने पाइप में गिरते समय चुंबक पाइप से बाहर आने में उतना ही समय लेता है जितना कि वह उसी ऊँचाई तक बिना पाइप के गिरते समय लेता। आप यह भी देखेंगे कि ऐलुमिनियम के पाइप में गिरते समय चुंबक अपेक्षाकृत काफी समय लेता है। ऐसा क्यों है? यह उन भँवर धाराओं के कारण है जो कि ऐलुमिनियम के पाइप में उत्पन्न होकर, जो चुंबकीय फ्लक्स में, परिवर्तन का अर्थात चुंबक की गति का विरोध करती है। भँवर धाराओं के कारण उत्पन्न मंदक बल चुंबक की गति का निरोध करता है। इस प्रकार की परिघटनाओं को *विद्युत चुंबकीय अवमंदन* कहते हैं। नोट कीजिए कि पीवीसी (PVC) पाइप में भँवर धाराएँ उत्पन्न नहीं होतीं क्योंकि इसका पदार्थ विद्युत रोधी है जबकि ऐलुमिनियम चालक है।

6.9 प्रेरकत्व

एक कुंडली के निकट रखी दूसरी कुंडली में फ्लक्स परिवर्तन से अथवा उसी कुंडली में फ्लक्स परिवर्तन से, उस कुंडली में विद्युत धारा प्रेरित हो सकती है। ये दोनों स्थितियाँ अगले दो उपखंडों में अलग-अलग वर्णित की गई हैं। तथापि, इन दोनों स्थितियों में, कुंडली में फ्लक्स धारा के समानुपाती है। अर्थात् $\Phi_B \propto I$

इसके अतिरिक्त यदि समय के साथ कुंडली की ज्यामिति नहीं बदलती, तब

$$\frac{d\Phi_B}{dt} \propto \frac{dI}{dt}$$

समीप-समीप लिपटे N फेरों (turns) वाली कुंडली के सभी फेरों से समान चुंबकीय फ्लक्स संबद्ध होता है। जब कुंडली में फ्लक्स Φ_B परिवर्तित होता है तो प्रत्येक फेस प्रेरित विद्युत वाहक बल में योगदान करता है। इसलिए एक पद *फ्लक्स-बंधता* (flux linkage) का उपयोग होता है जो कि पास-पास लिपटी कुंडली के लिए $N\Phi_B$ के बराबर है तथा इस स्थिति में

$$N\Phi_B \propto I$$

इस संबंध में समानुपातिक स्थिरांक को *प्रेरकत्व* कहते हैं। हम देखेंगे कि प्रेरकत्व का मान कुंडली की ज्यामिति तथा उसके पदार्थ के नैज (intrinsic) गुणधर्मों पर निर्भर करता है। यह पक्ष

© NCERT not to be republished

धारिता की प्रकृति के समान है जो समांतर प्लेट संधारित्र के लिए प्लेट के क्षेत्रफल तथा प्लेट-पृथक्करण (ज्यामिति) तथा उनके बीच उपस्थित माध्यम के परावैद्युतांक K (पदार्थ के नैज गुणधर्म) पर निर्भर करती है।

प्रेरकत्व एक अदिश राशि है। इसकी विमाएँ $[M L^2 T^{-2} A^{-2}]$ हैं जो कि फ्लक्स की विमाओं तथा धारा की विमाओं के अनुपात द्वारा व्यक्त की जाती हैं। प्रेरकत्व की SI मात्रक *हेनरी* है तथा इसे H द्वारा व्यक्त किया जाता है। यह नाम *जोसेफ हेनरी* के सम्मान में रखा गया है जिन्होंने इंग्लैंड के वैज्ञानिक फैराडे से अलग अमेरिका में वैद्युत चुंबकीय प्रेरण की खोज की।

6.9.1 अन्योन्य प्रेरकत्व

चित्र 6.15 में दर्शायी गई दो लंबी समाक्षी (co-axial) परिनालिकाओं (solenoids) जिनकी प्रत्येक की लंबाई l है, पर विचार कीजिए। हम अंत: परिनालिका S_1 की त्रिज्या r_1 तथा उसकी इकाई लंबाई में फेरों की संख्या को n_1 द्वारा व्यक्त करते हैं। बाह्य परिनालिका S_2 के लिए संगत राशियाँ क्रमश: r_2 तथा n_2 हैं। मान लीजिए N_1 तथा N_2 क्रमश: कुंडलियों S_1 तथा S_2 में फेरों की कुल संख्या है।

जब S_2 में धारा I_2 प्रवाहित करते हैं तो यह S_1 में एक चुंबकीय फ्लक्स स्थापित करती है। हम इसे Φ_1 से निर्दिष्ट करते हैं। परिनालिका S_1 में संगत फ्लक्स-बंधता है

$$N_1 \Phi_1 = M_{12} I_2 \qquad (6.9)$$

M_{12} को परिनालिका S_1 का परिनालिका S_2 के सापेक्ष *अन्योन्य प्रेरकत्व* कहते हैं। इसे *अन्योन्य प्रेरक गुणांक* भी कहा जाता है।

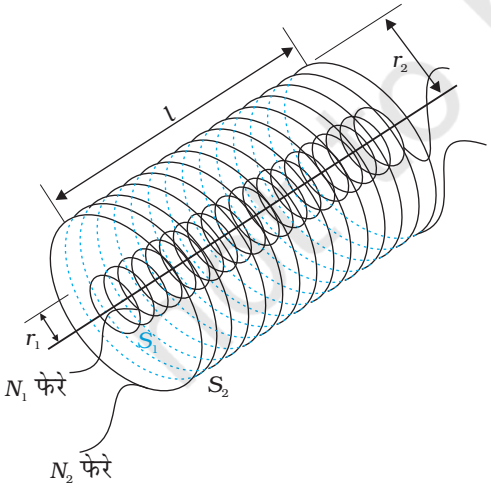
इन सरल समाक्षी परिनालिकाओं के लिए M_{12} की गणना संभव है। परिनालिका S_2 में स्थापित विद्युत धारा I_2 द्वारा उत्पन्न चुंबकीय क्षेत्र है $\mu_0 n_2 I_2$। कुंडली S_1 के साथ परिणामी फ्लक्स-बंधता है

$$N_1 \Phi_1 = (n_1 l)\left(\pi r_1^2\right)\left(\mu_0 n_2 I_2\right)$$

$$= \mu_0 n_1 n_2 \pi r_1^2 l I_2 \qquad (6.10)$$

जहाँ $n_1 l$ परिनालिका S_1 में कुल फेरों की संख्या है। इस प्रकार, समीकरण (6.9) तथा समीकरण (6.10) से

$$M_{12} = \mu_0 n_1 n_2 \pi r_1^2 l \qquad (6.11)$$



चित्र 6.15 समान लंबाई l की दो समाक्षी दीर्घ परिनालिकाएँ।

ध्यान दीजिए कि हमने यहाँ पर कोर-प्रभावों को नगण्य मान लिया है तथा चुंबकीय क्षेत्र $\mu_0 n_2 I_2$ को परिनालिका S_2 को लंबाई तथा चौड़ाई में सर्वत्र एकसमान माना है। यह ध्यान रखते हुए कि परिनालिका लंबी है, जिसका अर्थ है $l >> r_2$ यह एक अच्छा सन्निकटन (approximation) है।

अब हम विपरीत स्थिति पर विचार करते हैं। परिनालिका S_1 से एक विद्युत धारा I_1 प्रवाहित की जाती है तथा परिनालिका S_2 से फ्लक्स-बंधता है,

$$N_2 \Phi_2 = M_{21} I_1 \qquad (6.12)$$

M_{21} को परिनालिका S_2 का परिनालिका S_1 के सापेक्ष *अन्योन्य प्रेरकत्व* कहते हैं।

S_1 में धारा I_1 के कारण फ्लक्स पूरी तरह S_1 के अंदर सीमित माना जा सकता है क्योंकि परिनालिकाएँ बहुत लंबी हैं। अत:, परिनालिका S_2 के साथ फ्लक्स-बंधता है

$$N_2 \Phi_2 = (n_2 l)\left(\pi r_1^2\right)\left(\mu_0 n_1 I_1\right)$$

यहाँ पर $n_2 l$, S_2 में फेरों की कुल संख्या है। समीकरण (6.12) से,

© NCERT not to be republished

$$M_{21} = \mu_0 n_1 n_2 \pi r_1^2 l \qquad (6.13)$$

समीकरण (6.11) तथा समीकरण (6.12) का उपयोग करके हमें प्राप्त होता है

$$M_{12} = M_{21} = M \text{ (माना)} \qquad (6.14)$$

हमने यह समानता दीर्घ लंबाई की समाक्षी परिनालिकाओं के लिए दर्शायी है। तथापि, यह संबंध व्यापक रूप से सत्य है। नोट कीजिए कि यदि अंत:परिनालिका बाह्य परिनालिका से बहुत छोटी होती (तथा बाह्य परिनालिका में ठीक प्रकार अंदर रखी होती) तब भी हम फ्लक्स ग्रंथिका $N_1 \Phi_1$ की गणना कर पाते, क्योंकि अंत:परिनालिका बाह्य परिनालिका के कारण प्रभावी ढंग से एकसमान चुंबकीय क्षेत्र में निमज्जित है। इस स्थिति में, M_{12} की गणना सरल होगी। तथापि, बाह्य परिनालिका से आबद्ध फ्लक्स की गणना करना अत्यंत कठिन होगा क्योंकि अंत:परिनालिका के कारण चुंबकीय क्षेत्र बाह्य परिनालिका की लंबाई तथा साथ-ही-साथ अनुप्रस्थ काट के आर-पार परिवर्तित होगा। इसीलिए इस स्थिति में M_{21} की गणना भी अत्यंत कठिन होगी। ऐसी स्थितियों में $M_{12}=M_{21}$ जैसी समानता अत्यंत लाभकारी होगी।

उपरोक्त उदाहरण की व्याख्या हमने यह मान कर की है कि परिनालिकाओं के अंदर माध्यम वायु है। इसके स्थान पर यदि μ_r सापेक्ष चुंबकशीलता का माध्यम मौजूद होता तो अन्योन्य प्रेरकत्व का मान होता

$$M = \mu_r \mu_0 n_1 n_2 \pi r_1^2 l$$

यह जानना भी महत्वपूर्ण है कि कुंडलियों, परिनालिकाओं आदि के युग्म का अन्योन्य प्रेरकत्व उनके पृथक्करण एवं साथ-ही-साथ उनके सापेक्ष दिक्विन्यास (orientation) पर निर्भर है।

उदाहरण 6.9 दो संकेन्द्री वृत्ताकार कुंडलियाँ, एक कम त्रिज्या r_1 की तथा दूसरी अधिक त्रिज्या r_2 की, ऐसी कि $r_1 << r_2$, समाक्षी रखी हैं तथा दोनों के केन्द्र संपाती हैं। इस व्यवस्था के लिए अन्योन्य प्रेरकत्व ज्ञात कीजिए।

हल माना कि बाह्य वृत्ताकार कुंडली में से I_2 धारा प्रवाहित होती है। कुंडली के केन्द्र पर चुंबकीय क्षेत्र है $B_2 = \mu_0 I_2 / 2r_2$। क्योंकि दूसरी समाक्षी कुंडली की त्रिज्या अत्यंत अल्प है, उसके अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल पर B_2 का मान स्थिर माना जा सकता है। अत:,

$$\Phi_1 = \pi r_1^2 B_2$$

$$= \frac{\mu_0 \pi r_1^2}{2r_2} I_2$$

$$= M_{12} I_2$$

इस प्रकार,

$$M_{12} = \frac{\mu_0 \pi r_1^2}{2r_2}$$

समीकरण (6.14) से

$$M_{12} = M_{21} = \frac{\mu_0 \pi r_1^2}{2r_2}$$

ध्यान दीजिए कि हमने M_{12} की गणना Φ_1 के सन्निकट मान से यह मानते हुए की है कि चुंबकीय क्षेत्र B_2 का मान क्षेत्रफल πr_1^2 पर एकसमान है। तथापि, हम इस मान को स्वीकार कर सकते हैं क्योंकि $r_1 << r_2$।

उदाहरण 6.9

© NCERT not to be republished

अब, अनुच्छेद 6.2 के प्रयोग 6.3 को स्मरण करें। उस प्रयोग में, जब भी कुंडली C_2 में धारा परिवर्तित होती है, कुंडली C_1 में विद्युत वाहक बल प्रेरित होता है। मान लीजिए कुंडली C_1 (माना N_1 फेरों वाली) में फ्लक्स Φ_1 है, जबकि कुंडली C_2 में धारा I_2 है।

तब समीकरण (6.9) से हमें प्राप्त होगा

$$N_1\Phi_1 = MI_2$$

समय के साथ परिवर्तनशील धाराओं के लिए

$$\frac{\mathrm{d}(N_1\Phi_1)}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}(MI_2)}{\mathrm{d}t}$$

क्योंकि कुंडली C_1 में प्रेरक विद्युत वाहक बल का मान है

$$\varepsilon_1 = -\frac{\mathrm{d}(N_1\Phi_1)}{\mathrm{d}t}$$

हमें प्राप्त होगा,

$$\varepsilon_1 = -M\frac{\mathrm{d}I_2}{\mathrm{d}t}$$

यह दर्शाता है कि किसी कुंडली में परिवर्ती धारा समीपस्थ कुंडली में विद्युत वाहक बल प्रेरित कर सकती है। प्रेरक विद्युत वाहक बल का परिमाण धारा परिवर्तन की दर तथा दोनों कुंडलियों के अन्योन्य प्रेरकत्व पर निर्भर है।

6.9.2 स्व-प्रेरकत्व

पिछले उप-परिच्छेद में हमने एक परिनालिका में बहने वाली धारा के कारण दूसरी परिनालिका में उत्पन्न होने वाले फ्लक्स के बारे में विचार किया। किसी एकल वियुक्त कुंडली में भी उसी कुंडली में धारा परिवर्तित करने पर कुंडली में होने वाले फ्लक्स परिवर्तन के कारण, विद्युत वाहक बल प्रेरित करना संभव है। इस परिघटना को *स्व-प्रेरण* कहते हैं। इस स्थिति में, N फेरों वाली कुंडली में फ्लक्स-बंधता, कुंडली में बहने वाली धारा के समानुपातिक है तथा इसे व्यक्त कर सकते हैं,

$$N\Phi_B \propto I$$

$$N\Phi_B = L\,I \qquad (6.15)$$

यहाँ समानुपातिक स्थिरांक L को कुंडली का *स्व-प्रेरकत्व* कहते हैं। इसे कुंडली का *स्व-प्रेरण गुणांक* भी कहते हैं। जब धारा परिवर्तित होती है, कुंडली से संबद्ध फ्लक्स भी परिवर्तित होता है। समीकरण (6.15) का उपयोग करने पर प्रेरित विद्युत वाहक बल होगा

$$\varepsilon = -\frac{\mathrm{d}(N\Phi_B)}{\mathrm{d}t}$$

$$\varepsilon = -L\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t} \qquad (6.16)$$

इस प्रकार, स्व-प्रेरित विद्युत वाहक बल सदैव कुंडली में किसी भी धारा परिवर्तन (बढ़ना या घटना) का विरोध करता है।

सरल ज्यामितियों से किसी परिपथ के लिए स्व-प्रेरकत्व की गणना करना संभव है। आइए एक लंबी परिनालिका के स्व-प्रेरकत्व की गणना करें, जिसके अनुप्रस्थ काट का क्षेत्रफल A तथा लंबाई l है, तथा इसी एकांक लंबाई में फेरों की संख्या n है। परिनालिका में प्रवाहित होने वाली धारा I के कारण चुंबकीय क्षेत्र $B = \mu_0\, n\, I$ है (पहले की भाँति कोर प्रभावों को नगण्य मानते हुए)। परिनालिका से संबद्ध कुल फ्लक्स हैं

$$N\Phi_B = (nl)(\mu_0 n\, I)(A)$$

$$= \mu_0 n^2 Al\, I$$

© NCERT not to be republished

यहाँ पर nl फेरों की कुल संख्या है। अत:, स्व-प्रेरकत्व है,

$$L = \frac{N\Phi_B}{I}$$

$$= \mu_0 n^2 Al \qquad (6.17)$$

यदि हम परिनालिका की अंत:धारा को μ_r आपेक्षिक चुंबकशीलता वाले पदार्थ से भर दें (उदाहरण के लिए नर्म लोहा, जिसकी आपेक्षिक चुंबकशीलता का मान उच्च है), तब,

$$L = \mu_r \mu_0 n^2 Al \qquad (6.18)$$

कुंडली का स्वप्रेरकत्व उसकी ज्यामितीय संरचना तथा माध्यम की चुंबकशीलता पर निर्भर है।

स्वप्रेरित विद्युत वाहक बल को *विरोधी विद्युत वाहक बल (back emf)* भी कहते हैं क्योंकि यह परिपथ में किसी भी धारा-परिवर्तन का विरोध करता है। भौतिक दृष्टि से *स्व-प्रेरकत्व जड़त्व का कार्य करता है।* यह यांत्रिकी में द्रव्यमान का विद्युतचुंबकीय अनुरूप है। अत:, धारा स्थापित करने के लिए, विरोधी विद्युत वाहक बल (ε) के विरुद्ध कार्य करना पड़ता है। यह किया गया कार्य चुंबकीय स्थितिज ऊर्जा के रूप में संचित हो जाता है। किसी परिपथ में किसी क्षण धारा I के लिए कार्य करने की दर है,

$$\frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} = |\varepsilon| I$$

यदि हम प्रतिरोधक क्षयों को नगण्य मान लें तथा केवल प्रेरणिक प्रभाव पर ही विचार करें, तब समीकरण (6.16) का उपयोग करने पर,

$$\frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} = L\ I \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}$$

धारा I स्थापित करने में किया गया कुल कार्य है,

$$W = \int \mathrm{d}W = \int_0^I L\, I\, \mathrm{d}I$$

अत:, धारा I स्थापित करने में आवश्यक ऊर्जा होगी,

$$W = \frac{1}{2} LI^2 \qquad (6.19)$$

यह व्यंजक हमें m द्रव्यमान के किसी कण की गतिज ऊर्जा (यांत्रिक) के व्यंजक $mv^2/2$ की याद दिलाता है तथा दर्शाता है कि L, m के अनुरूप है (अर्थात L विद्युत जड़त्व है तथा किसी परिपथ में जिसमें यह संयोजित है, धारा के बढ़ने तथा घटने का विरोध करता है)।

दो समीपस्थ कुंडलियों में साथ-साथ प्रवाहित होने वाली धाराओं की सामान्य स्थिति पर विचार करें। एक कुंडली के साथ संबद्ध फ्लक्स, स्वतंत्र रूप से विद्यमान दो फ्लक्सों के योग के बराबर होगा। समीकरण (6.9) निम्न रूप में रूपातंरित हो जाएगी।

$$N_1 \Phi_1 = M_{11} I_1 + M_{12} I_2$$

यहाँ M_{11} उसी कुंडली के प्रेरकत्व को निरूपित करता है।

अत:, फैराडे का नियम उपयोग करने पर,

$$\varepsilon_1 = -M_{11} \frac{\mathrm{d}I_1}{\mathrm{d}t} - M_{12} \frac{\mathrm{d}I_2}{\mathrm{d}t}$$

© NCERT not to be republished

M_{11} स्व-प्रेरकत्व है तथा इसे L_1 द्वारा लिखा जाता है। इसलिए,

$$\varepsilon_1 = -L_1 \frac{dI_1}{dt} - M_{12} \frac{dI_2}{dt}$$

उदाहरण 6.10 (a) परिनालिका में संचित चुंबकीय ऊर्जा का व्यंजक परिनालिका के चुंबकीय क्षेत्र B, क्षेत्रफल A तथा लंबाई l के पदों में ज्ञात कीजिए। (b) यह चुंबकीय ऊर्जा तथा संधारित्र में संचित स्थिरवैद्युत ऊर्जा किस रूप में तुलनीय है?

हल

(a) समीकरण (6.19) से, चुंबकीय ऊर्जा है

$$U_B = \frac{1}{2} LI^2$$

$$= \frac{1}{2} L \left(\frac{B}{\mu_0 n} \right)^2 \qquad \left(\text{क्योंकि परिनालिका के लिए, } B = \mu_0 nI\right)$$

$$= \frac{1}{2} (\mu_0 n^2 Al) \left(\frac{B}{\mu_0 n} \right)^2 \qquad \text{[समीकरण (6.17) से]}$$

$$= \frac{1}{2\mu_0} B^2 Al$$

(b) प्रति एकांक आयतन चुंबकीय ऊर्जा है,

$$u_B = \frac{U_B}{V} \qquad (\text{यहाँ } V \text{ आयतन है जिसमें फ्लक्स विद्यमान है})$$

$$= \frac{U_B}{Al}$$

$$= \frac{B^2}{2\mu_0} \qquad (6.20)$$

हम पहले ही समांतर प्लेट संधारित्र के एकांक आयतन में संचित स्थिरवैद्युत ऊर्जा का संबंध प्राप्त कर चुके हैं [अध्याय 2 समीकरण 2.77 देखिए]।

$$u_E = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 \qquad (2.77)$$

दोनों दशाओं में ऊर्जा क्षेत्र की तीव्रता के समानुपाती है। समीकरण (6.20) तथा (2.77) विशेष स्थितियों क्रमशः एक परिनालिका तथा एक समांतर प्लेट संधारित्र के लिए व्युत्पन्न किए गए हैं। लेकिन वे व्यापक हैं तथा विश्व के किसी भी ऐसे स्थान के लिए सत्य है जिसमें कोई चुंबकीय क्षेत्र अथवा/और विद्युतीय क्षेत्र विद्यमान है।

उदाहरण 6.10

प्रत्यावर्ती धारा जनित्र का प्रभावी सजीव चित्रण
http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/generator/ac.html
भौतिकी

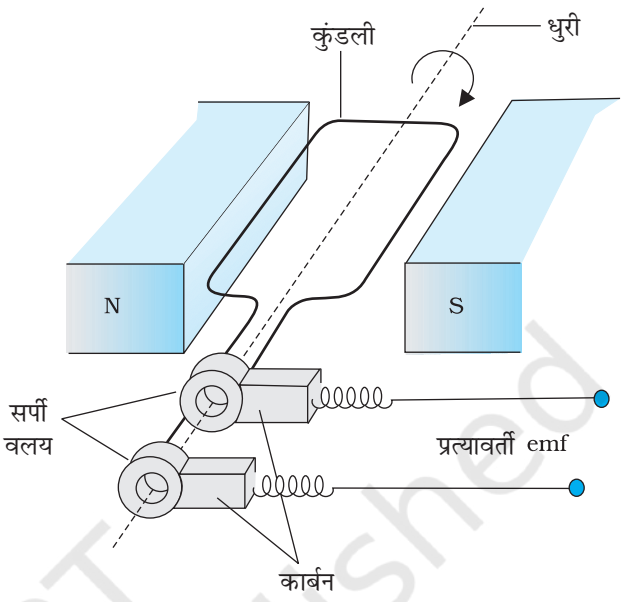
6.10 प्रत्यावर्ती धारा जनित्र

विद्युत चुंबकीय प्रेरण परिघटना का प्रौद्योगिक रूप से कई प्रकार से उपयोग किया गया है। एक असाधारण तथा महत्वपूर्ण उपयोग प्रत्यावर्ती धारा (ac) उत्पादन है। 100 MW सामर्थ्य का आधुनिक प्रत्यावर्ती धारा जनित्र एक अत्यंत विकसित मशीन है। इस अनुच्छेद में, हम इस मशीन के मूल सिद्धांतों का वर्णन करेंगे। इस मशीन के विकास का श्रेय यूगोस्लाव वैज्ञानिक निकोला टेस्ला को जाता है। जैसा कि अनुच्छेद 6.3 में संकेत किया गया था, किसी लूप में विद्युत वाहक बल या धारा प्रेरित करने के लिए, एक विधि यह है कि लूप के अभिविन्यास में अथवा इसके प्रभावी क्षेत्रफल

© NCERT not to be republished

में परिवर्तन किया जाए। जब कुंडली एक चुंबकीय क्षेत्र **B** में घूर्णन करती है तो लूप का (क्षेत्र के अभिलंबवत) प्रभावी क्षेत्रफल $A \cos \theta$ है, यहाँ θ, **A** तथा **B** के बीच का कोण है। फ्लक्स परिवर्तन करने की यह विधि, एक सरल प्रत्यावर्ती धारा जनित्र का कार्य सिद्धांत है। जनित्र यांत्रिक ऊर्जा को विद्युत ऊर्जा में परिवर्तित करता है।

प्रत्यावर्ती धारा जनित्र के मूल अवयव चित्र 6.16 में दर्शाए गए हैं। इसमें एक कुंडली होती है जो रोटर शैफ्ट (roter shaft) पर आरोपित होती है। कुंडली का घूर्णन अक्ष चुंबकीय क्षेत्र की दिशा के लंबवत है। कुंडली (जिसे आर्मेचर कहते हैं) को किसी एकसमान चुंबकीय क्षेत्र में किसी बाह्य साधन द्वारा यांत्रिक विधि से घूर्णन कराया जाता है। कुंडली के घूमने से, इसमें चुंबकीय फ्लक्स परिवर्तित होता है, जिससे कि कुंडली में एक विद्युत वाहक बल प्रेरित होता है। कुंडली के सिरों को सर्पी वलयों (slip rings) तथा ब्रुशों (brushes) की सहायता से एक बाह्य परिपथ से जोड़ा जाता है।



चित्र 6.16 प्रत्यावर्ती धारा जनित्र।

जब कुंडली को एकसमान कोणीय चाल ω से घूर्णन कराया जाता है तो चुंबकीय क्षेत्र सदिश **B** तथा क्षेत्रफल सदिश **A** के बीच कोण θ का मान किसी समय t पर $\theta = \omega t$ है (यह मानते हुए कि जब $t = 0$, $\theta = 0°$) है। परिणामस्वरूप, कुंडली का प्रभावी क्षेत्रफल, जिसमें चुंबकीय क्षेत्र रेखाएँ होकर गुजरती हैं, समय के साथ परिवर्तित होता है। समीकरण (6.1) के अनुसार किसी समय t पर फ्लक्स है :

$$\Phi_B = BA \cos \theta = BA \cos \omega t$$

फैराडे के नियम से, N फेरों वाली घूर्णी कुंडली के लिए प्रेरित विद्युत वाहक बल होगा

$$\varepsilon = - N \frac{d\Phi_B}{dt} = - NBA \frac{d}{dt}(\cos \omega t)$$

अतः, विद्युत वाहक बल का तात्क्षणिक मान है

$$\varepsilon = NBA\, \omega \, \sin \omega t \qquad (6.21)$$

यहाँ $NBA\omega$ विद्युत वाहक बल का अधिकतम मान है, जो $\sin \omega t = \pm 1$ पर प्राप्त होता है। यदि हम $NBA\omega$ को ε_0 से दर्शाएँ, तब

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t \qquad (6.22)$$

क्योंकि ज्या फलन (sine function) का मान +1 से –1 के बीच बदलता है, विद्युत वाहक बल का चिह्न या ध्रुवता समय के साथ परिवर्तित होता है। चित्र 6.17 से नोट कीजिए कि जब $\theta = 90°$ या $\theta = 270°$ होता है तो विद्युत वाहक बल अपने चरम मान पर होता है क्योंकि इन बिंदुओं पर फ्लक्स में परिवर्तन अधिकतम है।

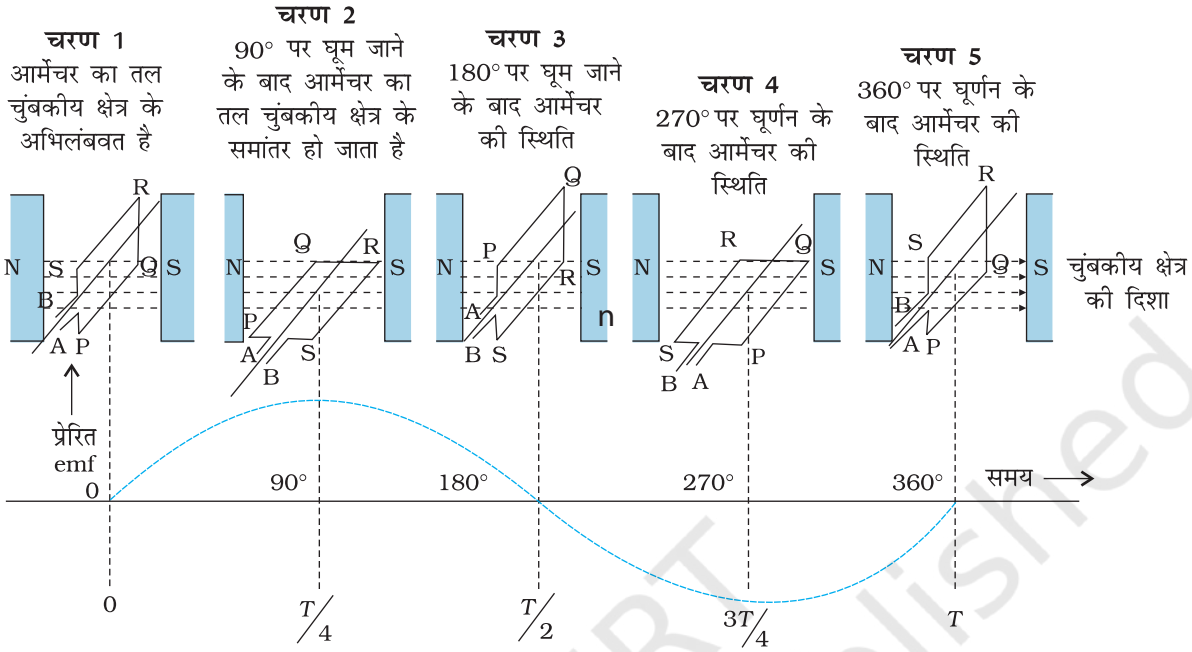
क्योंकि धारा की दिशा आवर्ती रूप से परिवर्तित होती है इसलिए धारा को *प्रत्यावर्ती धारा* (ac) कहते हैं। क्योंकि $\omega = 2\pi\nu$, समीकरण (6.22) को हम निम्न प्रकार से लिख सकते हैं–

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin 2\pi \nu t \qquad (6.23)$$

यहाँ, ν, जनित्र की कुंडली (आर्मेचर) के परिक्रमण की आवृत्ति है।

ध्यान रखिए कि समीकरण (6.22) तथा (6.23) विद्युत वाहक बल का तात्क्षणिक मान बतलाते हैं तथा ε, $+\varepsilon_0$ तथा $-\varepsilon_0$ के बीच आवर्ती रूप से परिवर्तित होता है। हम अध्याय 7 में सीखेंगे कि प्रत्यावर्ती वोल्टता तथा धारा का काल औसत मान कैसे ज्ञात करते हैं।

© NCERT not to be republished



चित्र 6.17 एक चुंबकीय क्षेत्र में घूर्णन करते तार के लूप में एक प्रत्यावर्ती विद्युत वाहक बल उत्पन्न होता है।

व्यावसायिक जनित्रों में, आर्मेचर को घुमाने के लिए आवश्यक यांत्रिक ऊर्जा ऊँचाई से गिरते हुए पानी द्वारा प्राप्त की जाती है, उदाहरण के लिए, बाँधों द्वारा। इन्हें *जल-विद्युत जनित्र (hydro-electric generator)* कहते हैं। विकल्पतः, कोयला या अन्य स्रोतों का उपयोग करके, पानी को गर्म करके भाप पैदा करते हैं। उच्च दाब पर भाप को आर्मेचर को घुमाने के लिए प्रयोग में लाते हैं। इन्हें *तापीय जनित्र (thermal generator)* कहते हैं। कोयले के स्थान पर यदि नाभिकीय ईंधन का प्रयोग किया जाता है तो हमें नाभिकीय शक्ति प्राप्त होती है। आधुनिक जनित्र 500 MW उच्च विद्युत शक्ति उत्पन्न कर सकते हैं, अर्थात् इनसे 100 W के 50 लाख बल्ब एक साथ जलाए जा सकते हैं। अधिकांश जनित्रों में कुंडलियों को अचर रखा जाता है तथा विद्युत चुंबकों को घुमाया जाता है। भारत में जनित्रों में घूर्णन आवृत्ति 50 Hz है। कुछ देशों में, जैसे अमेरिका (USA) में यह आवृत्ति 60 Hz है।

उदाहरण 6.11

उदाहरण 6.11 कमला एक स्थिर साइकिल के पैडल को घुमाती है। पैडल का संबंध 100 फेरों तथा 0.10 m^2 क्षेत्रफल वाली एक कुंडली से है। कुंडली प्रति सेकंड आधा परिक्रमण (चक्कर) कर पाती है तथा यह एक 0.01 T तीव्रता वाले एकसमान चुंबकीय क्षेत्र में, जो कुंडली के घूर्णन अक्ष के लंबवत है, रखी है। कुंडली में उत्पन्न होने वाली अधिकतम वोल्टता क्या होगी?

हल यहाँ $\nu = 0.5$ Hz; $N = 100$, $A = 0.1\ m^2$ तथा $B = 0.01$ T। समीकरण (6.21) लगाने पर

$\varepsilon_0 = NBA\ (2\pi\nu)$

$= 100 \times 0.01 \times 0.1 \times 2 \times 3.14 \times 0.5$

$= 0.314$ V

अधिकतम वोल्टता 0.314 V है।

हम आपसे आग्रह करते हैं कि विद्युत शक्ति उत्पादन के लिए वैकल्पिक संभावनाओं का पता लगाएँ।

© NCERT not to be republished

पक्षियों का प्रवसन

पक्षियों का प्रवसन (Migration) पैटर्न जीव विज्ञान के क्षेत्र में और वास्तव में विज्ञान के सभी क्षेत्रों में एक रहस्य बना हुआ है। उदाहरण के लिए, प्रत्येक सर्दी में साइबेरिया से पक्षी भारतीय उपमहाद्वीप के जल-स्थलों में बिना कोई गलती किए उड़ते हुए पहुँच जाते हैं। कुछ चिंतकों ने यह सुझाव दिया है कि इस प्रवसन पैटर्न के पीछे विद्युत चुंबकीय प्रेरण हो सकता है। पृथ्वी का चुंबकीय क्षेत्र पृथ्वी के विकासीय इतिहास में सदैव उपस्थित माना जाता रहा है। प्रवसन करने वाले पक्षियों के लिए दिशा ज्ञात करने में यह चुंबकीय क्षेत्र अत्यंत लाभकारी हो सकता है। जहाँ तक हमें ज्ञात है पक्षियों में किसी प्रकार के लौह चुंबकीय पदार्थ के पाए जाने की पुष्टि नहीं हुई है। अत: विद्युत चुंबकीय प्रेरण ही प्रवसन की दिशा निर्धारण में युक्तिसंगत प्रक्रम हो सकता है। एक इष्टतम (optimal) स्थिति पर विचार करें: माना पक्षियों के मार्ग में पृथ्वी के चुंबकत्व की तीव्रता **B** है, पक्षी की गति **v** है तथा पक्षी के शरीर में दो विशिष्ट बिन्दुओं की दूरी l है तथा ये तीनों सदिश अन्योन्य रूप से एक-दूसरे के लंबवत हैं। तब गतिक विद्युत वाहक बल के समीकरण (6.5) से

$$\varepsilon = Blv$$

अब $B = 4 \times 10^{-5}$ T, $l = 2$ cm चौड़ा, तथा $v = 10$ m/s लेने पर हमें प्राप्त होगा

$$\varepsilon = 4 \times 10^{-5} \times 2 \times 10^{-2} \times 10 \text{ V} = 8 \times 10^{-6} \text{ V}$$

$$= 8 \ \mu\text{V}$$

यह अत्यंत कम विभवांतर सुझाता है कि हमारी परिकल्पना की वैधता संदेहास्पद है। कुछ प्रकार की मछलियाँ अवश्य इतने अल्प विभवांतर को संसूचित कर सकती हैं। तथापि, इन मछलियों में कुछ विशेष कोशिकाओं (cells) की पहचान की गई है, जो अत्यल्प विभवांतर का संसूचन कर सकती हैं। पक्षियों में इस प्रकार की कोशिकाओं की पहचान नहीं की जा सकी है। अत: पक्षियों में प्रवसन आज भी एक गुत्थी ही है।

सारांश

1. क्षेत्रफल **A** की किसी सतह को एकसमान चुंबकीय क्षेत्र **B** में रखने पर उसमें से गुजरने वाले चुंबकीय फ्लक्स को निम्न प्रकार परिभाषित कर सकते हैं।

   $\Phi_B = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} = BA \cos\theta$

   यहाँ θ, **B** एवं **A** के बीच का कोण है।
2. फैराडे के विद्युत चुंबकीय प्रेरण के नियम के अनुसार N फेरे युक्त कुंडली में प्रेरित विद्युत वाहक बल उससे गुजरने वाले चुंबकीय फ्लक्स में परिवर्तन की दर के तुल्य होता है

   $$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

   यहाँ Φ_B एक फेरे से संबद्ध चुंबकीय फ्लक्स है। यदि परिपथ एक बंद परिपथ हो तो उसमें एक धारा $I = \varepsilon/R$ स्थापित हो जाती है, जहाँ R परिपथ का प्रतिरोध है।
3. लेंज के नियम के अनुसार, प्रेरित विद्युत वाहक बल की ध्रुवता इस प्रकार होती है कि वह उस दिशा में धारा प्रवाहित करे, जो उसी परिवर्तन का विरोध करे जिसके कारण उसकी उत्पत्ति हुई है। फैराडे द्वारा निष्पादित व्यंजक में ऋण चिह्न इसी बात का द्योतक है।
4. यदि एक l लंबाई की धात्विक छड़ को एकसमान चुंबकीय क्षेत्र B के लंबवत रखें तथा इसे क्षेत्र के लंबवत v वेग से चलाएँ तो इसके सिरों के बीच प्रेरित विद्युत वाहक बल (जिसे गतिक विद्युत वाहक बल कहते हैं) का मान है

   $\varepsilon = Blv$
5. परिवर्ती चुंबकीय क्षेत्र के निकट स्थित धातु (कोई चालक) की वस्तुओं में धारा लूप स्थापित हो जाते हैं। इन लूपों में ऊष्मा के रूप में विद्युत ऊर्जा क्षयित होती है। ऐसी धाराएं *भँवर धाराएँ* हैं।
6. प्रेरकत्व, फ्लक्स बंधता तथा धारा का अनुपात है। इसका मान $N\Phi/I$ होता है।

© NCERT not to be republished

7. किसी कुंडली (कुंडली 2) में धारा परिवर्तन निकट स्थित कुंडली (कुंडली 1) में प्रेरित विद्युत वाहक बल उत्पन्न कर सकता है। इस संबंध को

$$\varepsilon_1 = -M_{12}\frac{dI_2}{dt}$$

द्वारा व्यक्त करते हैं। यहाँ राशि M_{12} कुंडली 1 का कुंडली 2 के सापेक्ष अन्योन्य प्रेरकत्व है। M_{21} को भी इसी प्रकार परिभाषित किया जा सकता है। इन दो प्रेरकत्वों में एक सामान्य तुल्यता होती है।

$$M_{12} = M_{21}$$

8. जब किसी कुंडली में धारा परिवर्तन होता है तो वह परिवर्तन कुंडली में एक विरोधी विद्युत वाहक बल को उत्पन्न करता है। इस स्व-प्रेरित विद्युत वाहक बल का मान निम्नलिखित समीकरण द्वारा व्यक्त किया जाता है :

$$\varepsilon = -L\frac{dI}{dt}$$

यहाँ L कुंडली का स्व-प्रेरकत्व है। यह कुंडली के जड़त्व की माप है जो परिपथ में किसी भी धारा परिवर्तन का विरोध करता है।

9. किसी लंबी परिनालिका जिसकी क्रोड μ_r सापेक्ष चुंबकशीलता के पदार्थ की है, का स्व-प्रेरकत्व निम्नलिखित समीकरण द्वारा व्यक्त किया जाता है,

$$L = \mu_r\ \mu_0\ n^2\ Al$$

यहाँ A परिनालिका का अनुप्रस्थ काट, l उसकी लंबाई तथा n उसकी इकाई लंबाई में लपेटों की संख्या को व्यक्त करते हैं।

10. किसी प्रत्यावर्ती धारा जनित्र में विद्युत चुंबकीय प्रेरण द्वारा यांत्रिक ऊर्जा को विद्युत ऊर्जा में रूपांतरित करते हैं। यदि N फेरों वाली तथा A अनुप्रस्थ काट वाली कुंडली एकसमान चुंबकीय क्षेत्र B में प्रति सेकंड ν चक्कर लगाए तो गतिक विद्युत वाहक बल का मान

$$\varepsilon = NBA\,(2\pi\nu)\sin(2\pi\nu t)$$

द्वारा व्यक्त किया जाता है। यहाँ हमने मान लिया है कि $t = 0$ s, पर कुंडली चुंबकीय क्षेत्र के अभिलंबवत है।

राशि	प्रतीक	मात्रक	विमाएँ	समीकरण
चुंबकीय फ्लक्स	Φ_B	Wb (वेबर)	$[M L^2 T^{-2} A^{-1}]$	$\Phi_B = \mathbf{B}\cdot\mathbf{A}$
विद्युत वाहक बल (emf)	ε	V (वोल्ट)	$[M L^2 T^{-3} A^{-1}]$	$\varepsilon = -d(N\Phi_B)/dt$
अन्योन्य प्रेरकत्व	M	H (हेनरी)	$[M L^2 T^{-2} A^{-2}]$	$\varepsilon_1 = -M_{12}(dI_2/dt)$
स्व-प्रेरकत्व	L	H (हेनरी)	$[M L^2 T^{-2} A^{-2}]$	$\varepsilon = -L(dI/dt)$

विचारणीय विषय

1. विद्युत एवं चुंबकत्व का एक-दूसरे के साथ घनिष्ठ संबंध है। उन्नीसवीं शताब्दी के प्रारंभ में आर्स्टेड, ऐम्पियर एवं अन्य द्वारा किए गए प्रयोगों ने सिद्ध कर दिया कि गतिमान आवेश (धारा) चुंबकीय क्षेत्र की उत्पत्ति करते हैं। कुछ समय पश्चात सन 1830 के आसपास फैराडे तथा हेनरी द्वारा किए गए प्रयोगों ने स्पष्ट रूप से प्रदर्शित किया कि गतिमान चुंबक विद्युत धारा प्रेरित (उत्पन्न) करते हैं। गुरुत्वीय, विद्युत चुंबकीय, क्षीण तथा प्रबल नाभिकीय बल एक-दूसरे से संबंधित हैं?
2. किसी बंद परिपथ में, विद्युत धारा इस प्रकार उत्पन्न होती है जिससे कि यह परिवर्ती चुंबकीय फ्लक्स का विरोध कर सके। यह ऊर्जा संरक्षण के सिद्धांत के अनुरूप है। तथापि, एक खुले

© NCERT not to be republished

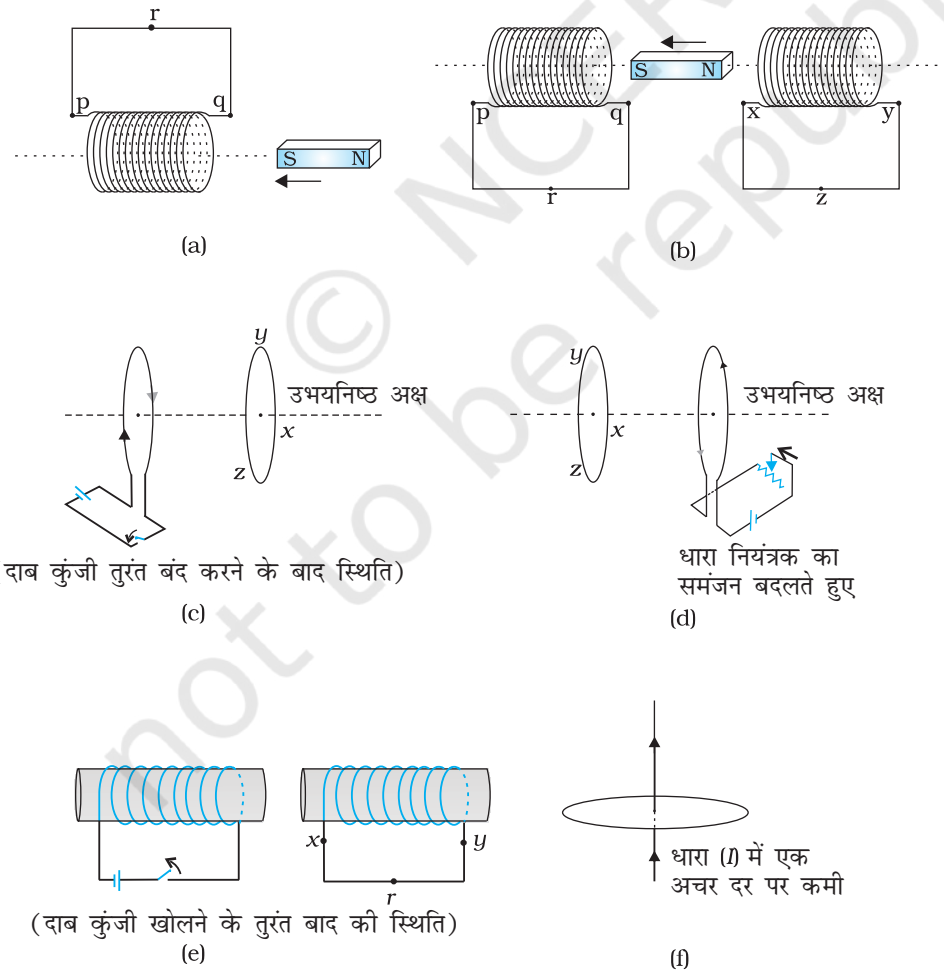
परिपथ में प्रेरित विद्युत वाहक बल इसके सिरों पर उत्पन्न होता है। यह फ्लक्स परिवर्तन से किस प्रकार संबंधित है।

3. अनुच्छेद 6.5 में गतिक विद्युत वाहक बल की विवेचना की गई है। इस अवधारणा का निष्पादन हम गतिमान आवेश पर लगने वाले लोरेंज़ बल का प्रयोग करते हुए फैराडे के नियम से भी स्वतंत्रतापूर्वक कर सकते हैं। तथापि, यदि आवेश स्थिर भी हों [तथा लोरेंज़ बल का $q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ पद क्रियात्मक नहीं है] तब भी समय के साथ परिवर्ती चुंबकीय क्षेत्र के कारण एक प्रेरित विद्युत वाहक बल उत्पन्न होता है। अतः स्थिर चुंबकीय क्षेत्र में गतिमान आवेश एवं समय के साथ परिवर्ती चुंबकीय क्षेत्र में स्थिर आवेश फैराडे के नियम के लिए सममित स्थिति में प्रतीत होते हैं। यह फैराडे के नियम के लिए सापेक्षता के सिद्धांत की प्रासंगिकता पर ललचाने वाला संकेत देता है।

4. जब एक ताम्र पट्टिका को चुंबक के ध्रुवों के बीच दोलित कराया जाता है तो पट्टिका की गति अवमंदित हो जाती है। भँवर धाराओं द्वारा अवमंदन बल कैसे उत्पन्न होता है?

अभ्यास

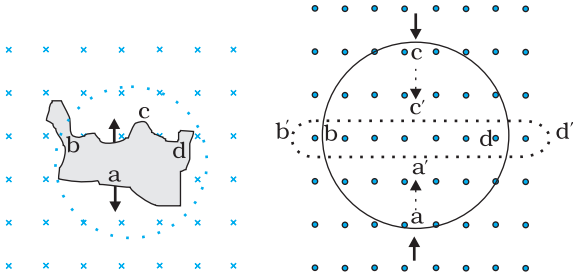
6.1 चित्र 6.18 (a) से (f) में वर्णित स्थितियों के लिए प्रेरित धारा की दिशा की प्रागुक्ति (predict) कीजिए।



चित्र 6.18

© NCERT not to be republished

6.2 चित्र 6.19 में वर्णित स्थितियों के लिए लेंज के नियम का उपयोग करते हुए प्रेरित विद्युत धारा की दिशा ज्ञात कीजिए।
(a) जब अनियमित आकार का तार वृत्ताकार लूप में बदल रहा हो;
(b) जब एक वृत्ताकार लूप एक सीधे बारीक तार में विरूपित किया जा रहा हो।



(a) (b)

चित्र 6.19

6.3 एक लंबी परिनालिका के इकाई सेंटीमीटर लंबाई में 15 फेरे हैं। उसके अंदर 2.0 cm^2 का एक छोटा-सा लूप परिनालिका की अक्ष के लंबवत रखा गया है। यदि परिनालिका में बहने वाली धारा का मान 2.0 A में 4.0 A से 0.1 s कर दिया जाए तो धारा परिवर्तन के समय प्रेरित विद्युत वाहक बल कितना होगा?

6.4 एक आयताकार लूप जिसकी भुजाएँ 8 cm एवं 2 cm हैं, एक स्थान पर थोड़ा कटा हुआ है। यह लूप अपने तल के अभिलंबवत 0.3 T के एकसमान चुंबकीय क्षेत्र से बाहर की ओर निकल रहा है। यदि लूप के बाहर निकलने का वेग 1 cm s^{-1} है तो कटे भाग के सिरों पर उत्पन्न विद्युत वाहक बल कितना होगा, जब लूप की गति अभिलंबवत हो (a) लूप की लंबी भुजा के (b) लूप की छोटी भुजा के। प्रत्येक स्थिति में उत्पन्न प्रेरित वोल्टता कितने समय तक टिकेगी?

6.5 1.0 m लंबी धातु की छड़ उसके एक सिरे से जाने वाले अभिलंबवत अक्ष के परित: 400 rad s^{-1} की कोणीय आवृत्ति से घूर्णन कर रही है। छड़ का दूसरा सिरा एक धात्विक वलय से संपर्कित है। अक्ष के अनुदिश सभी जगह 0.5 T का एकसमान चुंबकीय क्षेत्र उपस्थित है। वलय तथा अक्ष के बीच स्थापित विद्युत वाहक बल की गणना कीजिए।

6.6 एक वृत्ताकार कुंडली जिसकी त्रिज्या 8.0 cm तथा फेरों की संख्या 20 है अपने ऊर्ध्वाधर व्यास के परित: 50 rad s^{-1} की कोणीय आवृत्ति से 3.0×10^{-2} T के एकसमान चुंबकीय क्षेत्र में घूम रही है। कुंडली में उत्पन्न अधिकतम तथा औसत प्रेरित विद्युत वाहक बल का मान ज्ञात कीजिए। यदि कुंडली 10 Ω प्रतिरोध का एक बंद लूप बनाए तो कुंडली में धारा के अधिकतम मान की गणना कीजिए। जूल ऊष्मन के कारण क्षयित औसत शक्ति की गणना कीजिए। यह शक्ति कहाँ से प्राप्त होती है?

6.7 पूर्व से पश्चिम दिशा में विस्तृत एक 10 m लंबा क्षैतिज सीधा तार 0.30×10^{-4} Wb m^{-2} तीव्रता वाले पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र के क्षैतिज घटक से लंबवत 5.0 m s^{-1} की चाल से गिर रहा है।
(a) तार में प्रेरित विद्युत वाहक बल का तात्क्षणिक मान क्या होगा?
(b) विद्युत वाहक बल की दिशा क्या है?
(c) तार का कौन-सा सिरा उच्च विद्युत विभव पर है?

6.8 किसी परिपथ में 0.1 s में धारा 5.0 A से 0.0 A तक गिरती है। यदि औसत प्रेरित विद्युत वाहक बल 200 V है तो परिपथ में स्वप्रेरकत्व का आकलन कीजिए।

6.9 पास-पास रखे कुंडलियों के एक युग्म का अन्योन्य प्रेरकत्व 1.5 H है। यदि एक कुंडली में 0.5 s में धारा 0 से 20 A परिवर्तित हो, तो दूसरी कुंडली की फ्लक्स बंधता में कितना परिवर्तन होगा?

6.10 एक जेट प्लेन पश्चिम की ओर 1800 km/h वेग से गतिमान है। प्लेन के पंख 25 m लंबे हैं। इनके सिरों पर कितना विभवांतर उत्पन्न होगा? पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र का मान उस स्थान पर 5×10^{-4} T तथा नति कोण (dip angle) 30° है।

© NCERT not to be republished

अतिरिक्त अभ्यास

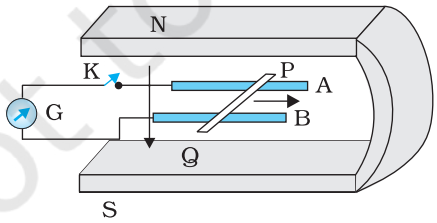
6.11 मान लीजिए कि अभ्यास 6.4 में उल्लिखित लूप स्थिर है किन्तु चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करने वाले विद्युत चुंबक में धारा का मान कम किया जाता है जिससे चुंबकीय क्षेत्र का मान अपने प्रारंभिक मान 0.3 T से 0.02 T s^{-1} की दर से घटता है। अब यदि लूप का कटा भाग जोड़ दें जिससे प्राप्त बंद लूप का प्रतिरोध 1.6 Ω हो तो इस लूप में ऊष्मन के रूप में शक्ति ह्रास क्या है? इस शक्ति का स्रोत क्या है?

6.12 12 cm भुजा वाला वर्गाकार लूप जिसकी भुजाएँ X एवं Y अक्षों के समांतर हैं, x-दिशा में 8 cm s^{-1} की गति से चलाया जा रहा है। लूप तथा उसकी गति का परिवेश धनात्मक z-दिशा के चुंबकीय क्षेत्र का है। चुंबकीय क्षेत्र न तो एकसमान है और न ही समय के साथ नियत है। इस क्षेत्र की ऋणात्मक दिशा में प्रवणता 10^{-3} T cm^{-1} है (अर्थात ऋणात्मक x-अक्ष की दिशा में इकाई सेंटीमीटर दूरी पर क्षेत्र के मान में 10^{-3} T cm^{-1} की वृद्धि होती है), तथा क्षेत्र के मान में 10^{-3} T s^{-1} की दर से कमी भी हो रही है। यदि कुंडली का प्रतिरोध 4.50 mΩ हो तो प्रेरित धारा का परिमाण एवं दिशा ज्ञात कीजिए।

6.13 एक शक्तिशाली लाउडस्पीकर के चुंबक के ध्रुवों के बीच चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता के परिमाण का मापन किया जाना है। इस हेतु एक छोटी चपटी 2 cm^2 क्षेत्रफल की अन्वेषी कुंडली (search coil) का प्रयोग किया गया है। इस कुंडली में पास-पास लिपटे 25 फेरे हैं तथा इसे चुंबकीय क्षेत्र के लंबवत व्यवस्थित किया गया है और तब इसे द्रुत गति से क्षेत्र के बाहर निकाला जाता है। तुल्यत: एक अन्य विधि में अन्वेषी कुंडली को 90° से तेजी से घुमा देते हैं जिससे कुंडली का तल चुंबकीय क्षेत्र के समांतर हो जाए। इन दोनों घटनाओं में कुल 7.5 mC आवेश का प्रवाह होता है (जिसे परिपथ में प्रक्षेप धारामापी (ballistic galvanometer) लगाकर ज्ञात किया जा सकता है)। कुंडली तथा धारामापी का संयुक्त प्रतिरोध 0.50 Ω है। चुंबक की क्षेत्र तीव्रता का आकलन कीजिए।

6.14 चित्र 6.20 में एक धातु की छड़ PQ को दर्शाया गया है जो पटरियों AB पर रखी है तथा एक स्थायी चुंबक के ध्रुवों के मध्य स्थित है। पटरियाँ, छड़ एवं चुंबकीय क्षेत्र परस्पर अभिलंबवत दिशाओं में हैं। एक गैल्वेनोमीटर (धारामापी) G को पटरियों से एक स्विच K की सहायता से संयोजित किया गया है। छड़ की लंबाई = 15 cm, B = 0.50 T तथा पटरियों, छड़ तथा धारामापी से बने बंद लूप का प्रतिरोध = 9.0 mΩ है। क्षेत्र को एकसमान मान लें।

(a) माना कुंजी K खुली (open) है तथा छड़ 12 cm s^{-1} की चाल से दर्शायी गई दिशा में गतिमान है। प्रेरित विद्युत वाहक बल का मान एवं ध्रुवणता (polarity) बताइए।



चित्र 6.20

(b) क्या कुंजी K खुली होने पर छड़ के सिरों पर आवेश का आधिक्य हो जाएगा? क्या होगा यदि कुंजी K बंद (close) कर दी जाए?

(c) जब कुंजी K खुली हो तथा छड़ एकसमान वेग से गति में हो तब भी इलेक्ट्रॉनों पर कोई परिणामी बल कार्य नहीं करता यद्यपि उन पर छड़ की गति के कारण चुंबकीय बल कार्य करता है। कारण स्पष्ट कीजिए।

(d) कुंजी बंद होने की स्थिति में छड़ पर लगने वाले अवमंदन बल का मान क्या होगा?

© NCERT not to be republished

(e) कुंजी बंद होने की स्थिति में छड़ को उसी चाल (=12 cm s^{-1}) से चलाने हेतु कितनी शक्ति (बाह्य कारक के लिए) की आवश्यकता होगी?

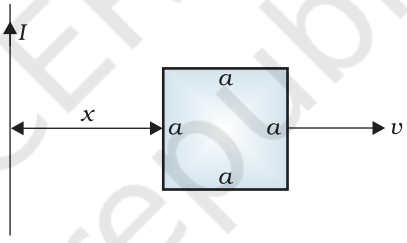
(f) बंद परिपथ में कितनी शक्ति का ऊष्मा के रूप में क्षय होगा? इस शक्ति का स्रोत क्या है?

(g) गतिमान छड़ में उत्पन्न विद्युत वाहक बल का मान क्या होगा यदि चुंबकीय क्षेत्र की दिशा पटरियों के लंबवत होने की बजाय उनके समांतर हो?

6.15 वायु के क्रोड वाली एक परिनालिका में, जिसकी लंबाई 30 cm तथा अनुप्रस्थ काट का क्षेत्रफल 25 cm^2 तथा कुल फेरे 500 हैं, 2.5 A धारा प्रवाहित हो रही है। धारा को 10^{-3} s के अल्पकाल में अचानक बंद कर दिया जाता है। परिपथ में स्विच के खुले सिरों के बीच उत्पन्न औसत विद्युत वाहक बल का मान क्या होगा? परिनालिका के सिरों पर चुंबकीय क्षेत्र के परिवर्तन की उपेक्षा कर सकते हैं।

6.16 (a) चित्र 6.21 में दर्शाए अनुसार एक लंबे, सीधे, तार तथा एक वर्गाकार लूप जिसकी एक भुजा की लंबाई a है, के लिए अन्योन्य प्रेरकत्व का व्यंजक प्राप्त कीजिए।

(b) अब मान लीजिए कि सीधे तार में 50 A की धारा प्रवाहित हो रही है तथा लूप एक स्थिर वेग v = 10 m/s से दाईं ओर को गति कर रहा है। लूप में प्रेरित विद्युत वाहक बल का परिकलन उस क्षण पर कीजिए जब x = 0.2 m हो। लूप के लिए a = 0.1 m लीजिए तथा यह मान लीजिए कि उसका प्रतिरोध बहुत अधिक है।



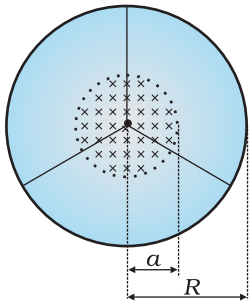
चित्र 6.21

6.17 किसी M द्रव्यमान तथा R त्रिज्या वाले एक पहिए के किनारे (rim) पर एक रैखिक आवेश स्थापित किया गया है जिसकी प्रति इकाई लंबाई पर आवेश का मान λ है। पहिए के स्पोक (slope) हलके एवं कुचालक हैं तथा वह अपनी अक्ष के परितः घर्षण रहित घूर्णन हेतु स्वतंत्र है जैसा कि चित्र 6.22 में दर्शाया गया है। पहिए के वृत्तीय भाग पर, रिम के अंदर एकसमान चुंबकीय क्षेत्र विस्तरित है। इसे इस प्रकार परिभाषित किया गया है,

$\mathbf{B} = -B_0\,\mathbf{k}$ $\quad (r \le a;\ a < R)$

$= 0$ $\quad$ (अन्यथा)

चुंबकीय क्षेत्र को अचानक 'ऑफ़' (switched off) करने के पश्चात, पहिए का कोणीय वेग ज्ञात कीजिए।



चित्र 6.22

© NCERT not to be republished

12091CH07

अध्याय 7

प्रत्यावर्ती धारा

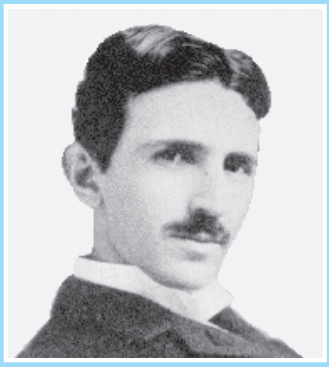
© NCERT not to be republished

7.1 भूमिका

अब तक हमने *दिष्टधारा* (dc) स्रोतों एवं दिष्टधारा स्रोतों से युक्त परिपथों पर विचार किया है। समय के साथ इन धाराओं की दिशा में परिवर्तन नहीं होता। तथापि, समय के साथ परिवर्तित होने वाली धाराओं और वोल्टताओं का मिलना एक आम बात है। हमारे घरों एवं दफ्तरों में पाया जाने वाला मुख्य विद्युत प्रदाय (electric mains supply) एक ऐसी ही वोल्टता का स्रोत है जो समय के साथ ज्या फलन (sine function) की भाँति परिवर्तित होता है। ऐसी वोल्टता को *प्रत्यावर्ती* (ac) *वोल्टता* तथा किसी परिपथ में इसके द्वारा अचालित धारा को *प्रत्यावर्ती धारा* (ac धारा)* कहते हैं। आजकल जिन वैद्युत युक्तियों का हम उपयोग करते हैं उनमें से अधिकांश के लिए ac वोल्टता की ही आवश्यकता होती है। इसका मुख्य कारण यह है कि अधिकांश विद्युत कंपनियों द्वारा बेची जा रही विद्युत ऊर्जा प्रत्यावर्ती धारा के रूप में ही संप्रेषित एवं वितरित होती है। dc पर ac के उपयोग को वरीयता दिए जाने का मुख्य कारण यह है कि ac वोल्टताओं को ट्रांसफॉर्मरों द्वारा आसानी से एवं दक्षता के साथ एक वोल्टता से दूसरी वोल्टता में बदला जा सकता है। इसके अतिरिक्त ac के रूप में लंबी दूरियों तक वैद्युत ऊर्जा का संप्रेषण भी अपेक्षाकृत कम खर्चीला होता है। प्रत्यावर्ती धारा परिपथ ऐसे अभिलक्षण प्रदर्शित करता है जिनका उपयोग दैनिक जीवन में काम आने वाली अनेक युक्तियों में किया जाता है। उदाहरणार्थ, जब हम अपने रेडियो को अपने मनपसंद स्टेशन से समस्वरित करते हैं तो ac परिपथों के एक विशिष्ट गुण का लाभ उठाते हैं जो उन अनेक गुणों में से एक है जिनका अध्ययन आप इस अध्याय में करेंगे।

* ac वोल्टता एवं ac धारा, ये वाक्यांश असंगत एवं अनुप्रयुक्त हैं, क्योंकि इनका शाब्दिक अर्थ है क्रमशः 'प्रत्यावर्ती धारा वोल्टता' एवं 'प्रत्यावर्ती धारा धारा'। तब भी संकेताक्षर ac समय के अनुसार सरल आवर्ती क्रम में परिवर्तित होने वाली वैद्युत राशि को व्यक्त करने के लिए इतनी सार्वभौमिक स्वीकृति पा चुका है कि इसके प्रयोग में हम प्रचलित परिपाटी का ही अनुसरण करेंगे। इसके अतिरिक्त, सामान्यतः प्रयुक्त होने वाले शब्द *वोल्टता* का अर्थ दो बिंदुओं के बीच विभवांतर होता है।

निकोला टेस्ला (1836 – 1943)



निकोला टेस्ला (1856 – 1943)
सर्बिया-अमेरिका के वैज्ञानिक, आविष्कर्ता एवं प्रतिभावान व्यक्ति। चुंबकीय क्षेत्र को घुमाने का उनका विचार ही व्यावहारिक रूप में सब प्रत्यावर्ती धारा मशीनों का आधार बना जिसके कारण विद्युत शक्ति के युग में प्रवेश किया जा सका। अन्य वस्तुओं के अतिरिक्त, प्रेरण मोटर, ac शक्ति की बहुफेज़ प्रणाली; रेडियो, टेलीविजन तथा अन्य वैद्युत उपकरणों पर लगने वाली उच्च आवृत्ति प्रेरण कुंडली (टेस्ला कुंडली) का आविष्कार भी उन्होंने किया। चुंबकीय क्षेत्र के SI मात्रक का नाम उनके सम्मान में रखा गया है।

7.2 प्रतिरोधक पर प्रयुक्त ac वोल्टता

चित्र 7.1 में ac वोल्टता स्रोत ε से जुड़ा प्रतिरोधक R दर्शाया गया है। परिपथ आरेख में ac स्रोत का संकेत चिह्न $\sim$ है। यहाँ हम एक ऐसे स्रोत की बात कर रहे हैं जो अपने सिरों के बीच ज्यावक्रीय रूप में परिवर्तनशील विभवांतर उत्पन्न करता है, माना कि यह विभवांतर जिसे ac वोल्टता भी कहा जाता है, निम्नलिखित प्रकार से व्यक्त किया जाए

$$v = v_m \sin \omega t \qquad (7.1)$$

यहाँ v_m दोलायमान विभवांतर का आयाम एवं ω इसकी कोणीय आवृत्ति है।



चित्र 7.1 प्रतिरोधक पर प्रयुक्त ac वोल्टता।

प्रतिरोधक में प्रवाहित होने वाली धारा का मान प्राप्त करने के लिए हम चित्र 7.1 में दर्शाए गए परिपथ पर किरखोफ का लूप नियम $\sum \varepsilon(t) = 0$, (खण्ड 3.13 देखें) लागू करते हैं जिससे हमें प्राप्त होता है :

$$v_m \sin \omega t = iR$$

अथवा $$i = \frac{v_m}{R} \sin \omega t$$

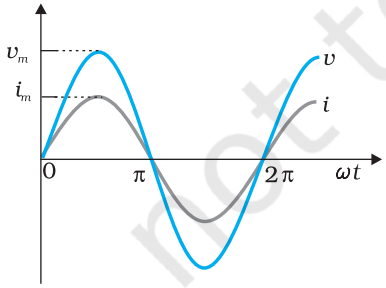
चूँकि R एक नियतांक है, हम इस समीकरण को इस प्रकार व्यक्त कर सकते हैं :

$$i = i_m \sin \omega t \qquad (7.2)$$

यहाँ धारा आयाम i_m के लिए सूत्र है :

$$i_m = \frac{v_m}{R} \qquad (7.3)$$

समीकरण (7.3) ओम का नियम है जो प्रतिरोधकों के प्रकरण में ac एवं dc दोनों प्रकार की वोल्टताओं के लिए समान रूप से लागू होता है। समीकरण (7.1) एवं समीकरण (7.2) द्वारा व्यक्त किसी शुद्ध प्रतिरोधक के सिरों के बीच लगाई गई वोल्टता एवं इसमें प्रवाहित होने वाली धारा को चित्र 7.2 में समय के फलन के रूप में आलेखित किया गया है। इस तथ्य पर विशेष ध्यान दीजिए कि v एवं i दोनों ही शून्य, न्यूनतम एवं अधिकतम मानों की स्थितियाँ साथ-साथ ही प्राप्त करती हैं। अत: स्पष्ट है कि वोल्टता एवं धारा एक दूसरे के साथ समान कला में हैं।



चित्र 7.2 शुद्ध प्रतिरोधक में वोल्टता एवं धारा एक ही कला में हैं। निम्निष्ठ, शून्य तथा उच्चिष्ठ क्रमश: एक ही समय में बनते हैं।

हम देखते हैं कि प्रयुक्त वोल्टता की भाँति ही धारा भी ज्या-वक्रीय रूप में परिवर्तित होती है और तदनुसार ही प्रत्येक चक्र में इसके धनात्मक एवं ऋणात्मक मान प्राप्त होते हैं। अत: एक संपूर्ण चक्र में तात्क्षणिक धारा मानों का योग शून्य होता है तथा माध्य धारा शून्य होती है। तथापि माध्य धारा शून्य है इस तथ्य का यह अर्थ नहीं है कि व्यय होने वाली माध्य शक्ति भी शून्य है, और विद्युत ऊर्जा का क्षय नहीं हो रहा है। जैसा कि आप

© NCERT not to be republished

जानते हैं जूल i^2R द्वारा व्यक्त होता है और i^2 (जो सदैव धनात्मक ही होता है चाहे i धनात्मक हो या ऋणात्मक) पर निर्भर करता है, न कि i पर। अत: जब किसी प्रतिरोधक से ac धारा प्रवाहित होती है तो जूल तापन एवं वैद्युत ऊर्जा का क्षय होता है।

प्रतिरोधकता के क्षयित होने वाली तात्क्षणिक शक्ति होती है

$$p = i^2R = i_m^2 R \sin^2 \omega t \qquad (7.4)$$

एक समय चक्र में p का माध्य मान है*

$$\bar{p} = < i^2R > = < i_m^2 R \sin^2 \omega t > \qquad [7.5(a)]$$

जहाँ किसी अक्षर के ऊपर लगी रेखा (यहाँ p) उसका माध्य मान निर्दिष्ट करती है एवं <.....> यह सूचित करता है कि कोष्ठक के अंदर की राशि का माध्य लिया गया है। चूँकि i_m^2 एवं R नियत राशियाँ हैं

$$\bar{p} = i_m^2 R < \sin^2 \omega t > \qquad [7.5(b)]$$

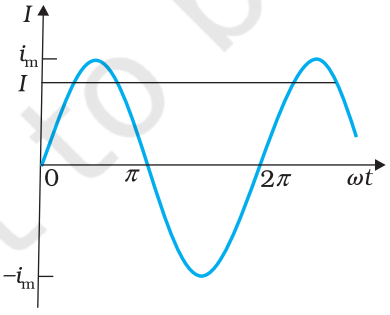
त्रिकोणमितीय सर्वसमिका $\sin^2 \omega t = (1/2)(1 - \cos 2\omega t)$, का उपयोग करने पर $< \sin^2 \omega t > = (1/2)(1 - < \cos 2\omega t >)$ और चूँकि $< \cos 2\omega t > = 0$**, इसीलिए

$$< \sin^2 \omega t > = \frac{1}{2}$$

अत:,

$$\bar{p} = \frac{1}{2} i_m^2 R \qquad [7.5(c)]$$

ac शक्ति को उसी रूप में व्यक्त करने के लिए जिसमें dc शक्ति ($P = i^2R$) को व्यक्त किया जाता है धारा के एक विशिष्ट मान का उपयोग किया जाता है जिसे *वर्ग माध्य मूल* (rms) अथवा प्रभावी (effective) धारा (चित्र 7.3) कहते हैं और इसे I_{rms} अथवा I द्वारा निर्दिष्ट किया जाता है।



चित्र 7.3 rms धारा I, शिखरधारा i_m से सूत्र $I = i_m / \sqrt{2} = 0.707\ i_m$ द्वारा संबंधित है।



जॉर्ज वेस्टिंगहाउस (1846 – 1914)
दिष्टधारा की तुलना में प्रत्यावर्ती धारा के प्रमुख पक्षधर। अत: दिष्टधारा के समर्थक थॉमस अल्वा एडीसन से उनका सीधा संघर्ष हुआ। वेस्टिंगहाउस का पूर्ण विश्वास था कि प्रत्यावर्ती धारा प्रौद्योगिकी के हाथ में ही वैद्युतीय भविष्य की कुंजी है। उन्होंने अपने नाम वाली प्रसिद्ध कम्पनी की स्थापना की और निकोला टेस्ला एवं अन्य आविष्कारकों को प्रत्यावर्ती धारा मोटरों एवं उच्च वोल्टता पर विद्युत धारा के संप्रेषण संबंधी उपकरणों के विकास के लिए नियुक्त किया, जिससे बड़े पैमाने पर प्रकाश प्राप्त करने का मार्ग खुला।

जॉर्ज वेस्टिंगहाउस (1846 – 1914)

* किसी फलन $F(t)$ का समयावधि T में माध्यमान ज्ञात करने के लिए सूत्र है $\langle F(t) \rangle = \frac{1}{T}\int_0^T F(t)\,dt$

** $< \cos 2\omega t > = \frac{1}{T}\int_0^T \cos 2\omega t\,dt = \frac{1}{T}\left[\frac{\sin 2\omega t}{2\omega}\right]_0^T = \frac{1}{2\omega T}[\sin 2\omega T - 0] = 0$

© NCERT not to be republished

इसे इस प्रकार व्यक्त किया जाता है

$$I = \sqrt{i^2} = \sqrt{\frac{1}{2} i_m^2} = \frac{i_m}{\sqrt{2}}$$
$$= 0.707\, I_m \qquad (7.6)$$

I के पदों में व्यक्त करें तो P द्वारा निर्दिष्ट माध्य शक्ति

$$P = \overline{p} = \frac{1}{2} i_m^2 R = I^2 R \qquad (7.7)$$

इसी प्रकार, *rms वोल्टता* अथवा *प्रभावी वोल्टता* को हम व्यक्त करते हैं :

$$V = \frac{v_m}{\sqrt{2}} = 0.707\, v_m \qquad (7.8)$$

समीकरण (7.3) के आधार पर

$$v_m = i_m R$$

अथवा $$\frac{v_m}{\sqrt{2}} = \frac{i_m}{\sqrt{2}} R$$

अथवा $$V = IR \qquad (7.9)$$

समीकरण (7.9) ac धारा एवं ac वोल्टता के बीच संबंध बताती है जो dc में इन राशियों के संबंध के समान ही है। यह rms मानों की अवधारणा के लाभ दर्शाती है। rms मानों के पदों में, ac परिपथों के लिए शक्ति का समीकरण (7.7) एवं धारा तथा वोल्टता का संबंध वही है जो dc के लिए होता है।

परंपरा यह कि ac राशियों को उनके rms मानों के पदों में मापा और व्यक्त किया जाए। उदाहरणार्थ, घरेलू आपूर्ति में 220 V वोल्टता का rms मान है जिसका शिखर मान है

$$v_m = \sqrt{2}\, V = (1.414)(220\ \text{V}) = 311\ \text{V}$$

वास्तव में, I अथवा rms धारा उस dc धारा के समतुल्य है जो वही माध्य शक्ति ह्रास करेगी जो प्रत्यावर्ती धारा करती है। समीकरण (7.7) को निम्नलिखित रूप में भी प्रस्तुत कर सकते हैं–

$$P = V^2 / R = I V \quad (\text{चूँकि } V = I R)$$

उदाहरण 7.1

उदाहरण 7.1 एक विद्युत बल्ब 220V आपूर्ति पर 100W शक्ति देने के लिए बनाया गया है। (a) बल्ब का प्रतिरोध; (b) स्रोत की शिखर वोल्टता एवं (c) बल्ब में प्रवाहित होने वाली rms धारा ज्ञात कीजिए।

हल

(a) दिया है $P = 100$ W एवं $V = 220$ V। बल्ब का प्रतिरोध है :

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{(220\,\text{V})^2}{100\,\text{W}} = 484\,\Omega$$

(b) स्रोत की शिखर वोल्टता

$$v_m = \sqrt{2} V = 311\,\text{V}$$

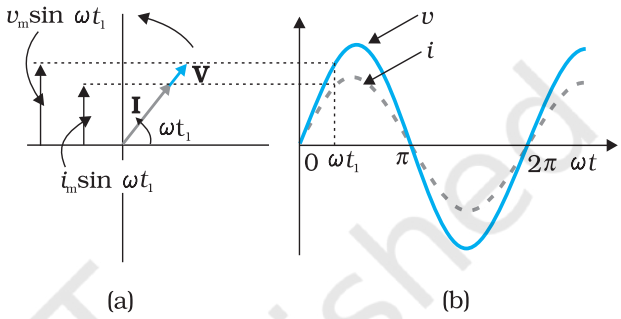
(c) चूँकि, $P = I V$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{100\,\text{W}}{220\,\text{V}} = 0.450\,\text{A}$$

© NCERT not to be republished

7.3 ac धारा एवं वोल्टता का घूर्णी सदिश द्वारा निरूपण– कलासमंजक (फेजर्स)

पिछले अनुभाग में हमने सीखा कि किसी प्रतिरोधक में प्रवाहित होने वाली धारा तथा ac वोल्टता समान कला में रहते हैं। परन्तु प्रेरक, संधारित्र अथवा इनके संयोजन युक्त परिपथों में ऐसा नहीं होता है। ac परिपथ में धारा एवं वोल्टता के बीच कला संबंध दर्शाने के लिए हम फेजर्स की धारणा का उपयोग करते हैं। फेजर चित्र के उपयोग से ac परिपथ का विश्लेषण सरलतापूर्वक हो जाता है। फेजर* जैसा कि चित्र 7.4 में दर्शाया गया है, एक सदिश है जो मूल बिंदु के परितः कोणीय वेग ω से घूर्णन करता है। फेजर्स **V** एवं I के ऊर्ध्वाधर घटक ज्यावक्रीय रूप से परिवर्तनशील राशियाँ v एवं i निरूपित करते हैं। फेजर्स **V** एवं **I** के परिमाण इन दोलायमान राशियों के आयाम अथवा शिखरमान v_m एवं i_m निरूपित करते हैं। चित्र 7.4(a) चित्र 7.1 के संगत किसी प्रतिरोधक के सिरों से जुड़ी ac वोल्टता की, किसी क्षण t_1 पर, वोल्टता एवं धारा के फेजर्स और उनका पारस्परिक संबंध दर्शाता है। वोल्टता एवं धारा के ऊर्ध्वाधर अक्ष पर प्रक्षेप अर्थात $v_m \sin\omega t$ एवं $i_m \sin \omega t$, क्रमशः, उस क्षण विशेष पर वोल्टता एवं धारा के मान निरूपित करते हैं। ज्यों-ज्यों वे आवृत्ति ω से घूर्णन करते हैं चित्र 7.4(b) में दर्शाए गए वक्र जैसे होते हैं।



चित्र 7.4 (a) चित्र 7.1 में दर्शाए गए परिपथ के लिए फेजर आरेख (b) v एवं i तथा ωt के बीच ग्राफ।

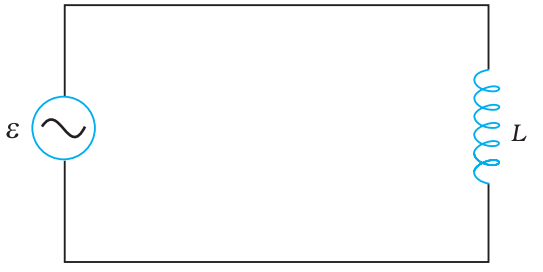
चित्र 7.4(a) से हम यह समझ सकते हैं कि प्रतिरोधक के लिए फेजर्स **V** एवं **I** एक ही दिशा में होते हैं। ऐसा हर समय होता है। इसका अर्थ है कि वोल्टता एवं धारा के बीच कला कोण शून्य होता है।

7.4 प्रेरक पर प्रयुक्त ac वोल्टता

चित्र 7.5 एक प्रेरक के सिरों पर लगा ac स्रोत दर्शाता है। प्रायः प्रेरक के लपेटों में लगे तार का अच्छा खासा प्रतिरोध होता है, लेकिन यहाँ हम यह मानेंगे कि इस प्रेरक का प्रतिरोध नगण्य है। अतः यह परिपथ विशुद्ध प्रेरणिक ac परिपथ है। माना कि स्रोत के सिरों के बीच वोल्टता $v = v_m \sin\omega t$ है क्योंकि परिपथ में कोई प्रतिरोधक नहीं है। किरखोफ लूप नियम $\sum \varepsilon(t) = 0$, का उपयोग करने से

$$v - L\frac{di}{dt} = 0 \qquad (7.10)$$

यहाँ समीकरण का दूसरा पद प्रेरक में स्वप्रेरित फैराडे emf है, एवं L प्रेरक का स्व-प्रेरकत्व है। ऋणात्मक चिह्न लेंज के नियम का अनुसरण करने से



चित्र 7.5 प्रेरक से जुड़ा एक ac स्रोत।

* यद्यपि ac परिपथ में वोल्टता एवं धारा को घूर्णन करते सदिशों-फेजर्स द्वारा निरूपित किया जाता है, अपने आप में वे सदिश नहीं हैं। वे अदिश राशियाँ हैं। होता यह है, कि आवर्ती रूप से परिवर्तित होते अदिशों की कलाएँ एवं आयाम गणितीय रूप से उसी प्रकार संयोजित होते हैं जैसे कि उन्हीं परिमाण एवं दिशाओं वाले घूर्णन सदिशों के प्रक्षेप। आवर्ती रूप से परिवर्तित होने वाली अदिश राशियों को, घूर्णन सदिशों द्वारा निरूपित करने से हम इन राशियों का संयोजन एक सरल विधि द्वारा, एक पहले से ही ज्ञात नियम का प्रयोग करके, कर सकते हैं।

© NCERT not to be republished

समाविष्ट होता है (अध्याय 6)। समीकरण (7.1) एवं समीकरण (7.10) को संयोजित करने पर

$$\frac{di}{dt} = \frac{v}{L} = \frac{v_m}{L} \sin \omega t \qquad (7.11)$$

समीकरण (7.11) में यह सन्निहित है कि धारा $i(t)$ के लिए समीकरण समय का ऐसा फलन होना चाहिए कि इसकी प्रवणता, di/dt एक ज्यावक्रीय रूप में परिवर्तनशील राशि हो जो स्रोत वोल्टता के साथ समान कला में रहती हो और जिसका आयाम v_m/L द्वारा प्राप्त होता हो। धारा का मान प्राप्त करने के लिए, हम di/dt को समय के सापेक्ष समाकलित करते हैं,

$$\int \frac{di}{dt} dt = \frac{v_m}{L} \int \sin(\omega t) dt$$

इससे हमें प्राप्त होता है :

$$i = -\frac{v_m}{\omega L} \cos(\omega t) + \text{नियतांक}$$

यहाँ समाकलन नियतांक की विमा, धारा की विमा होती है और यह समय पर निर्भर नहीं करती। चूँकि, स्रोत का emf शून्य के परित: सममितीय रूप से दोलन करता है; वह धारा, जो इसके कारण बहती है, भी सममितीय रूप से दोलन करती है। अत: न तो धारा का कोई नियत, न ही समय पर निर्भर करने वाला अवयव, अस्तित्व में आता है। इसलिए, समाकलन नियतांक का मान शून्य होता है।

$$-\cos(\omega t) = \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \text{ लिखें तो}$$

$$i = i_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \qquad (7.12)$$

यहाँ $i_m = \frac{v_m}{\omega L}$ धारा का आयाम है। राशि ωL प्रतिरोध के सदृश है, इसे *प्रेरकीय प्रतिघात* कहा जाता है एवं इसे X_L द्वारा व्यक्त करते हैं।

$$X_L = \omega L \qquad (7.13)$$

तब, धारा का आयाम है :

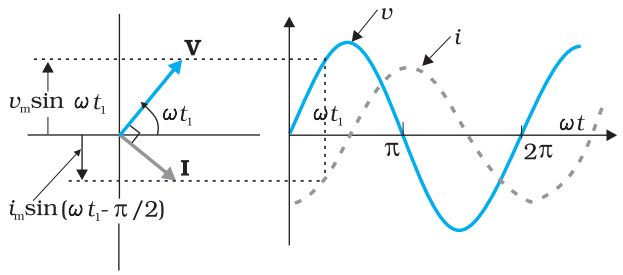
$$i_m = \frac{v_m}{X_L} \qquad (7.14)$$

प्रेरकीय प्रतिघात की विमाएँ वही हैं तो प्रतिरोध की और इसका SI मात्रक ओम (Ω) है। प्रेरकीय प्रतिघात एक शुद्ध प्रेरणिक परिपथ में धारा को वैसे ही नियंत्रित करता है जैसे प्रतिरोध एक शुद्ध प्रतिरोधक परिपथ में। प्रेरकीय प्रतिघात, प्रेरकत्व एवं धारा की आवृत्ति के अनुक्रमानुपाती होता है।

स्रोत वोल्टता एवं प्रेरक में प्रवाहित होने वाली धारा के समीकरण (7.1) एवं (7.12) की तुलना से यह ज्ञात होता है कि धारा वोल्टता से $\pi/2$ अथवा $(1/4)$ चक्र पीछे रहती है। चित्र 7.6 (a) प्रस्तुत प्रकरण के t_1 क्षण पर, वोल्टता एवं धारा फेजर्स दर्शाता है। धारा फेजर **I** वोल्टता फेजर **V** से $\pi/2$ पीछे है। जब उन्हें ω आवृत्ति से वामावर्त दिशा में घूर्णन कराते हैं तो ये वोल्टता एवं धारा जनित करते हैं जो क्रमश: समीकरण (7.1) एवं (7.12) द्वारा व्यक्त की जाती है और जिसे चित्र 7.6 (b) में दर्शाया गया है।

ac परिपथ के अवयव, R, L तथा C एवं RLC श्रेणी-परिपथ के फेज़र आरेखों से संबंधित प्रभावी सजीव चित्रण
http://www.animations.physics.unsw.edu.au//jw/AC.html
भौतिकी

© NCERT not to be republished



(a) (b)

चित्र 7.6 (a) चित्र 7.5 में दर्शाए गए परिपथ का फेजर आरेख (b) v एवं i तथा ωt के बीच ग्राफ़।

हम देखते हैं कि धारा, वोल्टता की अपेक्षा चौथाई आवर्त काल $\left[\frac{T}{4} = \frac{\pi/2}{\omega}\right]$ के पश्चात अपने अधिकतम मान को प्राप्त करती है। आपने देखा कि एक प्रेरक में प्रतिघात होता है जो धारा को उसी प्रकार नियंत्रित करता है जैसे dc परिपथ में प्रतिरोध करता है। पर, क्या प्रतिरोध की तरह ही इसमें भी शक्ति व्यय होती है? आइए, इसका पता लगाने का प्रयास करें।

प्रेरक को आपूर्त तात्क्षणिक शक्ति

$$p_L = iv = i_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \times v_m \sin(\omega t)$$

$$= -i_m v_m \cos(\omega t)\sin(\omega t)$$

$$= -\frac{i_m v_m}{2}\sin(2\omega t)$$

अतः एक पूरे चक्र में माध्य शक्ति

$$P_L = \left\langle -\frac{i_m v_m}{2}\sin(2\omega t)\right\rangle$$

$$= -\frac{i_m v_m}{2}\langle \sin(2\omega t)\rangle = 0$$

क्योंकि, एक पूरे चक्र में $\sin(2\omega t)$ का माध्य शून्य होता है

इसलिए *एक पूरे चक्र में किसी प्रेरक को आपूर्त माध्य शक्ति भी शून्य होती है।*

चित्र 7.7 में इस तथ्य को विस्तार में समझाया गया है।

उदाहरण 7.2 25.0 mH का एक शुद्ध प्रेरक 220 V के एक स्रोत से जुड़ा है। यदि स्रोत की आवृत्ति 50 Hz हो तो परिपथ का प्रेरकीय प्रतिघात एवं rms धारा ज्ञात कीजिए।

हल प्रेरकीय प्रतिघात

$$X_L = 2\pi\nu L = 2 \times 3.14 \times 50 \times 25 \times 10^{-3}\ \Omega$$

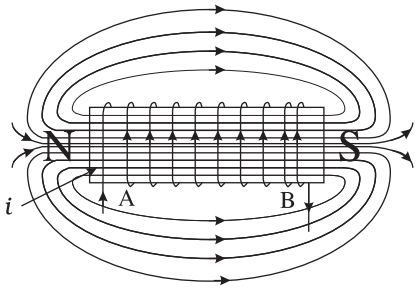
$$= 7.85\Omega$$

परिपथ में rms धारा

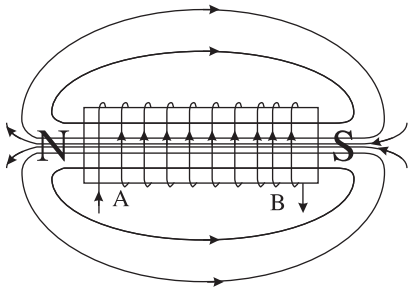
$$I = \frac{V}{X_L} = \frac{220\,\text{V}}{7.85\,\Omega} = 28\text{A}$$

उदाहरण 7.2

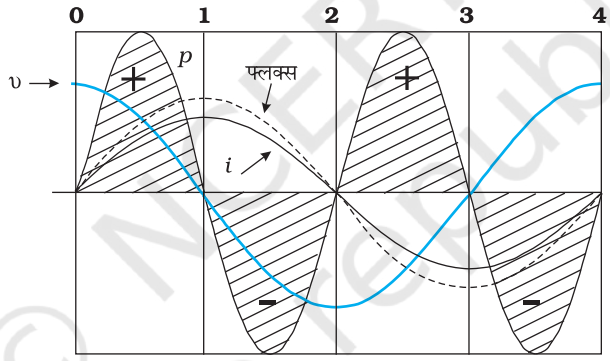
© NCERT not to be republished



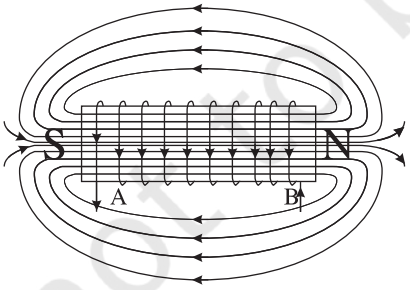
0-1 कुंडली में प्रवाहित होने वाली धारा i, जो कुंडली में बिंदु A पर प्रवेश करती है, शून्य से अधिकतम मान तक बढ़ती है। फ्लक्स रेखाएँ स्थापित होती हैं अर्थात क्रोड चुंबकित होता है। दर्शायी गई ध्रुव स्थिति के लिए, वोल्टता एवं धारा दोनों धनात्मक होते हैं, अत: इनका गुणनफल p धनात्मक होता है। *स्रोत से ऊर्जा अवशोषित होती है।*



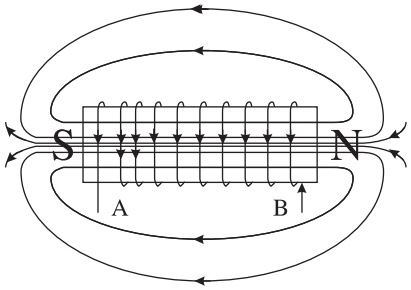
1-2 कुंडली में प्रवाहित होने वाली धारा अभी भी धनात्मक है परन्तु कम हो रही है। आधे चक्र के अंत में क्रोड विचुंबकित हो जाता है और कुल फ्लक्स शून्य हो जाता है। वोल्टता v ऋणात्मक है (क्योंकि di/dt का मान ऋणात्मक होता है) वोल्टता एवं धारा का गुणनफल ऋणात्मक होता है और *ऊर्जा स्रोत को लौटाई जाने लगती है।*



वोल्टता/धारा का एक पूर्ण चक्र। ध्यान दीजिए कि धारा वोल्टता से पीछे है।



2-3 धारा i ऋणात्मक हो जाती है अर्थात यह बिंदु B से प्रवेश कर बिंदु A से बाहर आती है। क्योंकि धारा की दिशा बदल गई है, चुंबक के ध्रुव भी बदल जाते हैं। धारा और वोल्टता दोनों ऋणात्मक हो जाते हैं अत: उनका गुणनफल p धनात्मक है। *ऊर्जा अवशोषित होती है।*



3-4 धारा i कम होती है और 4 पर धारा शून्य हो जाती है। 4 पर क्रोड विचुंबकित हो जाता है तथा फ्लक्स शून्य है। वोल्टता धनात्मक एवं धारा ऋणात्मक हैं। अत: शक्ति ऋणात्मक है। *जो ऊर्जा 2-3 चक्र के दौरान अवशोषित हुई थी ऊर्जा स्रोत को वापस लौटा दी जाती है।*

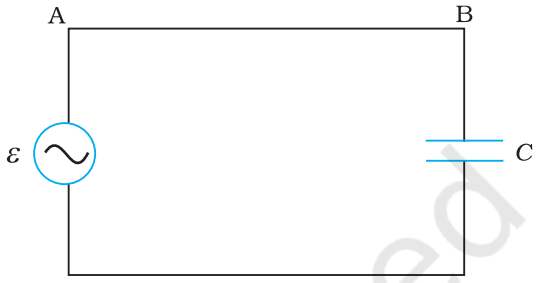
चित्र 7.7 किसी प्रेरक का चुंबकन एवं विचुंबकन।

© NCERT not to be republished

7.5 संधारित्र पर प्रयुक्त ac वोल्टता

चित्र 7.8 में एक संधारित्रीय ac परिपथ दर्शाया गया है जिसमें केवल एक संधारित्र एक ऐसे ac स्रोत ε से जुड़ा है जो वोल्टता $v = v_m \sin \omega t$ प्रदान करता है।

जब dc परिपथ में वोल्टता स्रोत से किसी संधारित्र को जोड़ा जाता है तो इसमें धारा, उस अल्पकाल के लिए ही प्रवाहित होती है जो संधारित्र की प्लेटों पर एकत्रित होता है, उनके बीच विभवांतर बढ़ता है, जो धारा का विरोध करता है। अर्थात dc परिपथ में ज्यों-ज्यों संधारित्र आवेशित होता है यह परिपथ धारा को सीमित करता है अथवा उसके प्रवाह का विरोध करता है। जब संधारित्र पूरी तरह आवेशित हो जाता है तो परिपथ में धारा गिर कर शून्य हो जाती है।



चित्र 7.8 एक संधारित्र से जुड़ी ac वोल्टता।

जब संधारित्र को ac स्रोत से जोड़ा जाता है, जैसा कि चित्र 7.8 में दर्शाया गया है तो यह धारा को नियंत्रित तो करता है, पर आवेश के प्रवाह को पूरी तरह रोकता नहीं है। क्योंकि धारा प्रत्येक अर्द्ध चक्र में प्रत्यावर्तित होती है संधारित्र भी एकांतर क्रम में आवेशित एवं अनावेशित होता है। माना कि किसी क्षण t पर संधारित्र पर आवेश q है। तो संधारित्र के सिरों के बीच तात्क्षणिक वोल्टता है,

$$v = \frac{q}{C} \tag{7.15}$$

किरखोफ के लूप नियम के अनुसार, स्रोत एवं संधारित्र के सिरों के बीच वोल्टताएँ समान हैं, अत:

$$v_m \sin \omega t = \frac{q}{C}$$

धारा का मान ज्ञात करने के लिए हम संबंध $i = \frac{dq}{dt}$ का उपयोग करते हैं

$$i = \frac{d}{dt}(v_m C \sin \omega t) = \omega C v_m \cos(\omega t)$$

संबंध, $\cos(\omega t) = \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$, का उपयोग करने से हम पाते हैं,

$$i = i_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \tag{7.16}$$

यहाँ, दोलायमान धारा का आयाम $i_m = \omega C v_m$ है। इसको हम

$$i_m = \frac{v_m}{(1/\omega C)}$$

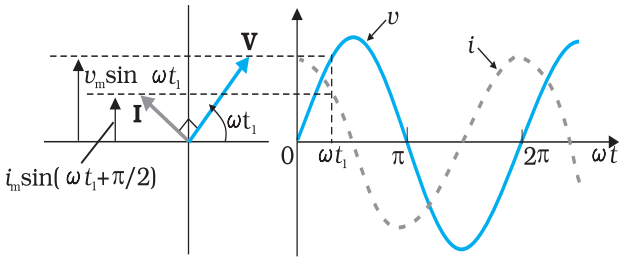
के रूप में लिखें और विशुद्ध प्रतिरोधकीय परिपथ के तदनुरूपी सूत्र $i_m = v_m/R$ से तुलना करें तो हम पाते हैं कि $(1/\omega C)$ की भूमिका प्रतिरोध जैसी ही है। इसको *संधारित्र प्रतिघात* कहते हैं और X_c से निरूपित करते हैं।

$$X_c = 1/\omega C \tag{7.17}$$

अत: धारा का आयाम है,

$$i_m = \frac{v_m}{X_C} \tag{7.18}$$

© NCERT not to be republished



(a) (b)

चित्र 7.9 (a) चित्र 7.7 में दर्शाए गए परिपथ का फेजर आरेख (b) v एवं i का समय के सापेक्ष ग्राफ़।

संधारित्रीय प्रतिघात की विमाएँ वही हैं जो प्रतिरोध की और इसका SI मात्रक ओम (Ω) है। संधारित्रीय प्रतिघात उसी प्रकार विशुद्ध संधारित्रीय परिपथ में धारा को नियंत्रित करता है जैसे विशुद्ध प्रतिरोधकीय परिपथ में प्रतिरोध, परंतु इसका मान आवृत्ति एवं धारिता के व्युत्क्रमानुपाती होता है।

समीकरण (7.16) की स्रोत वोल्टता की समीकरण (7.1) से तुलना करने पर हम पाते हैं कि धारा, वोल्टता से $\pi/2$ अग्रगामी होती है। चित्र 7.9 (a) किसी क्षण t_1 पर फेजर आरेख दर्शाता है। यहाँ धारा फेजर **I** , वोल्टता फेजर **V** से $\pi/2$ कोण अग्रगामी है जब वे वामावर्त घूर्णन करते हैं। चित्र 7.9 (b), वोल्टता एवं धारा में समय के साथ होने वाला परिवर्तन दर्शाता है। हम देखते हैं कि धारा, वोल्टता की तुलना में चौथाई समयकाल पहले अधिकतम मान ग्रहण करती है।

संधारित्र को आपूर्त तात्क्षणिक शक्ति,

$$p_c = i\,v = i_m \cos(\omega t) v_m \sin(\omega t)$$
$$= i_m v_m \cos(\omega t) \sin(\omega t)$$
$$= \frac{i_m v_m}{2} \sin(2\omega t) \qquad (7.19)$$

अत: संधारित्र के प्रकरण में, माध्य शक्ति

$$\bar{P}_C = \left\langle \frac{i_m v_m}{2} \sin(2\omega t) \right\rangle = \frac{i_m v_m}{2} \langle \sin(2\omega t) \rangle = 0$$

क्योंकि एक पूर्ण चक्र पर $\langle \sin(2\omega t) \rangle = 0$, चित्र 7.10 इसकी विस्तार से व्याख्या करता है। इस प्रकार हम देखते हैं कि प्रेरक के प्रकरण में धारा, वोल्टता से $\pi/2$ कोण पश्चगामी एवं संधारित्र के प्रकरण में धारा, वोल्टता से $\pi/2$ कोण अग्रगामी होती है।

उदाहरण 7.3

उदाहरण 7.3 एक लैंप किसी संधारित्र के साथ श्रेणीक्रम में जुड़ा है। dc एवं ac संयोजनों के लिए अपने प्रेक्षणों की प्रागुक्ति कीजिए। प्रत्येक प्रकरण में बताइए कि संधारित्र की धारिता कम करने का क्या प्रभाव होगा?

हल जब संधारित्र के साथ किसी dc स्रोत को जोड़ते हैं तो संधारित्र आवेशित होता है और उसके पूर्ण आवेशन के बाद परिपथ में कोई धारा प्रवाहित नहीं होती और लैंप प्रकाशित नहीं होता है। इस मामले में C को कम करने से कोई परिवर्तन नहीं आएगा। ac स्रोत के साथ, संधारित्र $(1/\omega C)$ संधारित्रीय प्रतिघात लगाता है और परिपथ में धारा प्रवाहित होती है। परिणामत: लैंप प्रकाश देगा। C को कम करने से प्रतिघात बढ़ेगा और लैंप पहले की तुलना में दीप्ति से प्रकाशित होगा।

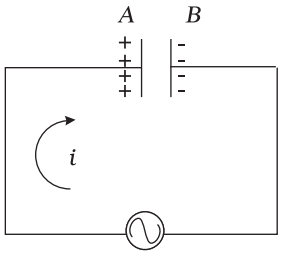
उदाहरण 7.4

उदाहरण 7.4 15.0 μF का एक संधारित्र, 220 V, 50 Hz स्रोत से जोड़ा गया है। परिपथ का संधारित्रीय प्रतिघात और इसमें प्रवाहित होने वाली (rms एवं शिखर) धारा का मान बताइए। यदि आवृत्ति को दोगुना कर दिया जाए तो संधारित्रीय प्रतिघात और धारा के मान पर क्या प्रभाव होगा?

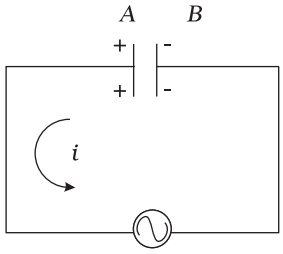
हल संधारित्रीय प्रतिघात है,

$$X_C = \frac{1}{2\pi\nu C} = \frac{1}{2\pi(50\text{Hz})(15.0\times10^{-6}\text{F})} = 212\ \Omega$$

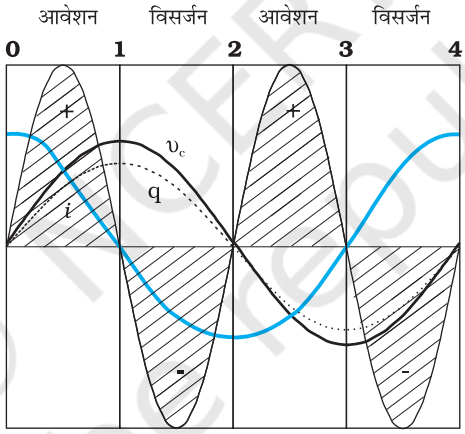
© NCERT not to be republished



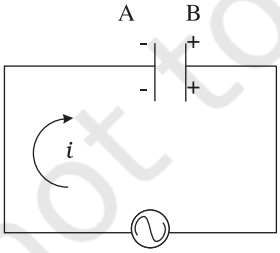
0-1 धारा i दर्शाए अनुसार प्रवाहित होती है एवं 0 पर अधिकतम मान से 1 पर शून्य हो जाती है। प्लेट A धनावेशित होती है जबकि प्लेट B पर ऋणात्मक आवेश q बढ़ता है जो 1 पर अधिकतम हो जाता है जहाँ धारा शून्य हो जाती है। वोल्टता $v_c = q/C$ आवेश q के साथ समान कला में रहती है और 1 पर शून्य हो जाती है। धारा और वोल्टता दोनों धनात्मक होती हैं। अत: $p = v_c i$ धनात्मक है। *इस चौथाई चक्र में जैसे-जैसे संधारित्र आवेशित होता है, यह स्रोत से ऊर्जा अवशोषित करता है।*



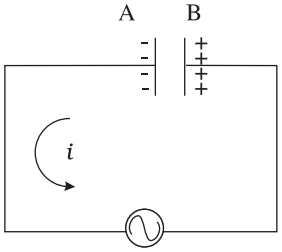
1-2 धारा i की दिशा उलट जाती है। संगृहित आवेश समाप्त हो जाता है अर्थात संधारित्र इस चौथाई चक्र में विसर्जित हो जाता है। वोल्टता कम होती जाती है पर धनात्मक बनी रहती है। धारा ऋणात्मक है। अत: शक्ति जो इनका गुणनफल है, ऋणात्मक होती है। **0-1** *चौथाई चक्र में अवशोषित ऊर्जा इस चौथाई चक्र में वापस मिल जाती है।*



वोल्टता/धारा/आवेश/शक्ति का एक पूर्ण चक्र। ध्यान दीजिए कि धारा वोल्टता की तुलना में अग्रगामी है।



2-3 क्योंकि धारा i A से B की ओर बहती है, संधारित्र विपरीत ध्रुवता के साथ आवेशित होता है, अर्थात प्लेट B पर धनात्मक एवं प्लेट A पर ऋणात्मक आवेश आने लगता है। धारा एवं वोल्टता दोनों ही ऋणात्मक होते हैं। उनका गुणनफल p धनात्मक है। इस चौथाई चक्र में संधारित्र ऊर्जा *अवशोषित* करता है।



3-4 क्षण **3** पर धारा i की दिशा में उत्क्रमण हो जाता है और यह B से A की ओर प्रवाहित होने लगती है। संग्रहित आवेश समाप्त हो जाता है और वोल्टता v_c का परिमाण कम हो जाता है। जब **4** पर संधारित्र पूर्णत: आवेशित हो जाता है तो v_c का मान शून्य हो जाता है। शक्ति ऋणात्मक होती है और **2-3** *में अवशोषित ऊर्जा स्रोत को वापस लौटा दी जाती है। कुल अवशोषित ऊर्जा शून्य है।*

चित्र 7.10 एक संधारित्र का आवेशन एवं निरावेशन।

© NCERT not to be republished

उदाहरण 7.4

rms धारा है

$$I = \frac{V}{X_C} = \frac{220\,\text{V}}{212\ \Omega} = 1.04\,\text{A}$$

शिखर धारा है

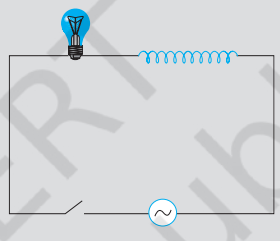
$$i_m = \sqrt{2}I = (1.41)(1.04\,A) = 1.47A$$

यह धारा +1.47A एवं –1.47 A के बीच दोलन करती है और वोल्टता से $\pi/2$ कोण अग्रगामी होती है।

यदि आवृत्ति दोगुनी हो जाए तो संधारित्रीय प्रतिघात आधा रह जाता है, परिणामतः धारा दोगुनी हो जाती है।

उदाहरण 7.5

उदाहरण 7.5 एक प्रकाश बल्ब और एक सरल कुंडली प्रेरक, एक कुंजी सहित, चित्र में दर्शाए अनुसार, एक ac स्रोत से जोड़े गए हैं। स्विच को बंद कर दिया गया है और कुछ समय पश्चात एक लोहे की छड़ प्रेरक कुंडली के अंदर प्रविष्ट कराई जाती है।



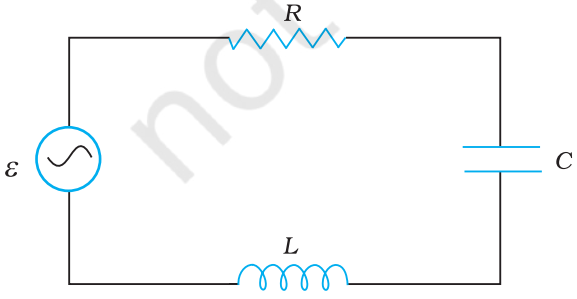
चित्र 7.11

छड़ को प्रविष्ट कराते समय प्रकाश बल्ब की चमक (a) बढ़ती है (b) घटती है (c) अपरिवर्तित रहती है। कारण सहित उत्तर दीजिए।

हल जैसे-जैसे लोहे की छड़ कुंडली में प्रवेश करती है कुंडली के अंदर का चुंबकीय क्षेत्र इसे चुंबकित कर देता है जिससे कुंडली के अंदर चुंबकीय क्षेत्र बढ़ जाता है। अतः कुंडली का प्रेरकत्व बढ़ जाता है। परिणामतः कुंडली का प्रेरकीय प्रतिघात बढ़ जाता है। इस प्रकार प्रयुक्त ac वोल्टता का अधिकांश भाग प्रेरक के सिरों के बीच प्रभावी हो जाता है और बल्ब के सिरों के बीच वोल्टता कम रह जाती है। अतः बल्ब की दीप्ति कम हो जाती है।

7.6 श्रेणीबद्ध LCR परिपथ पर प्रयुक्त ac वोल्टता

चित्र 7.12, ac स्रोत ε से जुड़ा श्रेणीबद्ध LCR परिपथ दर्शाता है। पहले की ही भाँति हम ac स्रोत की वोल्टता $v = v_m \sin \omega t$ लेते हैं।



चित्र 7.12 किसी ac स्रोत से संयोजित श्रेणीबद्ध LCR परिपथ।

यदि संधारित्र पर आवेश q एवं किसी क्षण t पर परिपथ में प्रवाहित धारा i है तो किरखोफ़ पाश नियम से

$$L\frac{di}{dt} + iR + \frac{q}{C} = v \qquad (7.20)$$

हम तात्क्षणिक धारा i और प्रयुक्त प्रत्यावर्ती वोल्टता v के साथ इसका कला संबंध ज्ञात करना चाहते हैं। हम इस समस्या को हल करने के लिए दो विधियों का उपयोग करेंगे। पहली विधि में हम फेजर्स तकनीक का उपयोग करेंगे और दूसरी विधि में हम समीकरण (7.20) को विश्लेषणात्मक रूप से हल करके i की कालाश्रितता प्राप्त करेंगे।

© NCERT not to be republished

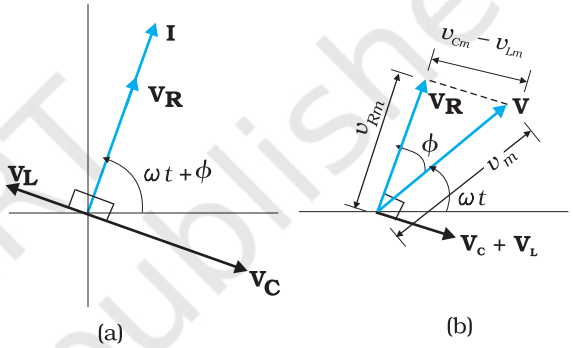
7.6.1 फेजर आरेख द्वारा हल

चित्र 7.12 में दर्शाए गए परिपथ में प्रतिरोधक, प्रेरक एवं संधारित्र श्रेणीक्रम में जुड़े हैं। अत: किसी क्षण विशेष पर परिपथ के हर घटक में ac धारा, उसके आयाम एवं कला समान हैं। माना कि

$$i = i_m \sin(\omega t + \phi) \qquad (7.21)$$

यहाँ ϕ स्रोत की वोल्टता और परिपथ में प्रवाहित होने वाली धारा में कला-अंतर है। पिछले अनुभागों में हमने जो सीखा है उसके आधार पर हम वर्तमान प्रकरण का एक फेजर आरेख बनाएँगे।

मान लीजिए कि समीकरण (7.21) द्वारा प्रदत्त परिपथ की धारा को फेजर **I** द्वारा व्यक्त करें। और प्रेरक, प्रतिरोधक, संधारित्र एवं स्रोत के सिरों के बीच वोल्टताओं को क्रमश: $\mathbf{V_L}$, $\mathbf{V_R}$, $\mathbf{V_C}$, एवं **V** से निरूपित करें तो पिछले अनुभाग से हम जानते हैं कि $\mathbf{V_R}$, **I** के समांतर है, $\mathbf{V_C}$ धारा **I** से $\pi/2$ रेडियन पीछे है तथा $\mathbf{V_L}$, **I** से $\pi/2$ रेडियन आगे है। चित्र 7.13(a) में $\mathbf{V_L}$, $\mathbf{V_R}$, $\mathbf{V_C}$ एवं **I** को समुचित कला संबंधों के साथ दर्शाया गया है।



चित्र 7.13 (a) फेजर्स $\mathbf{V_L}$, $\mathbf{V_R}$, $\mathbf{V_C}$, एवं *I* के बीच पारस्परिक संबंध (b) फेजर्स $\mathbf{V_L}$, $\mathbf{V_R}$, एवं $(\mathbf{V_L} + \mathbf{V_C})$ के बीच 7.12 में दर्शाए गए परिपथ के लिए संबंध।

इन फेजर्स की लंबाई अर्थात $\mathbf{V_R}$, $\mathbf{V_C}$ एवं $\mathbf{V_L}$ के आयाम हैं :

$$v_{Rm} = i_m R,\ v_{Cm} = i_m X_C,\ v_{Lm} = i_m X_L \qquad (7.22)$$

परिपथ के लिए वोल्टता समीकरण (7.20) को इस प्रकार लिखा जा सकता है

$$v_L + v_R + v_C = v \qquad (7.23)$$

वह फेजर संबंध जिसके ऊर्ध्वाधर घटकों द्वारा उपरोक्त समीकरण बनती है, वह है

$$\mathbf{V_L} + \mathbf{V_R} + \mathbf{V_C} = \mathbf{V} \qquad (7.24)$$

इस संबंध को चित्र 7.13 (b) में प्रस्तुत किया गया है। चूँकि, $\mathbf{V_C}$ एवं $\mathbf{V_L}$ सदैव एक ही सरल रेखा में और एक दूसरे की विपरीत दिशाओं में होते हैं, उनको एक एकल फेजर $(\mathbf{V_C} + \mathbf{V_L})$ के रूप में संयोजित किया जा सकता है जिसका परिमाण $|v_{Cm} - v_{Lm}|$ होता है। चूँकि **V** उस समकोण त्रिभुज के कर्ण से निरूपित किया गया है जिसकी भुजाएँ $\mathbf{V_R}$ एवं $(\mathbf{V_C} + \mathbf{V_L})$ हैं, पाइथागोरस प्रमेय द्वारा,

$$v_m^2 = v_{Rm}^2 + (v_{Cm} - v_{Lm})^2$$

समीकरण (7.22) से v_{Rm}, v_{Cm}, एवं v_{Lm} के मान प्रत्येक समीकरण में रखने पर

$$v_m^2 = (i_m R)^2 + (i_m X_C - i_m X_L)^2$$

$$= i_m^2 \left[R^2 + (X_C - X_L)^2\right]$$

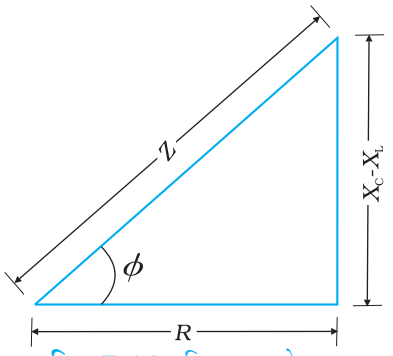
अथवा $$i_m = \frac{v_m}{\sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}} \qquad [7.25(a)]$$

किसी परिपथ में प्रतिरोध से समतुल्यता के आधार पर हम ac परिपथ के लिए *प्रतिबाधा*, *Z* पद को उपयोग में लाएँ तो

$$i_m = \frac{v_m}{Z} \qquad [7.25(b)]$$

यहाँ $$Z = \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2} \qquad (7.26)$$

© NCERT not to be republished



चित्र 7.14 प्रतिबाधा आरेख।

चूँकि फेजर **I** सदैव फेजर $\mathbf{V_R}$ के समांतर होता है, कला कोण ϕ $\mathbf{V_R}$ एवं **V** के बीच बना कोण है और चित्र 7.14 के आधार पर इसका मान ज्ञात किया जा सकता है

$$\tan\phi = \frac{v_{Cm} - v_{Lm}}{v_{Rm}}$$

समीकरण (7.22) का उपयोग करने पर,

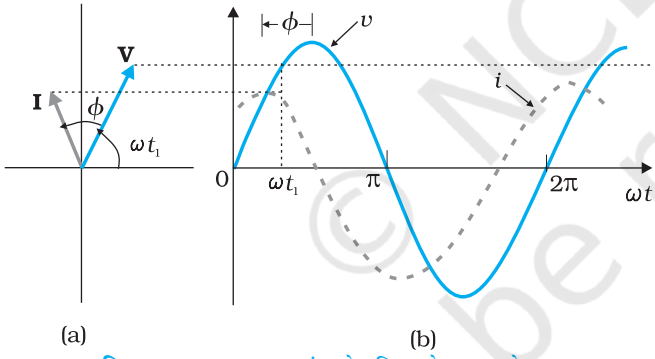
$$\tan\phi = \frac{X_C - X_L}{R} \qquad (7.27)$$

समीकरणों (7.26) एवं (7.27) का ग्राफीय निरूपण चित्र (7.14) में प्रस्तुत किया गया है। यह *प्रतिबाधा आरेख* कहलाता है। यह एक समकोण त्रिभुज है जिसका कर्ण Z है।

समीकरण 7.25(a) धारा का आयाम बताती है एवं समीकरण (7.27) से कलाकोण का मान प्राप्त होता है। इनके साथ मिलकर समीकरण (7.21) पूर्णतः निर्दिष्ट हो जाती है।

यदि $X_C > X_L$, ϕ धनात्मक होता है तथा परिपथ का धारितात्मक व्यवहार प्रधान हो जाता है। परिणामतः परिपथ में धारा स्रोत वोल्टता से अग्र हो जाती है। यदि $X_C < X_L$, ϕ ऋणात्मक होता है तथा परिपथ का प्रेरकीय व्यवहार प्रमुख हो जाता है। परिणामतः परिपथ में धारा स्रोत वोल्टता से पश्च हो जाती है।

चित्र 7.15, $X_C > X_L$ के प्रकरण के लिए फेजर आरेख है और यह ωt के साथ v एवं i में होने वाले परिवर्तन को दर्शाता है।



चित्र 7.15 (a) **V** एवं **I** के लिए फेजर आरेख
(b) श्रेणीबद्ध LCR परिपथ के लिए ωt के साथ v एवं i में परिवर्तन दर्शाने वाले ग्राफ (यहाँ $X_C > X_L$)।

इस प्रकार, फेजर्स तकनीक का उपयोग करके, हमने श्रेणीबद्ध *LCR* परिपथ में धारा का आयाम एवं कला ज्ञात कर ली है। लेकिन ac परिपथों के विश्लेषण की इस विधि में कुछ कमियाँ हैं। प्रथम तो यह कि फेज़र आरेख प्रारंभिक स्थितियों के विषय में कोई सूचना नहीं देते। आप t का कोई भी यादृच्छिक मान (जैसा कि इस अध्याय में सब जगह t_1 लिया गया है) ले सकते हैं और विभिन्न फेजर्स के बीच सापेक्षिक कोण दर्शाते हुए अलग-अलग फेजर्स आरेख बना सकते हैं। इस प्रकार प्राप्त हल को *स्थायी अवस्था हल* कहते हैं। यह कोई व्यापक हल नहीं है। इसके अतिरिक्त एक *क्षणिक हल* भी होता है जो $v = 0$ के लिए भी लागू होता है। व्यापक हल, क्षणिक हल एवं स्थायी अवस्था हल के योग से प्राप्त होता है। पर्याप्त दीर्घकाल के पश्चात क्षणिक हल के प्रभाव निष्प्रभावी हो जाते हैं और परिपथ के आचरण का वर्णन स्थायी अवस्था द्वारा ही हल किया जाता है।

7.6.2 विश्लेषणात्मक हल

परिपथ के लिए वोल्टता समीकरण है,

$$L\frac{di}{dt} + Ri + \frac{q}{C} = v$$

$$= v_m \sin\omega t$$

हम जानते हैं कि $i = dq/dt$ इसलिए, $di/dt = d^2q/dt^2$ अतः, q के पदों में, वोल्टता समीकरण को लिख सकते हैं,

© NCERT not to be republished

$$L\frac{d^2q}{dt^2}+R\frac{dq}{dt}+\frac{q}{C}=v_m\sin\omega t \qquad (7.28)$$

यह किसी प्रणोदित अवमंदित दोलक के समीकरण जैसी ही है। [देखिए समीकरण (14.37(b) कक्षा 11 भौतिकी पाठ्यपुस्तक]। मान लिया कि इसका एक हल है,

$$q = q_m \sin(\omega t + \theta) \qquad [7.29(a)]$$

$$\text{ताकि, } \frac{dq}{dt} = q_m\omega\cos(\omega t+\theta) \qquad [7.29(b)]$$

$$\text{एवं } \frac{d^2q}{dt^2} = -q_m\omega^2\sin(\omega t+\theta) \qquad [7.29(c)]$$

इन मानों को समीकरण (7.28) में रखने पर, हम पाते हैं

$$q_m\omega\left[R\cos(\omega t+\theta)+(X_C-X_L)\sin(\omega t+\theta)\right] = v_m\sin\omega t \qquad (7.30)$$

यहाँ हमने $X_c = 1/\omega C$ एवं $X_L = \omega L$ संबंधों का उपयोग किया है। समीकरण (7.30) के वाम पक्ष को $Z=\sqrt{R^2+(X_c-X_L)^2}$ से गुणा एवं विभाजित करने पर,

$$q_m\omega Z\left[\frac{R}{Z}\cos(\omega t+\theta)+\frac{(X_C-X_L)}{Z}\sin(\omega t+\theta)\right] = v_m\sin\omega t \qquad (7.31)$$

अब, माना कि $\frac{R}{Z}=\cos\phi$

$$\text{तथा} \quad \frac{(X_C-X_L)}{Z}=\sin\phi$$

$$\text{ताकि} \quad \phi=\tan^{-1}\frac{X_C-X_L}{R} \qquad (7.32)$$

समीकरण (7.31) में यह मान प्रतिस्थापित करके सरलीकरण करने पर,

$$q_m\omega Z\cos(\omega t+\theta-\phi) = v_m\sin\omega t \qquad (7.33)$$

इस समीकरण के दोनों पक्षों की तुलना करने पर हम पाते हैं कि,

$$v_m = q_m\omega Z = i_m Z$$

यहाँ

$$i_m = q_m\omega \qquad [7.33\ (a)]$$

$$\text{एवं } \theta-\phi=-\frac{\pi}{2} \text{ अथवा } \theta=-\frac{\pi}{2}+\phi \qquad [7.33\ (b)]$$

इसलिए परिपथ में धारा का संबंध है

$$i=\frac{dq}{dt}=q_m\omega\cos(\omega t+\theta)$$

$$= i_m\cos(\omega t+\theta)$$

$$\text{अथवा} \quad i = i_m\sin(\omega t+\phi) \qquad (7.34)$$

$$\text{यहाँ} \quad i_m=\frac{v_m}{Z}=\frac{v_m}{\sqrt{R^2+(X_C-X_L)^2}} \qquad [7.34\ (a)]$$

$$\text{एवं} \quad \phi=\tan^{-1}\frac{X_C-X_L}{R}$$

© NCERT not to be republished

अत: परिपथ में धारा के आयाम एवं कला के लिए विश्लेषणात्मक हल फेजर्स तकनीक से प्राप्त हल से मेल खाता है।

7.6.3 अनुनाद

श्रेणीबद्ध *RLC* परिपथ का एक रोचक अभिलक्षण अनुनाद की परिघटना है। अनुनाद ऐसे सभी निकायों की एक सामान्य परिघटना है जिनमें एक विशिष्ट आवृत्ति से दोलन की प्रवृत्ति होती है। यह आवृत्ति उस निकाय की *प्राकृतिक आवृत्ति* कहलाती है। यदि इस प्रकार का कोई निकाय किसी ऐसे ऊर्जा स्रोत द्वारा संचालित हो जिसकी आवृत्ति निकाय की प्राकृतिक आवृत्ति के सन्निकट हो तो निकाय बहुत अधिक आयाम के साथ दोलन करता हुआ पाया जाता है। इसका एक सुपरिचित उदाहरण झूले पर बैठा हुआ बच्चा है। झूले की, लोलक की ही तरह मूल बिन्दु के इधर-उधर दोलन की एक प्राकृतिक आवृत्ति होती है। यदि बच्चा रस्सी को नियमित समय-अंतरालों पर खींचता है और खींचने की आवृत्ति लगभग झूले के दोलनों की प्राकृतिक आवृत्ति के बराबर हो तो झूलने का आयाम अधिक होगा (देखिए कक्षा 11 का अध्याय 14)।

v_m आयाम एवं ω आवृत्ति की वोल्टता द्वारा संचालित *RLC* परिपथ के लिए हम पाते हैं कि धारा आयाम,

$$i_m = \frac{v_m}{Z} = \frac{v_m}{\sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}}$$

यहाँ $X_c = 1/\omega C$ एवं $X_L = \omega L$ अत: यदि ω को परिवर्तित किया जाए तो एक विशिष्ट आवृत्ति ω_0 पर $X_c = X_L$ एवं प्रतिबाधा Z का मान न्यूनतम $\left(Z = \sqrt{R^2 + 0^2} = R\right)$ हो जाता है। यह आवृत्ति *अनुनादी आवृत्ति* कहलाती है :

$$X_c = X_L \text{ या } \frac{1}{\omega_0 C} = \omega_0 L$$

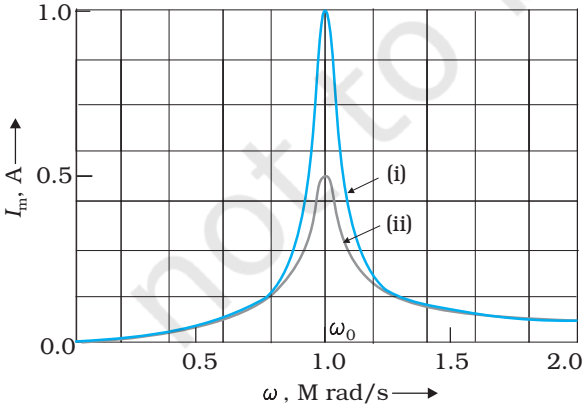
या $$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad (7.35)$$

अनुनादी आवृत्ति पर धारा का आयाम अधिकतम होता है और इसका मान है, $i_m = v_m/R$

चित्र 7.16 किसी *RLC* श्रेणीक्रम परिपथ के लिए ω के साथ I_m का परिवर्तन दर्शाता है। यहाँ $L = 1.00$ mH, $C = 1.00$ nF है तथा R के दो अलग-अलग मान (i) $R = 100\ \Omega$ एवं (ii) $R = 200\ \Omega$ लिए गए हैं। प्रयुक्त स्रोत के लिए $V_m = 100$ V, इस प्रकरण में $\omega_0 = \left(\frac{1}{\sqrt{LC}}\right) = 1.00\times10^6$ rad/s।

हम देखते हैं कि अनुनादी आवृत्ति पर धारा का आयाम अधिकतम होता है। चूँकि $i_m = v_m / R$ अनुनाद की स्थिति में, प्रकरण (i) में धारा का परिमाण प्रकरण (ii) की स्थिति में धारा के परिमाण से दोगुना है।

अनुनादी परिपथों के तरह-तरह के अनुप्रयोग होते हैं उदाहरणार्थ, रेडियो एवं टीवी सेटों के समस्वरण की क्रियाविधि। किसी रेडियो का ऐंटिना अनेक प्रसारक स्टेशनों से संकेतों का



चित्र 7.16 दो प्रकरणों *(i)* $R = 100\ \Omega$ एवं *(ii)* $R = 200\ \Omega$ के लिए, ω के साथ I_m का परिवर्तन। दोनों प्रकरणों में $L = 1.00$ mH

© NCERT not to be republished

अभिग्रहण करता है। ऐंटिना द्वारा अभिग्रहित संकेत, रेडियो के समस्वरण परिपथ में स्रोत का कार्य करते हैं, इसलिए परिपथ अनेक आवृत्तियों पर संचालित किया जा सकता है। परंतु किसी विशिष्ट रेडियो स्टेशन को सुनने के लिए हम रेडियो को समस्वरित करते हैं। समस्वरण के लिए हम समस्वरण परिपथ में लगे संधारित्र की धारिता को परिवर्तित कर परिपथ की आवृत्ति को परिवर्तित कर इस स्थिति में लाते हैं कि उसकी अनुनादी आवृत्ति अभिगृहित रेडियो संकेतों की आवृत्ति के लगभग बराबर हो जाए। जब ऐसा होता है तो परिपथ में उस विशिष्ट रेडियो स्टेशन से आने वाले संकेतों की आवृत्ति के धारा आयाम का मान अधिकतम हो जाता है।

एक महत्वपूर्ण एवं ध्यान देने योग्य तथ्य यह है कि अनुनाद की परिघटना केवल उन्हीं परिपथों द्वारा प्रदर्शित की जाती है जिनमें L एवं C दोनों विद्यमान होते हैं। क्योंकि केवल तभी L एवं C के सिरों के बीच की वोल्टता (विपरीत कला में होने के कारण) एक दूसरे को निरस्त करती हैं और धारा आयाम v_m/R होता है तथा कुल स्रोत वोल्टता R के सिरों के बीच ही प्रभावी पायी जाती है। इसका अर्थ यह हुआ कि RL या RC परिपथ में अनुनाद नहीं।

अनुनाद की तीक्ष्णता

श्रेणीबद्ध LCR परिपथ में धारा का आयाम,

$$i_m = \frac{v_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

और इसका मान अधिकतम होता है, जब $\omega = \omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ तथा यह अधिकतम मान होता है

$$i_m^{\text{अधिकतम}} = v_m / R$$

ω के ω_0 के अतिरिक्त सभी मानों के लिए धारा का आयाम, इसके अधिकतम मान से कम होता है। मान लीजिए कि हम ω का एक ऐसा मान चुनते हैं जिसके लिए धारा आयाम, अधिकतम मान का $1/\sqrt{2}$ गुना है। इस मान के लिए परिपथ में होने वाला शक्ति क्षय आधा हो जाता है। चित्र (7.16) के वक्र में हम देखते हैं कि ω के ऐसे दो मान हैं, ω_1 एवं ω_2, जिनमें एक ω_0 से कम है और दूसरा ω_0 से अधिक। ये दोनों मान ω_0 के इधर-उधर सममित रूप में स्थित होते हैं। हम लिख सकते हैं :

$$\omega_1 = \omega_0 + \Delta\omega$$

$$\omega_2 = \omega_0 - \Delta\omega$$

इन दोनों आवृत्तियों के बीच का अंतर $\omega_1 - \omega_2 = 2\Delta\omega$ प्रायः परिपथ का *बैंड-विस्तार* कहलाता है। राशि $(\omega_0 / 2\Delta\omega)$ को अनुनाद की तीव्रता का माप माना जाता है। $\Delta\omega$ जितना छोटा होगा, अनुनाद उतना ही तीक्ष्ण या संकीर्ण होगा।

$\Delta\omega$ के लिए व्यंजक प्राप्त करने के लिए, ध्यान दें कि धारा-आयाम $i_m = \left(1/\sqrt{2}\right) i_m^{\text{अधिकतम}}$ तब होता है जब $\omega_1 = \omega_0 + \Delta\omega$, इसलिए

ω_1 पर, $\quad i_m = \dfrac{v_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega_1 L - \dfrac{1}{\omega_1 C}\right)^2}}$

$$= \frac{i_m^{\text{अधिकतम}}}{\sqrt{2}} = \frac{v_m}{R\sqrt{2}}$$

© NCERT not to be republished

अथवा $$\sqrt{R^2+\left(\omega_1 L-\frac{1}{\omega_1 C}\right)^2}=R\sqrt{2}$$

अथवा $$R^2+\left(\omega_1 L-\frac{1}{\omega_1 C}\right)^2=2R^2$$

$$\omega_1 L-\frac{1}{\omega_1 C}=R$$

जिसको लिख सकते हैं

$$(\omega_0+\Delta\omega)L-\frac{1}{(\omega_0+\Delta\omega)C}=R$$

$$\omega_0 L\left(1+\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)-\frac{1}{\omega_0 C\left(1+\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)}=R$$

वामपक्ष के दूसरे पद में $\omega_0^2=\frac{1}{LC}$ का उपयोग करने पर

$$\omega_0 L\left(1+\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)-\frac{\omega_0 L}{\left(1+\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)}=R$$

चूँकि $\frac{\Delta\omega}{\omega_0}<<1$, $\left(1+\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)^{-1}$ का सन्निकट मान $\left(1-\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)$ रख सकते हैं। इसलिए,

$$\omega_0 L\left(1+\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)-\omega_0 L\left(1-\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)=R$$

अथवा $$\omega_0 L\frac{2\Delta\omega}{\omega_0}=R$$

$$\Delta\omega=\frac{R}{2L} \qquad [7.36\ (a)]$$

अतः, अनुनाद की तीक्ष्णता

$$\frac{\omega_0}{2\Delta\omega}=\frac{\omega_0 L}{R} \qquad [7.36\ (b)]$$

अनुपात $\frac{\omega_0 L}{R}$ को परिपथ का *गुणवत्ता गुणांक* Q भी कहते हैं $Q=\frac{\omega_0 L}{R}$ [7.36 (c)]

समीकरण [7.36 (b)] एवं [7.36 (c)] से हम देखते हैं कि $2\Delta\omega=\frac{\omega_0}{Q}$ अतः, Q का मान जितना अधिक होगा, $2\Delta\omega$ अर्थात बैंड विस्तार का मान उतना ही कम होगा और अनुनाद उतना ही तीक्ष्ण

© NCERT not to be republished

होगा। $\omega_0^2 = 1/LC$ का उपयोग करके समीकरण [7.36(c)] को समतुल्यतापूर्वक निम्न प्रकार से व्यक्त कर सकते हैं $Q = 1/\omega_0 CR$

चित्र 7.15 से हम देखते हैं कि यदि अनुनाद की तीक्ष्णता कम हो तो न केवल शिखर धारा कम होती है, परिपथ अधिक बड़े आवृत्ति परिसर $\Delta\omega$ के लिए अनुनाद के निकट रहता है और इसलिए परिपथ का समस्वरण अच्छा नहीं हो पाएगा। अतः अनुनाद जितना कम तीक्ष्ण होगा परिपथ की चयन क्षमता भी उतनी ही कम होगी। इसके विपरीत यदि अनुनाद तीक्ष्ण है तो परिपथ की चयन क्षमता भी अधिक होगी। समीकरण (7.36) से हम देखते हैं कि यदि गुणवत्ता गुणांक अधिक है, अर्थात R कम या L अधिक है तो परिपथ की चयन क्षमता अधिक होती है।

उदाहरण 7.6 एक 200 Ω प्रतिरोधक एवं एक 15.0 μF संधारित्र, किसी 220 V, 50 Hz ac स्रोत से श्रेणीक्रम में जुड़े हैं। (a) परिपथ में धारा की गणना कीजिए; (b) प्रतिरोधक एवं संधारित्र के सिरों के बीच (rms) वोल्टता की गणना कीजिए। क्या इन वोल्टताओं का बीजगणितीय योग स्रोत वोल्टता से अधिक है? यदि हाँ, तो इस विरोधाभास का निराकरण कीजिए।

हल

दिया है

$R = 200\,\Omega,\ C = 15.0\,\mu\text{F} = 15.0 \times 10^{-6}\,\text{F}$

$V = 220\,\text{V},\ \nu = 50\,\text{Hz}$

(a) धारा की गणना करने के लिए, हमें परिपथ की प्रतिबाधा की आवश्यकता होती है। यह होता है–

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{R^2 + (2\pi\nu C)^{-2}}$$

$$= \sqrt{(200\,\Omega)^2 + (2 \times 3.14 \times 50 \times 15.0 \times 10^{-6}\,\text{F})^{-2}}$$

$$= \sqrt{(200\,\Omega)^2 + (212.3\,\Omega)^2}$$

$$= 291.67\,\Omega$$

इसलिए, परिपथ में धारा है,

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{220\,\text{V}}{291.5\,\Omega} = 0.755\,\text{A}$$

(b) चूँकि पूरे परिपथ में समान धारा प्रवाहित हो रही है, इसलिए

$V_R = IR = (0.755\,\text{A})(200\,\Omega) = 151\,\text{V}$

$V_C = I X_C = (0.755\,\text{A})(212.3\,\Omega) = 160.3\,\text{V}$

दोनों वोल्टताओं V_R एवं V_C का बीजगणितीय योग 311.3 V है जो स्रोत वोल्टता 220 V से अधिक है। इस विरोधाभास का निराकरण किस प्रकार किया जाए? जैसा कि आपने पाठ में पढ़ा है, दोनों वोल्टताएँ समान कला में नहीं होती हैं। इसलिए उनको साधारण संख्याओं की तरह नहीं जोड़ा जा सकता है। इन वोल्टताओं में 90º का कला-अंतर होता है। इसलिए इनके योग का परिमाण पाइथागोरस के प्रमेय का उपयोग करके ज्ञात किया जा सकता है। अतः,

$V_{R+C} = \sqrt{V_R^2 + V_C^2}$

$= 220\,\text{V}$

इस प्रकार, यदि दो वोल्टताओं के बीच के कला-अंतर को गणना में लाते हुए प्रतिरोधक एवं संधारित्र के सिरों के बीच कुल वोल्टता ज्ञात की जाए तो यह स्रोत वोल्टता के बराबर ही पायी जाएगी।

उदाहरण 7.6

© NCERT not to be republished

7.7 ac परिपथों में शक्ति : शक्ति गुणांक

हम देख चुके हैं कि श्रेणीबद्ध *RLC* परिपथ में प्रयुक्त कोई वोल्टता $v = v_m \sin\omega t$ इस परिपथ में धारा $i = i_m \sin(\omega t + \phi)$ प्रवाहित करती है। यहाँ,

$$i_m = \frac{v_m}{Z} \quad \text{एवं} \quad \phi = \tan^{-1}\left(\frac{X_C - X_L}{R}\right)$$

इसलिए स्रोत द्वारा आपूर्त तात्क्षणिक शक्ति p है,

$$p = v\,i = (v_m \sin\omega t) \times [i_m \sin(\omega t + \phi)]$$

$$= \frac{v_m i_m}{2}[\cos\phi - \cos(2\omega t + \phi)] \qquad (7.37)$$

एक पूर्ण चक्र में माध्य शक्ति समीकरण (7.37) के दाएँ पक्ष के दोनों पदों का माध्य लेने से प्राप्त हो सकती है। इनमें केवल दूसरा पद ही समय पर निर्भर करता है, और इसका माध्य शून्य है (कोज्या (cosine) का धनात्मक अर्द्ध इसके ऋणात्मक अर्द्ध को निरस्त कर देता है।) इसलिए,

$$P = \frac{v_m i_m}{2}\cos\phi = \frac{v_m}{\sqrt{2}}\frac{i_m}{\sqrt{2}}\cos\phi$$

$$= V\,I\cos\phi \qquad [7.38(a)]$$

इसको इस प्रकार भी लिखा जा सकता है

$$P = I^2 Z\cos\phi \qquad [7.38(b)]$$

अतः क्षयित माध्य शक्ति, न केवल वोल्टता एवं धारा पर निर्भर करती है बल्कि उनके बीच के कला-कोण की कोज्या (cosine) पर भी निर्भर करती है। राशि $\cos\phi$ को *शक्ति गुणांक* कहा जाता है। आइए निम्नलिखित प्रकरणों पर चर्चा करें :

प्रकरण (i) *प्रतिरोधकीय परिपथ :* यदि परिपथ में केवल शुद्ध R है तो यह परिपथ *प्रतिरोधकीय* परिपथ कहलाता है। इस परिपथ के लिए $\phi = 0$, $\cos\phi = 1$ इसमें अधिकतम शक्ति क्षय होती है।

प्रकरण (ii) *शुद्ध प्रेरकीय* अथवा *धारितीय परिपथ :* यदि परिपथ में केवल एक प्रेरक अथवा संधारित्र हो तो हम जानते हैं कि धारा एवं वोल्टता के बीच कला अंतर $\pi/2$ होता है। इसलिए $\cos\phi = 0$ और इसलिए यद्यपि परिपथ में धारा प्रवाहित होती है तो भी कोई शक्ति क्षय नहीं होती। इस धारा को कभी-कभी *वाटहीन धारा* भी कहा जाता है।

प्रकरण (iii) *श्रेणीबद्ध LCR परिपथ :* किसी *LCR* परिपथ में शक्ति क्षय समीकरण (7.38) के अनुसार होता है। यहाँ $\phi = \tan^{-1}(X_c - X_L)/R$ अतः किसी *RL* या *RC* या *RCL* परिपथ में ϕ शून्येतर हो सकता है। इन परिपथों में भी शक्ति केवल प्रतिरोधक में ही क्षयित होती है।

प्रकरण (iv) *LCR परिपथ में अनुनाद स्थिति में शक्ति क्षय :* अनुनाद की स्थिति में $X_c - X_L = 0$ एवं $\phi = 0$ इसलिए $\cos\phi = 1$ एवं $P = I^2Z = I^2R$ अर्थात परिपथ में अधिकतम शक्ति (R के माध्यम से) अनुनाद की स्थिति में क्षयित होती है।

उदाहरण 7.7

उदाहरण 7.7 (a) विद्युत शक्ति के परिवहन के लिए प्रयुक्त होने वाले परिपथों में निम्न शक्ति गुणांक, संप्रेषण में अधिक ऊर्जा का क्षय होगा, निर्दिष्ट करता है। इसका कारण समझाइए।

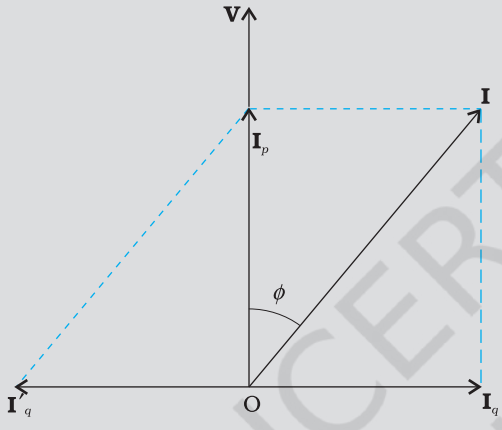
(b) परिपथ का शक्ति गुणांक, प्रायः परिपथ में उपयुक्त मान के संधारित्र का उपयोग करके सुधारा जा सकता है। यह तथ्य समझाइए।

© NCERT not to be republished

हल (a) हम जानते हैं कि $P = I V \cos \phi$ यहाँ $\cos \phi$ शक्ति गुणांक है। दी गई वोल्टता पर वांछित शक्ति की आपूर्ति के लिए यदि $\cos \phi$ का मान कम होगा तो हमें उसी अनुपात में धारा का मान बढ़ाना पड़ेगा। परन्तु इससे संप्रेषण में अधिक शक्ति क्षय (I^2R) होगा।

(b) माना कि किसी परिपथ में धारा I वोल्टता से ϕ कोण पीछे रहती है तो इस परिपथ के लिए $\cos \phi = R/Z$

हम शक्ति गुणांक का सुधार कर इसका मान 1 की ओर प्रवृत्त कर सकते हैं जिसके लिए Z का मान R हो यह प्रयास करना पड़ेगा। यह उपलब्धि कैसे होती है, आइए चित्र द्वारा इसे समझने का प्रयास करें। धारा **I** को हम दो घटकों में वियोजित करते हैं– $\mathbf{I}_p$ प्रयुक्त वोल्टता **V** की दिशा में एवं



चित्र 7.17

$\mathbf{I}_q$ वोल्टता की लंबवत दिशा में। $\mathbf{I}_q$ जैसा आप अनुभाग 7.7 में पढ़ चुके हैं, वाटहीन घटक कहलाता है क्योंकि धारा के इस घटक के संगत कोई शक्ति क्षय नहीं होता। $\mathbf{I}_P$ को शक्ति घटक कहा जाता है, क्योंकि यह वोल्टता के साथ समान कला में है और इसी के साथ परिपथ में शक्ति क्षय होती है।

इस विश्लेषण से यह स्पष्ट है कि यदि हम शक्ति गुणांक में सुधार लाना चाहें तो पश्चगामी वाटहीन धारा $\mathbf{I}_q$ को उसी के बराबर अग्रगामी वाटहीन धारा $\mathbf{I'}_q$ द्वारा उदासीन करना पड़ेगा। इसके लिए उपयुक्त मान का संधारित्र समांतर क्रम में संयोजित करना होगा ताकि $\mathbf{I}_q$ एवं $\mathbf{I'}_q$ एक-दूसरे को निरस्त कर सकें और P प्रभावी रूप से $I_p V$ हो सके।

उदाहरण 7.7

उदाहरण 7.8 283 V शिखर वोल्टता एवं 50 Hz आवृत्ति की एक ज्यावक्रीय वोल्टता एक श्रेणीबद्ध LCR परिपथ से जुड़ी है जिसमें $R = 3\ \Omega$, $L = 25.48$ mH, एवं $C = 796\ \mu$F है। ज्ञात कीजिए (a) परिपथ की प्रतिबाधा; (b) स्रोत के सिरों के बीच लगी वोल्टता एवं परिपथ में प्रवाहित होने वाली धारा के बीच कला-अंतर; (c) परिपथ में होने वाला शक्ति-क्षय; एवं (d) शक्ति गुणांक।

हल

(a) परिपथ की प्रतिबाधा ज्ञात करने के लिए पहले हम X_L एवं X_C की गणना करेंगे।

$$X_L = 2\pi\nu L$$
$$= 2 \times 3.14 \times 50 \times 25.48 \times 10^{-3}\ \Omega = 8\ \Omega$$
$$X_C = \frac{1}{2\pi\nu C}$$

उदाहरण 7.8

© NCERT not to be republished

उदाहरण 7.8

$$= \frac{1}{2\times 3.14\times 50\times 796\times 10^{-6}} = 4\Omega$$

इसलिए,

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{3^2 + (8-4)^2}$$

$$= 5\ \Omega$$

(b) कला-अंतर, $\phi = \tan^{-1}\dfrac{X_C - X_L}{R}$

$$= \tan^{-1}\left(\frac{4-8}{3}\right) = -53.1°$$

चूँकि ϕ का मान ऋणात्मक है, परिपथ में धारा स्रोत के सिरों के बीच वोल्टता से पीछे रहती है,

(c) परिपथ में शक्ति क्षय,

$$P = I^2R$$

अब, $I = \dfrac{i_m}{\sqrt{2}} = \dfrac{1}{\sqrt{2}}\left(\dfrac{283}{5}\right) = 40\text{A}$

अतः, $P = (40\text{A})^2 \times 3\,\Omega = 4800\,\text{W}$

(d) शक्ति गुणांक $= \cos\phi = \cos(-53.1°) = 0.6$

उदाहरण 7.9

उदाहरण 7.9 माना कि पूर्व उदाहरण में वर्णित स्रोत की आवृत्ति परिवर्तनशील है। (a) स्रोत की किस आवृत्ति पर अनुनाद होगा। (b) अनुनाद की अवस्था में प्रतिबाधा, धारा एवं क्षयित शक्ति की गणना कीजिए।

हल

(a) वह आवृत्ति जिस पर अनुनाद होगा,

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{25.48\times 10^{-3}\times 796\times 10^{-6}}}$$

$$= 222.1\,\text{rad/s}$$

$$\nu_r = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{221.1}{2\times 3.14}\text{Hz} = 35.4\text{Hz}$$

(b) अनुनाद की स्थिति में प्रतिबाधा, Z प्रतिरोध, R के बराबर होती है अतः

$$Z = R = 3\,\Omega$$

अनुनाद स्थिति में rms धारा

$$= \frac{V}{Z} = \frac{V}{R} = \left(\frac{283}{\sqrt{2}}\right)\frac{1}{3} = 66.7\text{A}$$

अनुनाद स्थिति में शक्ति क्षय

$$P = I^2 \times R = (66.7)^2 \times 3 = 13.35\ \text{kW}$$

प्रस्तुत प्रकरण में आप देख सकते हैं कि अनुनाद स्थिति में शक्ति क्षय उदाहरण 7.8 में हुए शक्ति क्षय से अधिक है।

© NCERT not to be republished

उदाहरण 7.10 किसी हवाई अड्डे पर सुरक्षा कारणों से, किसी व्यक्ति को धातु-संसूचक के द्वार पथ से गुजारा जाता है। यदि उसके पास कोई धातु से बनी वस्तु है, तो धातु संसूचक से एक ध्वनि निकलने लगती है। यह संसूचक किस सिद्धांत पर कार्य करता है?

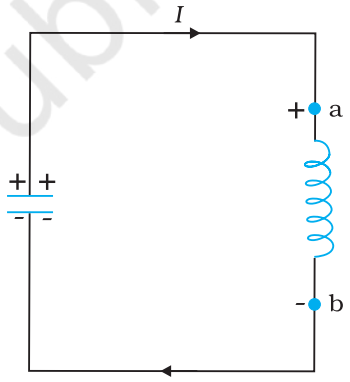
हल धातु संसूचक ac परिपथों में अनुनाद के सिद्धांत पर कार्य करता है। जब आप किसी धातु संसूचक से गुजरते है तो वास्तव में आप अनेक फेरों वाली एक कुंडली से होकर गुजरते हैं। यह कुंडली एक ऐसी समस्वरित संधारित्र से जुड़ी होती है जिसके कारण परिपथ अनुनाद की स्थिति में होता है। जब आप जेब में धातु लेकर कुंडली से गुजरते हैं तो परिपथ की प्रतिबाधा परिवर्तित हो जाती है, परिणामस्वरूप परिपथ में प्रवाहित होने वाली धारा में सार्थक परिवर्तन होता है। धारा का यह परिवर्तन संसूचित होता है एवं इलेक्ट्रॉनिक परिपथिकी के कारण चेतावनी की ध्वनि उत्पन्न होती है।

उदाहरण 7.10

7.8 LC दोलन

हम जानते हैं कि एक संधारित्र एवं एक प्रेरक क्रमशः वैद्युत एवं चुंबकीय ऊर्जा संचित कर सकते हैं। जब एक (पहले से आवेशित) संधारित्र एक प्रेरक के साथ जोड़ा जाता है तो संधारित्र पर आवेश एवं परिपथ में धारा, वैद्युत दोलनों की वैसी ही परिघटना प्रदर्शित करते हैं जैसी यांत्रिक प्रणालियों के दोलनों में देखी जाती है (अध्याय 14, कक्षा 11)।

माना कि किसी संधारित्र पर ($t = 0$) पर q_m आवेश है और इसे एक प्रेरक से जोड़ा गया है जैसा चित्र 7.18 में दर्शाया गया है।



चित्र 7.18 दर्शाए गए क्षण पर धारा बढ़ रही है अतः प्रेरक में प्रेरण द्वारा उत्पन्न की गई ध्रुवता वैसी ही होती है जैसी चित्र में दर्शायी गई है।

जैसे ही परिपथ पूर्ण होता है, संधारित्र पर आवेश कम होना प्रारंभ हो जाता है जिससे परिपथ में धारा प्रवाहित होने लगती है। माना कि किसी क्षण t पर आवेश q एवं परिपथ में धारा i है। चूँकि $\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ धनात्मक है, L में प्रेरित emf की ध्रुवता वही होगी जो चित्र में दर्शायी गई है, अर्थात $v_b < v_a$। किरखोफ के लूप नियम के अनुसार,

$$\frac{q}{C} - L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = 0 \qquad (7.39)$$

$i = -(\mathrm{d}q/\mathrm{d}t)$, क्योंकि प्रस्तुत प्रकरण में q कम हो रहा है, i बढ़ रहा है अतः समीकरण (7.39) को लिख सकते हैं :

$$\frac{\mathrm{d}^2 q}{\mathrm{d}t^2} + \frac{1}{LC}q = 0 \qquad (7.40)$$

इस समीकरण का स्वरूप सरल आवर्त गति की समीकरण $\frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2} + \omega_0^2 x = 0$ जैसा है। अतः, संधारित्र का आवेश सरल आवर्त दोलन करता है जिनकी प्राकृतिक आवृत्ति है,

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad (7.41)$$

और इसके परिमाण में समय के साथ ज्यावक्रीय रूप से परिवर्तन होता है जिसको हम निम्नलिखित सूत्र द्वारा व्यक्त कर सकते हैं :

$$q = q_m \cos(\omega_0 t + \phi) \qquad (7.42)$$

© NCERT not to be republished

यहाँ q_m आवेश q का अधिकतम मान है एवं ϕ एक कला नियतांक है। चूँकि, $t = 0$ पर $q = q_m$, $\cos \phi = 1$ या $\phi = 0$ । इसलिए, प्रस्तुत प्रकरण में

$$q = q_m \cos(\omega_0 t) \tag{7.43}$$

तब धारा $i\left(= -\frac{dq}{dt}\right)$ को व्यक्त कर सकेंगे,

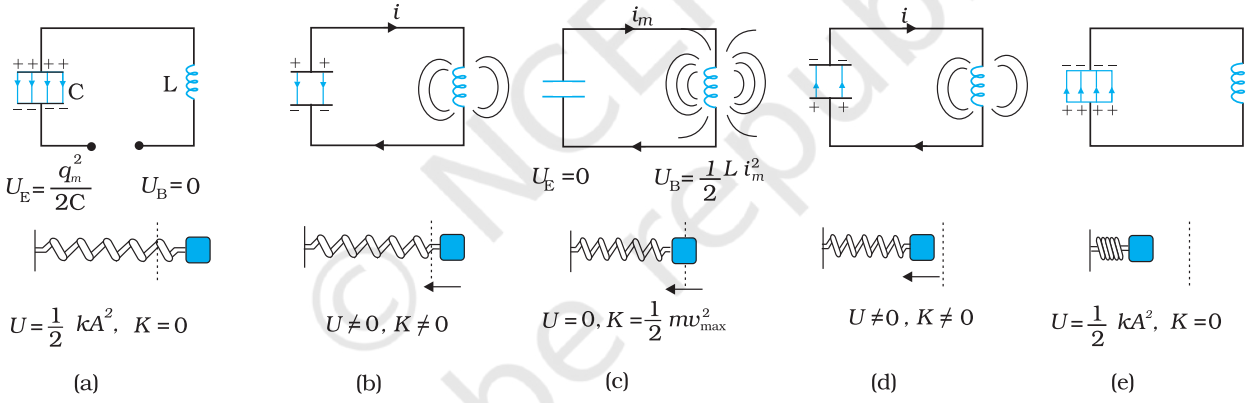
$$i = i_m \sin(\omega_0 t) \tag{7.44}$$

यहाँ $i_m = \omega_0 q_m$

आइए अब यह देखने की चेष्टा करें कि परिपथ में यह दोलन होते कैसे हैं?

चित्र 7.19(a) में प्रारंभिक आवेश q_m युक्त एक संधारित्र एक आदर्श प्रेरक से जुड़ा दिखाया गया है। आवेशित संधारित्र में संचित वैद्युत ऊर्जा है $U_E = \frac{1}{2}\frac{q_m^2}{C}$ । क्योंकि, परिपथ में कोई धारा प्रवाहित नहीं हो रही है, प्रेरक में ऊर्जा शून्य है। अतः LC परिपथ की कुल ऊर्जा है,

$$U = U_E = \frac{1}{2}\frac{q_m^2}{C}$$



चित्र 7.19 *LC* परिपथ के दोलन स्प्रिंग के सिरे पर लगे गुटके के दोलनों के समतुल्य हैं। चित्र में दोलनों के आधे चक्र को दर्शाया गया है।

$t = 0$ पर स्विच बंद कर दिया जाता है और संधारित्र विसर्जित होने लगता है [चित्र 7.19 (b)]। जैसे-जैसे धारा बढ़ती है प्रेरक में चुंबकीय क्षेत्र स्थापित होने लगता है और प्रेरक में चुंबकीय ऊर्जा के रूप में ऊर्जा संचित होने लगती है जिसका मान है $U_B = (1/2)\, Li^2$। जब i_m, ($t = T/4$ पर) धारा का मान अधिकतम i_m होता है, जैसा चित्र 7.19 (c) में दर्शाया गया है तो कुल ऊर्जा चुंबकीय क्षेत्र के रूप में संचित होती है जिसका मान है– $U_B = (1/2)\, Li_m^2$। आप यह आसानी से जाँच सकते हैं कि अधिकतम वैद्युत ऊर्जा, अधिकतम चुंबकीय ऊर्जा के बराबर होती है। इस स्थिति में संधारित्र पर कोई आवेश और इसलिए कोई ऊर्जा नहीं होती। अब, जैसा चित्र 7.19 (d) में दर्शाया गया है, धारा संधारित्र को आवेशित करने लगती है। यह प्रक्रिया तब तक चलती रहती है जब तक कि ($t = T/2$ पर) संधारित्र पूरी तरह आवेशित नहीं हो जाता है [चित्र 7.19 (e)]। लेकिन, अब इसका आवेशन, चित्र 7.19 (a) में दर्शायी गई प्रारंभिक स्थिति की ध्रुवता को विपरीत ध्रुवता के साथ होता है। ऊपर बताई गई प्रक्रिया अब फिर से दोहराई जाएगी जिससे प्रणाली अपनी मूल अवस्था में लौट आएगी। अतः इस प्रणाली में ऊर्जा संधारित्र एवं प्रेरक के बीच दोलन करती है।

© NCERT not to be republished

LC दोलन स्प्रिंग से जुड़े पिंड के यांत्रिक दोलनों की ही तरह है। चित्र 7.19 में प्रत्येक आकृति का नीचे का भाग यांत्रिक प्रणाली (स्प्रिंग से जुड़े पिंड) की संगत अवस्था प्रदर्शित करता है। जैसा पहले देखा गया है, m द्रव्यमान के ω_0 आवृत्ति से दोलन करते पिंड के लिए, समीकरण है

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0$$

यहाँ, $\omega_0 = \sqrt{k/m}$, एवं k स्प्रिंग नियतांक है। इसलिए, x के संगत राशि q है। यांत्रिक प्रणाली के लिए, $F = ma = m(dv/dt) = m(d^2x/dt^2)$। विद्युतीय प्रणाली के लिए $\varepsilon = -L(di/dt) = -L(d^2q/dt^2)$। इन दो समीकरणों की तुलना करने पर, हम देखते हैं कि L द्रव्यमान m के समतुल्य है : L धारा में परिवर्तन के प्रतिरोध का माप है। LC परिपथ के प्रकरण में, $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ एवं स्प्रिंग पर दोलन करते द्रव्यमान के लिए, $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ । इसलिए $1/C$ स्प्रिंग नियतांक k के समतुल्य है। नियतांक, k $(=F/x)$ व्यक्त करता है इकाई विस्थापन के लिए आवश्यक (बाह्य) बल, जबकि $1/C$ $(=V/q)$ व्यक्त करता है इकाई आवेश संचित करने के लिए आवश्यक विभवांतर।

सारणी 7.1 में यांत्रिक एवं वैद्युत राशियों की सादृश्यता प्रस्तुत की गई है।

ध्यान दें कि LC दोलनों के संबंध में उपरोक्त चर्चा दो कारणों से यथार्थ नहीं है–

सारणी 7.1 यांत्रिक एवं वैद्युत राशियों में समतुल्यता

यांत्रिक निकाय	वैद्युत निकाय
द्रव्यमान m	प्रेरकत्व L
बल नियतांक k	व्युत्क्रम धारिता $1/C$
विस्थापन x	आवेश q
वेग $v = dx/dt$	धारा $i = dq/dt$
यांत्रिक ऊर्जा $E = \frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}mv^2$	विद्युत चुंबकीय ऊर्जा $U = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C} + \frac{1}{2}Li^2$

(i) प्रत्येक प्रेरक में कुछ न कुछ प्रतिरोध अवश्य होता है। यह प्रतिरोध आवेश एवं परिपथ में प्रवाहित धारा पर अवमंदक प्रभाव डालता है जिससे अंततः दोलन समाप्त हो जाते हैं।

(ii) यदि प्रतिरोध शून्य हो तो भी निकाय की कुल ऊर्जा नियत नहीं रहेगी। यह निकाय से विद्युत चुंबकीय तरंगों के रूप में विकिरित हो जाएगी (अगले अध्याय में इस विषय में विस्तार से चर्चा की गई है)। वास्तव में रेडियो एवं टीवी संप्रेषकों की कार्य प्रणाली इन्हीं विकिरणों के ऊपर निर्भर करती है।

© NCERT not to be republished

दो अलग-अलग परिघटनाएँ, समान गणितीय व्यवहार

संभवत: आप कक्षा 11 की भौतिकी की पाठ्यपुस्तक के अनुभाग 14.10 में वर्णित प्रणोदित अवमंदित दोलक की तुलना ac से जुड़े *LCR* परिपथ से करना चाहें। हम यह टिप्पणी पहले ही कर चुके हैं कि कक्षा 11 की पाठ्यपुस्तक में दी गई समीकरण [14.37 (b)] और इस अध्याय में दी गई समीकरण (7.28) में यद्यपि अलग-अलग संकेत चिह्न एवं प्राचल प्रयुक्त किए गए हैं, फिर भी वे एक दूसरे से बिलकुल मिलती-जुलती हैं। आइए, इन दो स्थितियों में विभिन्न राशियों की समतुल्यता सूचीबद्ध करें–

प्रणोदित दोलन	***संचालित LCR परिपथ***
$m\frac{d^2x}{dt^2} + b\frac{dx}{dt} + kx = F\cos\omega_d t$	$L\frac{\mathrm{d}^2q}{\mathrm{d}t^2} + R\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} + \frac{q}{C} = v_m \sin\omega t$
विस्थापन, x	संधारित्र पर आवेश, q
समय, t	समय, t
द्रव्यमान, m	स्वप्रेरकत्व, L
अवमंदन नियतांक, b	प्रतिरोध, R
स्प्रिंग नियतांक, k	व्युत्क्रम धारिता, $1/C$
संचालक आवृत्ति, ω_d	संचालक आवृत्ति, ω
दोलक की प्राकृतिक आवृत्ति, ω	*LCR* परिपथ की प्राकृतिक आवृत्ति, ω_0
प्रणोदित दोलनों का आयाम, A	संचित अधिकतम आवेश, q_m
संचालक बल का आयाम, F_0	लगाई गई वोल्टता का आयाम, v_m

ध्यान दें कि चूँकि विस्थापन *(x)*, आवेश *(q)* के संगत होता है, आयाम (अधिकतम विस्थापन) A के संगत अधिकतम संचित आवेश, q_m होगा। कक्षा 11 की समीकरण [14.39 (a)] अन्य प्राचलों के पदों में दोलनों का आयाम निर्दिष्ट करती है जो सुविधा के लिए यहाँ हम प्रस्तुत करते हैं :

$$A = \frac{F_0}{\left\{m^2(\omega^2 - \omega_d^2)^2 + \omega_d^2 b^2\right\}^{1/2}}$$

उपरोक्त समीकरण में प्रत्येक प्राचल को उसके संगत वैद्युत राशि से प्रतिस्थापित करें और देखें कि क्या होता है। इससे, L, C, ω एवं ω_0, को, संबंधों $X_L = \omega L$, $X_C = 1/\omega C$, एवं $\omega_0^2 = 1/LC$ का उपयोग करके हटाएँ। जब आप समीकरण (7.33) एवं (7.34) का उपयोग करेंगे तो आप पाएँगे कि उनमें पूरा तालमेल है।

भौतिकी में ऐसी अनेक स्थितियों से आपका सामना होगा जहाँ बिलकुल अलग भौतिक परिघटनाओं को एक जैसी गणितीय समीकरणों द्वारा व्यक्त किया जाता है। यदि आप उनमें से एक को सुलझा चुके हैं तो दूसरी को सुलझाने के लिए आप केवल संगत राशियों को प्रतिस्थापित करके नए संदर्भ में परिणाम की व्याख्या करें। हमारा सुझाव है कि आप भौतिकी के विभिन्न क्षेत्रों से इस प्रकार की समान परिस्थितियों को खोजें। हमें इन स्थितियों के अंतरों से भी अवगत होना चाहिए।

© NCERT not to be republished

उदाहरण 7.11 दर्शाइए कि LC परिपथ के मुक्त दोलनों में, संधारित्र एवं प्रेरक में संचित ऊर्जाओं का योग, समय के बदलने पर भी नहीं बदलता।

हल मान लीजिए कि किसी संधारित्र पर प्रारंभिक आवेश q_0 है तथा यह संधारित्र L प्रेरकत्व के किसी प्रेरक के साथ जोड़ा गया है। जैसा आपने अनुभाग 7.8 में पढ़ा है, इस LC परिपथ में आवृत्ति (ω)

यहाँ $\omega \left(= 2\pi\nu = \frac{1}{\sqrt{LC}}\right)$ के दोलन बने रहेंगे।

किसी क्षण t पर, संधारित्र पर आवेश q एवं परिपथ में धारा i हैं,

$q(t) = q_0 \cos \omega t$

$i(t) = -q_0 \omega \sin \omega t$

समय t पर, प्रेरक में संचित ऊर्जा

$$U_E = \frac{1}{2} C V^2 = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C}$$

$$= \frac{q_0^2}{2C}\cos^2(\omega t)$$

समय t पर प्रेरक में संचित ऊर्जा

$$U_M = \frac{1}{2} L i^2$$

$$= \frac{1}{2} L q_0^2 \omega^2 \sin^2(\omega t)$$

$$= \frac{q_0^2}{2C}\sin^2(\omega t) \quad \left(\because \omega = 1/\sqrt{LC}\right)$$

ऊर्जाओं का योग

$$U_E + U_M = \frac{q_0^2}{2C}\left[\cos^2 \omega t + \sin^2 \omega t\right]$$

$$= \frac{q_0^2}{2C}$$

क्योंकि q_0 एवं C दोनों ही समय पर निर्भर नहीं करते इसलिए यह योग समय के साथ नहीं बदलता। ध्यान देने योग्य बात यह है कि ऊर्जाओं का यह योग संधारित्र की प्रारंभिक ऊर्जा के बराबर है। ऐसा क्यों है? विचार कीजिए!

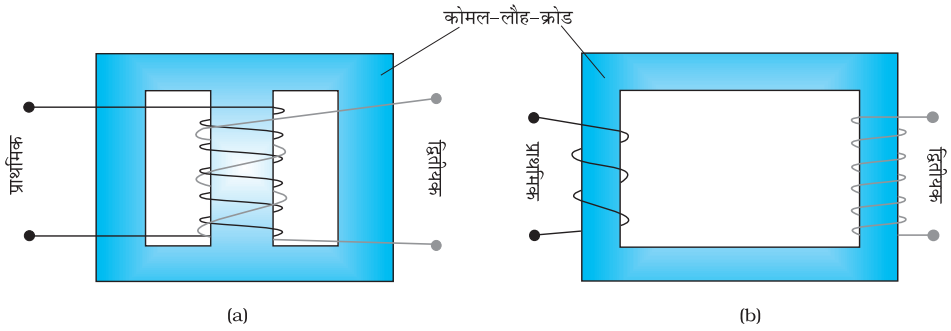
उदाहरण 7.11

7.9 ट्रांसफॉर्मर

अनेक उद्देश्यों के लिए ac वोल्टता को एक मान से दूसरे अधिक या कम मान में परिवर्तित करना (या रूपांतरित करना) आवश्यक हो जाता है। ऐसा अन्योन्य प्रेरण के सिद्धांत पर आधारित एक युक्ति के द्वारा किया जाता है जिसे *ट्रांसफॉर्मर* कहते हैं।

ट्रांसफार्मर में दो कुंडलियाँ होती हैं जो एक दूसरे से विद्युतरुद्ध होती हैं। वे एक कोमल-लौह-क्रोड पर लिपटी होती हैं। लपेटने की विधि या तो चित्र 7.20 (a) की भाँति होती है, जिसमें एक कुंडली दूसरी के ऊपर लिपटी होती है, या फिर चित्र 7.20 (b) की भाँति जिसमें दोनों कुंडलियाँ क्रोड की अलग-अलग भुजाओं पर लिपटी होती हैं। एक कुंडली को *प्राथमिक कुंडली* (primary coil) कहते हैं इसमें N_p लपेटे होते हैं। दूसरी कुंडली को *द्वितीयक कुंडली* (secondary coil) कहते

© NCERT not to be republished



चित्र 7.20 किसी ट्रांसफॉर्मर में प्राथमिक एवं द्वितीयक कुंडलियों को लपेटने की दो व्यवस्थाएँ : (a) एक दूसरे के ऊपर लपेटी गई दो कुंडलियाँ (b) क्रोड की अलग-अलग भुजाओं पर लिपटी कुंडलियाँ

हैं, इसमें N_s लपेटे होते हैं। प्राय: प्राथमिक कुंडली निवेशी कुंडली होती है एवं द्वितीयक कुंडली ट्रांसफार्मर की निर्गत कुंडली होती है।

जब प्राथमिक कुंडली के सिरों के बीच प्रत्यावर्ती वोल्टता लगाई जाती है तो परिणामी धारा एक प्रत्यावर्ती चुंबकीय फ्लक्स उत्पन्न करती है जो द्वितीयक कुंडली से संयोजित होकर इसके सिरों के बीच एक emf प्रेरित करता है। इस emf का मान द्वितीयक कुंडली में फेरों की संख्या पर निर्भर करता है। हम मान लेते हैं कि हमारा ट्रांसफॉर्मर एक आदर्श ट्रांसफॉर्मर है जिसकी प्राथमिक कुंडली का प्रतिरोध नगण्य है, और क्रोड का संपूर्ण फ्लक्स प्राथमिक एवं द्वितीयक दोनों कुंडलियों से गुजरता है। प्राथमिक कुंडली के सिरों के बीच वोल्टता v_p लगाने से, माना किसी क्षण t पर, इस कुंडली का प्रत्येक फेरा क्रोड में ϕ फ्लक्स उत्पन्न करता है।

तब N_s लपेटों वाली द्वितीयक कुंडली के सिरों के बीच प्रेरित emf या वोल्टता ε_s है

$$\varepsilon_s = -N_s \frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t} \tag{7.45}$$

प्रत्यावर्ती फ्लक्स, ϕ प्राथमिक कुंडली में भी एक emf प्रेरित करता है जिसे पश्च विद्युत वाहक बल कहते हैं। यह है,

$$\varepsilon_p = -N_p \frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t} \tag{7.46}$$

लेकिन, $\varepsilon_p = v_p$ यदि ऐसा नहीं होता तो प्रारंभिक कुंडली (जिसका प्रतिरोध हमने शून्य माना है) में अनंत परिमाण की धारा प्रवाहित होती। यदि द्वितीयक कुंडली के सिरे मुक्त हों अथवा इससे बहुत कम धारा ली जा रही हो तो पर्याप्त सन्निकट मान तक

$$\varepsilon_s = v_s$$

यहाँ v_s द्वितीयक कुंडली के सिरों के बीच वोल्टता है। अत: समीकरणों (7.45) एवं (7.46) को हम इस प्रकार लिख सकते हैं –

$$v_s = -N_s \frac{d\phi}{dt} \tag{7.45(a)}$$

$$v_p = -N_p \frac{d\phi}{dt} \tag{7.46(a)}$$

समीकरण [7.45 (a)] एवं [7.46 (a)] से,

$$\frac{v_s}{v_p} = \frac{N_s}{N_p} \tag{7.47}$$

© NCERT not to be republished

ध्यान दीजिए कि उपरोक्त संबंध की व्युत्पत्ति में हमने तीन परिकल्पनाओं का उपयोग किया है जो इस प्रकार हैं– (i) प्राथमिक कुंडली का प्रतिरोध एवं इसमें प्रवाहित होने वाली धारा कम है; (ii) प्राथमिक एवं द्वितीयक कुंडली से समान फ्लक्स बाहर निकल पाता है; एवं (iii) द्वितीयक कुंडली में बहुत कम धारा प्रवाहित होती है।

यदि यह मान लिया जाए कि ट्रांसफॉर्मर की दक्षता 100% है (कोई ऊर्जा क्षय नहीं होता); तो निवेशी शक्ति, निर्गत शक्ति के बराबर होगी और चूँकि $p = i v$,

$$i_p v_p = i_s v_s \tag{7.48}$$

यद्यपि कुछ न कुछ ऊर्जा क्षय तो सदैव होता ही है, फिर भी यह एक अच्छा सन्निकटन है, क्योंकि एक भली प्रकार अभिकल्पित ट्रांसफॉर्मर की दक्षता 95% से अधिक होती है। समीकरण (7.47) एवं (7.48) को संयोजित करने पर,

$$\frac{i_p}{i_s} = \frac{v_s}{v_p} = \frac{N_s}{N_p} \tag{7.49}$$

क्योंकि i एवं v दोनों की दोलन आवृत्ति वही है जो ac स्रोत की, समीकरण (7.49) से संगत राशियों के आयामों अथवा rms मानों का अनुपात भी प्राप्त होता है।

अब, हम देख सकते हैं कि ट्रांसफॉर्मर किस प्रकार वोल्टता एवं धारा के मानों को प्रभावित करता है। हम जानते हैं कि :

$$V_s = \left(\frac{N_s}{N_p}\right) V_p \quad \text{तथा} \quad I_s = \left(\frac{N_p}{N_s}\right) I_p \tag{7.50}$$

अर्थात यदि द्वितीयक कुंडली में प्राथमिक कुंडली से अधिक फेरे हैं ($N_s > N_p$) तो वोल्टता बढ़ जाती है ($V_s > V_p$) । इस प्रकार की व्यवस्था को *उच्चायी ट्रांसफॉर्मर* (step-up transformer) कहते हैं। तथापि, इस व्यवस्था में, द्वितीयक कुंडली में धारा प्राथमिक कुंडली से कम होती है ($N_p/N_s < 1$ एवं $I_s < I_p$)। उदाहरणार्थ, यदि किसी ट्रांसफॉर्मर की प्राथमिक कुंडली में 100 एवं द्वितीयक कुंडली में 200 फेरे हों तो $N_s/N_p = 2$ एवं $N_p/N_s = 1/2$ । अत: 220V, 10A का निवेश, बढ़कर 440 V का निर्गम 5.0 A पर देगा।

यदि द्वितीयक कुंडली में प्राथमिक कुंडली से कम फेरे हैं ($N_s < N_p$) तो यह ट्रांसफॉर्मर *अपचयी* (step-down transformer) है। इस ट्रांसफार्मर में $V_s < V_p$ एवं $I_s > I_p$ अर्थात वोल्टता कम हो जाती है तथा धारा बढ़ जाती है।

ऊपर प्राप्त की गई समीकरण आदर्श ट्रांसफॉर्मरों के लिए ही लागू होती है (जिनमें कोई ऊर्जा क्षय नहीं होता)। परंतु वास्तविक ट्रॉसफॉर्मरों में निम्नलिखित कारणों से अल्प मात्रा में ऊर्जा क्षय होता है–

(i) *फ्लक्स क्षरण*–सदैव कुछ न कुछ फ्लक्स तो क्षरित होता ही है, अर्थात क्रोड के खराब अभिकल्पन या इसमें रही वायु रिक्ति के कारण, प्राथमिक कुंडली का समस्त फ्लक्स द्वितीयक कुंडली से नहीं गुजरता। प्राथमिक एवं द्वितीयक कुंडलियों को एक दूसरे के ऊपर लपेट कर फ्लक्स क्षरण को कम किया जाता है।

(ii) *कुंडलनों का प्रतिरोध*– कुंडलियाँ बनाने में लगे तारों का कुछ न कुछ प्रतिरोध तो होता ही है और इसलिए इन तारों में उत्पन्न ऊष्मा (I^2R) के कारण ऊर्जा क्षय होता है। उच्च धारा, निम्न वोल्टता कुंडलनों में मोटे तार का उपयोग करके, इनमें होने वाले ऊर्जा क्षय को कम किया जाता है।

(iii) *भँवर धाराएँ*–प्रत्यावर्ती चुंबकीय फ्लक्स, लौह-क्रोड में भँवर धाराएँ प्रेरित करके, इसे गर्म कर देता है। स्तरित क्रोड का उपयोग करके इस प्रभाव को कम किया जाता है।

(iv) *शैथिल्य* (Hysteresis)–प्रत्यावर्ती चुंबकीय क्षेत्र द्वारा क्रोड का चुंबकन बार-बार उत्क्रमित होता है। इस प्रक्रिया में व्यय होने वाली ऊर्जा क्रोड में ऊष्मा के रूप में प्रकट होती है। कम शैथिल्य वाले पदार्थ का क्रोड में उपयोग करके इस प्रभाव को कम रखा जाता है।

© NCERT not to be republished

विद्युत ऊर्जा का लंबी दूरियों तक, बड़े पैमाने पर संप्रेषण एवं वितरण करने के लिए ट्रांसफॉर्मरों का उपयोग किया जाता है। जनित्र की निर्गत वोल्टता को उच्चायित किया जाता है (ताकि धारा कम हो जाती है और परिणामस्वरूप I^2R हानि घट जाती है। इसकी लंबी दूरी के उपभोक्ता के समीप स्थित क्षेत्रीय उप-स्टेशन तक संप्रेषित किया जाता है। वहाँ वोल्टता को अपचयित किया जाता है। वितरण उप-स्टेशनों एवं खंभों पर फिर से अपचयित करके 240 V की शक्ति आपूर्ति हमारे घरों को पहुँचायी जाती है।

सारांश

1. जब किसी प्रतिरोधक R के सिरों पर कोई प्रत्यावर्ती वोल्टता $v = v_m \sin \omega t$ लगाई जाती है तो उसमें धारा $i = i_m \sin\omega t$ संचालित होती है जहाँ, $i_m = \frac{v_m}{R}$. यह धारा प्रयुक्त वोल्टता की कला में होती है।
2. किसी प्रतिरोधक R से प्रवाहित प्रत्यावर्ती धारा $i = i_m \sin\omega t$ के लिए जूल तापन के कारण माध्य शक्ति क्षय $(1/2) i_m^2 R$ होता है। इसे उसी रूप में व्यक्त करने के लिए जिसमें dc शक्ति ($P = I^2R$), को व्यक्त करते हैं, धारा के एक विशिष्ट मान का उपयोग किया जाता है। इसे वर्ग माध्य मूल (rms) धारा कहते हैं तथा I से व्यक्त करते हैं :

$$I = \frac{i_m}{\sqrt{2}} = 0.707\, i_m$$

इसी प्रकार, *rms* वोल्टता

$$V = \frac{v_m}{\sqrt{2}} = 0.707\, v_m$$

माध्य शक्ति के लिए व्यंजक $P = IV = I^2R$

3. किसी शुद्ध प्रेरक L के किसी पर प्रयुक्त ac वोल्टता $v = v_m \sin\omega t$ इसमें $i = i_m \sin(\omega t - \pi/2)$, धारा संचालित करता है, यहाँ

$$i_m = \frac{v_m}{X_L} \quad \text{जहाँ} \quad X_L = \omega L$$

X_L को *प्रेरणिक प्रतिघात* कहते हैं। प्रेरक में धारा वोल्टता से $\pi/2$ रेडियन से पीछे होती है। एक पूरे चक्र में किसी प्रेरिक को आपूर्ति माध्य शक्ति शून्य होती है।

4. किसी संधारित्र के सिरों पर प्रयुक्त ac वोल्टता $v = v_m \sin\omega t$ उसमें $i = i_m \sin(\omega t + \pi/2)$ धारा संचालित करता है। यहाँ

$$i_m = \frac{v_m}{X_C}, \; X_C = \frac{1}{\omega C}$$

X_C को *धारिता प्रतिघात* कहते हैं। संधारित्र में प्रवाहित धारा प्रयुक्त वोल्टता से $\pi/2$ रेडियन आगे होती है। प्रेरक के समान ही एक पूरे चक्र में संधारित्र को आपूर्त माध्य शक्ति शून्य होती है।

5. वोल्टता $v = v_m \sin\omega t$, द्वारा संचालित किसी श्रेणीबद्ध LCR परिपथ में धारा का मान निम्नलिखित व्यंजक से दिया जाता है,

यहाँ $i_m = \frac{v_m}{\sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}}$

© NCERT not to be republished

तथा $\phi = \tan^{-1}\frac{X_C - X_L}{R}$

होता है।

$Z = \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}$ को परिपथ की *प्रतिबाधा* कहते हैं।

एक पूरे चक्र में माध्य शक्ति क्षय को निम्न सूत्र से व्यक्त करते हैं,

$$P = V I \cos\phi$$

पद $\cos\phi$ को *शक्ति गुणांक* कहते हैं।

6. किसी विशुद्ध प्रेरणिक अथवा धारिता परिपथ के लिए $\cos\phi = 0$। ऐसे परिपथ में यद्यपि धारा तो प्रवाहित होती है तथापि शक्ति क्षय नहीं होता है। ऐसे उदाहरणों में धारा को *वाटहीन* (Wattless) धारा कहते हैं।
7. किसी ac परिपथ में धारा व वोल्टता के मध्य कला के संबंध को सुगमता से व्यक्त किया जा सकता है। इसमें वोल्टता तथा धारा को घूर्णी सदिशों से निरूपित करते हैं। घूर्णी सदिश को फेजर कहते हैं। फेजर एक सदिश के समान है जो ω चाल से मूल बिंदु के चतुर्दिश घूर्णन करता है। फेजर का परिमाण फेजर द्वारा निरूपित राशि (वोल्टता या धारा) के आयाम या शिखर मान को व्यक्त करता है।
फेजर-आरेख के उपयोग से किसी ac परिपथ का विश्लेषण आसान हो जाता है।
8. अनुनाद की घटना किसी श्रेणीबद्ध *LCR* परिपथ की एक रोचक विशिष्टता है। परिपथ अनुनाद को प्रदर्शित करता है अर्थात अनुनादी आवृत्ति $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ पर धारा का आयाम अधिकतम होता है। $Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR}$ द्वारा परिभाषित गुणता कारक (Quality Factor) Q अनुनाद की तीक्ष्णता का संकेतक है। Q का अधिक मान यह संकेत करता है कि धारा का शिखर अपेक्षाकृत अधिक तीक्ष्ण है।
9. ac स्रोत तथा प्रतिरोधक विहीन कोई ऐसा परिपथ जिसमें कोई प्रेरक L तथा संधारित्र C (प्रारंभ में आवेशित) हैं, मुक्त दोलन प्रदर्शित करता है। संधारित्र का आवेश q एक सरल आवर्त गति करता है:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{1}{LC}q = 0$$

इस प्रकार मुक्त दोलनों की आवृत्ति $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ होती है। निकाय की ऊर्जा संधारित्र तथा प्रेरक के मध्य दोलन करती है, किंतु उनका योग अथवा कुल ऊर्जा समय के साथ नियत रहती है।
10. ट्रांसफार्मर में एक लोहे का क्रोड होता है जिसमें फेरों की संख्या N_p की एक प्राथमिक कुंडली तथा फेरों की संख्या N_s की एक द्वितीयक कुंडली लिपटी रहती है। यदि प्राथमिक कुंडली को किसी ac स्रोत से जोड़ दें, तो प्राथमिक एवं द्वितीयक वोल्टता निम्नलिखित व्यंजक द्वारा संबंधित होती हैं,

$$V_s = \left(\frac{N_s}{N_p}\right)V_p$$

तथा दोनों धाराओं के मध्य के संबंध को निम्नलिखित सूत्र से व्यक्त करते हैं

$$I_s = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)I_p$$

यदि प्राथमिक की तुलना में द्वितीयक कुंडली में फेरों की संख्या अधिक है तो वोल्टता उच्च हो जाती है $(V_s > V_R)$। इस प्रकार की युक्ति को *उच्चायी ट्रांसफार्मर* कहते हैं। किंतु यदि प्राथमिक की तुलना में द्वितीयक में फेरों की संख्या कम है तो *ट्रांसफार्मर अपचयी* होता है।

© NCERT not to be republished

भौतिक राशि	प्रतीक	विमा	मात्रक	टिप्पणी
rms वोल्टता	V_{rms}	$[M L^2 T^{-3} A^{-1}]$	V	$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$, V_m ac वोल्टता का आयाम है।
rms धारा	I_{rms}	[A]	A	$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$, I_m ac धारा का आयाम है।
प्रतिघात :				
प्रेरणिक	X_L	$[M L^2 T^{-3} A^{-2}]$	Ω	$X_L = \omega L$
धारितात्मक	X_C	$[M L^2 T^{-3} A^{-2}]$	Ω	$X_C = 1/\omega C$
प्रतिबाधा	Z	$[M L^2 T^{-3} A^{-2}]$	Ω	परिपथ में विद्यमान अवयवों पर निर्भर करता है।
अनुनादी आवृत्ति	ω_r या ω_0	$[T^{-1}]$	Hz	$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ एक श्रेणीबद्ध *LCR* परिपथ के लिए
गुणता कारक	Q	विमाहीन		$Q = \frac{\omega_r L}{R} = \frac{1}{\omega_r C R}$ श्रेणीबद्ध *LCR* परिपथ के लिए
शक्ति कारक		विमाहीन		$= \cos\phi$, ϕ परिपथ में आरोपित वोल्टता तथा धारा में कलांतर है

विचारणीय विषय

1. जब ac वोल्टता या धारा को कोई मान दिया जाता है तो यह प्रायः धारा अथवा वोल्टता का rms मान होता है। आपके कमरे में लगे विद्युत स्विच के टर्मिनलों के बीच वोल्टता सामान्यतया 240 V होती है। यह वोल्टता के *rms* मान को निर्दिष्ट करती है। इस वोल्टता का आयाम $V_m = \sqrt{2} V_{rms} = \sqrt{2}(240) = 340\,V$ है।
2. किसी ac परिपथ में प्रयुक्त अवयव की शक्ति संनिर्धारण माध्य शक्ति से निर्धारण को इंगित करती है।
3. किसी ac परिपथ में उपयुक्त शक्ति कभी भी ऋणात्मक नहीं होती।
4. प्रत्यावर्ती एवं दिष्ट धाराएँ दोनों ऐम्पियर में मापी जाती हैं। किंतु प्रत्यावर्ती धारा के लिए ऐम्पियर को किस प्रकार भौतिक रूप से परिभाषित किया जाए? जिस प्रकार dc ऐम्पियर को परिभाषित करते हैं उसी प्रकार इसे (ac ऐम्पियर को) ac धाराओं को वहन करने वाले दो समांतर तारों के अन्योन्य आकर्षण के रूप में परिभाषित नहीं कर सकते। ac धारा स्रोत की आवृत्ति के साथ दिशा परिवर्तित करती है जिससे माध्य आकर्षण बल शून्य हो जाता है। अतः ac ऐम्पियर को किसी ऐसे गुण के संबंध में परिभाषित करना चाहिए जो धारा की दिशा पर निर्भर न करता हो।

© NCERT not to be republished

जूल तापन एक ऐसा ही गुण है, तथा किसी परिपथ में प्रत्यावर्ती धारा के *rms* मान को एक ऐम्पियर के रूप में परिभाषित करते हैं यदि यह धारा वही औसत ऊष्मीय प्रभाव उत्पन्न करती है, जैसा कि dc धारा की एक ऐम्पियर उन्हीं परिस्थितियों में करती है।

5. किसी ac परिपथ में विभिन्न अवयवों के सिरों के बीच वोल्टताओं का योग करते समय उनकी कलाओं का उचित ध्यान रखना चाहिए। उदाहरणार्थ, यदि किसी *RC* परिपथ में V_R और V_C क्रमशः *R* व *C* के सिरों के बीच वोल्टता है तो *RC* संयोजन के सिरों के बीच वोल्टता $V_{RC} = \sqrt{V_R^2 + V_C^2}$ होगी न कि $V_R + V_C$ क्योंकि V_C तथा V_R के बीच कला-अंतर $\frac{\pi}{2}$ है।

6. यद्यपि किसी फेजर-आरेख में वोल्टता तथा धारा को सदिशों से निरूपित करते हैं तथापि ये राशियाँ वास्तव में सदिश नहीं हैं। ये अदिश राशियाँ हैं। ऐसा होता है कि सरल आवर्त रूप से परिवर्तित होने वाले अदिशों की कलाएँ गणितीय रूप से उसी प्रकार संयोग करती हैं, जैसे कि तदनुसार परिमाणों व दिशाओं के घूर्णी सदिशों के प्रक्षेप करते हैं। 'घूर्णी सदिश', जो सरल आवर्त रूप से परिवर्तनशील अदिश राशियों का निरूपण करते हैं, हमें इन राशियों के जोड़ने की सरल विधि प्रदान करने के लिए सन्निविष्ट किए जाते हैं। इसके लिए हम उस नियम का उपयोग करते हैं जिसे हम सदिशों के संयोजन के नियम के रूप में पहले ही से जानते हैं।

7. किसी ac परिपथ में शुद्ध संधारित्रों तथा प्रेरकों से कोई शक्ति-क्षय संबद्ध नहीं होता। यदि ac परिपथ में किसी अवयव द्वारा शक्ति-क्षय होता है तो वह प्रतिरोधक अवयव है।

8. किसी *LCR* परिपथ में अनुनाद की परिघटना तब होती है जब $X_L = X_C$ या $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$। अनुनाद होने के लिए परिपथ में *L* व *C* दोनों अवयवों का होना आवश्यक है। इनमें से मात्र एक (*L* अथवा *C*) के होने से वोल्टता के निरस्त होने की संभावना नहीं होती और इस प्रकार अनुनाद संभव नहीं है।

9. किसी *LCR* परिपथ में शक्ति गुणांक (Power Factor) इस बात को मापता है कि परिपथ अधिकतम शक्ति व्यय करने के कितने समीप है।

10. जनित्रों एवं मोटरों में निवेश तथा निर्गत की भूमिकाएँ एक-दूसरे के विपरीत होती हैं। एक मोटर में वैद्युत ऊर्जा निवेश है तथा यांत्रिक ऊर्जा निर्गत है; जनित्र में यांत्रिक ऊर्जा निवेश है तथा वैद्युत ऊर्जा निर्गत है। दोनों युक्तियाँ ऊर्जा को एक प्रकार से दूसरे में रूपांतरित करती हैं।

11. एक ट्रांसफॉर्मर (*उच्चायी*) निम्न वोल्टता को उच्च वोल्टता में परिवर्तित करता है। यह ऊर्जा के संरक्षण के नियम का उल्लंघन नहीं करता है। धारा उसी अनुपात में घट जाती है।

12. यह चयन करना कि दोलन गति का विवरण ज्या (sine) या कोज्या (cosine) के द्वारा दिया जाता है अथवा इनके रैखिक संयोग द्वारा, महत्वहीन है क्योंकि शून्य-समय स्थिति में परिवर्तन एक को दूसरे में रूपांतरित कर देता है।

© NCERT not to be republished

अभ्यास

7.1 एक 100 Ω का प्रतिरोधक 200 V, 50 Hz आपूर्ति से संयोजित है।
(a) परिपथ में धारा का rms मान कितना है?
(b) एक पूरे चक्र में कितनी नेट शक्ति व्यय होती है।

7.2 (a) ac आपूर्ति का शिखर मान 300 V है। rms वोल्टता कितनी है?
(b) ac परिपथ में धारा का rms मान 10 A है। शिखर धारा कितनी है?

7.3 एक 44 mH का प्रेरित्र 220 V, 50 Hz आपूर्ति से जोड़ा गया है। परिपथ में धारा के rms मान को ज्ञात कीजिए।

7.4 एक 60 μF का संधारित्र 110 V, 60 Hz ac आपूर्ति से जोड़ा गया है। परिपथ में धारा के rms मान को ज्ञात कीजिए।

7.5 अभ्यास 7.3 व 7.4 में एक पूरे चक्र की अवधि में प्रत्येक परिपथ में कितनी नेट शक्ति अवशोषित होती है? अपने उत्तर का विवरण दीजिए।

7.6 एक *LCR* परिपथ की, जिसमें $L = 2.0$ H, $C = 32$ μF तथा $R = 10$ Ω अनुनाद आवृत्ति ω_r परिकलित कीजिए। इस परिपथ के लिए Q का क्या मान है?

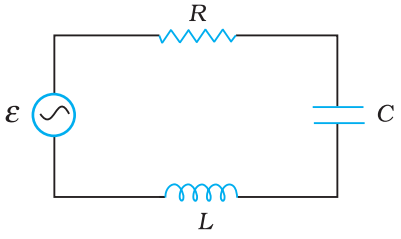
7.7 30 μF का एक आवेशित संधारित्र 27 mH के प्रेरित्र से जोड़ा गया है। परिपथ के मुक्त दोलनों की कोणीय आवृत्ति कितनी है?

7.8 कल्पना कीजिए कि अभ्यास 7.7 में संधारित्र पर प्रारंभिक आवेश 6 mC है। प्रारंभ में परिपथ में कुल कितनी ऊर्जा संचित होती है। बाद में कुल ऊर्जा कितनी होगी?

7.9 एक श्रेणीबद्ध *LCR* परिपथ को, जिसमें $R = 20$ Ω, $L = 1.5$ H तथा $C = 35$ μF, एक परिवर्ती आवृत्ति की 200 V ac आपूर्ति से जोड़ा गया है। जब आपूर्ति की आवृत्ति परिपथ की मूल आवृत्ति के बराबर होती है तो एक पूरे चक्र में परिपथ को स्थानांतरित की गई माध्य शक्ति कितनी होगी?

7.10 एक रेडियो को MW प्रसारण बैंड के एक खंड के आवृत्ति परास के एक ओर से दूसरी ओर (800 kHz से 1200 kHz) तक समस्वरित किया जा सकता है। यदि इसके *LC* परिपथ का प्रभावकारी प्रेरकत्व 200 μH हो, तो उसके परिवर्ती संधारित्र की परास कितनी होनी चाहिए?
[**संकेत** : समस्वरित करने के लिए मूल आवृत्ति अर्थात *LC* परिपथ के मुक्त दोलनों की आवृत्ति रेडियो तरंग की आवृत्ति के समान होनी चाहिए।]

7.11 चित्र 7.21 में एक श्रेणीबद्ध *LCR* परिपथ दिखलाया गया है जिसे परिवर्ती आवृत्ति के 230 V के स्रोत से जोड़ा गया है। $L = 5.0$ H, $C = 80$ μF, $R = 40$ Ω



चित्र 7.21

(a) स्रोत की आवृत्ति निकालिए जो परिपथ में अनुनाद उत्पन्न करे।
(b) परिपथ की प्रतिबाधा तथा अनुनादी आवृत्ति पर धारा का आयाम निकालिए।
(c) परिपथ के तीनों अवयवों के सिरों पर विभवपात के rms मानों को निकालिए। दिखलाइए कि अनुनादी आवृत्ति पर *LC* संयोग के सिरों पर विभवपात शून्य है।

© NCERT not to be republished

अतिरिक्त अभ्यास

7.12 किसी *LC* परिपथ में 20 mH का एक प्रेरक तथा 50 μF का एक संधारित्र है जिस पर प्रारंभिक आवेश 10 mC है। परिपथ का प्रतिरोध नगण्य है। मान लीजिए कि वह क्षण जिस पर परिपथ बंद किया जाता है $t = 0$ है।

(a) प्रारंभ में कुल कितनी ऊर्जा संचित है? क्या यह *LC* दोलनों की अवधि में संरक्षित है?

(b) परिपथ की मूल आवृत्ति क्या है?

(c) किस समय पर संचित ऊर्जा

(i) पूरी तरह से वैद्युत है (अर्थात वह संधारित्र में संचित है)?

(ii) पूरी तरह से चुंबकीय है (अर्थात प्रेरक में संचित है)?

(d) किन समयों पर संपूर्ण ऊर्जा प्रेरक एवं संधारित्र के मध्य समान रूप से विभाजित है?

(e) यदि एक प्रतिरोधक को परिपथ में लगाया जाए तो कितनी ऊर्जा अंततः ऊष्मा के रूप में क्षयित होगी?

7.13 एक कुंडली को जिसका प्रेरण 0.50 H तथा प्रतिरोध 100 Ω है, 240 V व 50 Hz की एक आपूर्ति से जोड़ा गया है।

(a) कुंडली में अधिकतम धारा कितनी है?

(b) वोल्टेज शीर्ष व धारा शीर्ष के बीच समय-पश्चता (time lag) कितनी है?

7.14 यदि परिपथ को उच्च आवृत्ति की आपूर्ति (240 V, 10 kHz) से जोड़ा जाता है तो अभ्यास 7.13 (a) तथा (b) के उत्तर निकालिए। इससे इस कथन की व्याख्या कीजिए कि अति उच्च आवृत्ति पर किसी परिपथ में प्रेरक लगभग खुले परिपथ के तुल्य होता है। स्थिर अवस्था के पश्चात किसी dc परिपथ में प्रेरक किस प्रकार का व्यवहार करता है।

7.15 40 Ω प्रतिरोध के श्रेणीक्रम में एक 100 μF के संधारित्र को 110 V, 60 Hz की आपूर्ति से जोड़ा गया है।

(a) परिपथ में अधिकतम धारा कितनी है?

(b) धारा शीर्ष व वोल्टेज शीर्ष के बीच समय-पश्चता कितनी है?

7.16 यदि परिपथ को 110 V, 12 kHz आपूर्ति से जोड़ा जाए तो अभ्यास (a) व (b) का उत्तर निकालिए। इससे इस कथन की व्याख्या कीजिए कि अति उच्च आवृत्तियों पर एक संधारित्र चालक होता है। इसकी तुलना उस व्यवहार से कीजिए जो किसी dc परिपथ में एक संधारित्र प्रदर्शित करता है।

7.17 स्रोत की आवृत्ति को एक श्रेणीबद्ध *LCR* परिपथ की अनुनादी आवृत्ति के बराबर रखते हुए तीन अवयवों *L*, *C* तथा *R* को समांतरक्रम में लगाते हैं। यह दर्शाइए कि समांतर *LCR* परिपथ में इस आवृत्ति पर कुल धारा न्यूनतम है। इस आवृत्ति के लिए अभ्यास 7.11 में निर्दिष्ट स्रोत तथा अवयवों के लिए परिपथ की हर शाखा में धारा के rms मान को परिकलित कीजिए।

7.18 एक परिपथ को जिसमें 80 mH का एक प्रेरक तथा 60 μF का संधारित्र श्रेणीक्रम में है, 230 V, 50 Hz की आपूर्ति से जोड़ा गया है। परिपथ का प्रतिरोध नगण्य है।

(a) धारा का आयाम तथा rms मानों को निकालिए।

(b) हर अवयव के सिरों पर विभवपात के rms मानों को निकालिए।

(c) प्रेरक में स्थानांतरित माध्य शक्ति कितनी है?

(d) संधारित्र में स्थानांतरित माध्य शक्ति कितनी है?

(e) परिपथ द्वारा अवशोषित कुल माध्य शक्ति कितनी है?

['माध्य में यह समाविष्ट है' कि इसे 'पूरे चक्र' के लिए लिया गया है]।

7.19 कल्पना कीजिए कि अभ्यास 7.18 में प्रतिरोध 15 Ω है। परिपथ के हर अवयव को स्थानांतरित माध्य शक्ति तथा संपूर्ण अवशोषित शक्ति को परिकलित कीजिए।

© NCERT not to be republished

7.20 एक श्रेणीबद्ध *LCR* परिपथ को जिसमें $L = 0.12$ H, $C = 480$ nF, $R = 23\ \Omega$, 230 V परिवर्ती आवृत्ति वाले स्रोत से जोड़ा गया है।

(a) स्रोत की वह आवृत्ति कितनी है जिस पर धारा आयाम अधिकतम है। इस अधिकतम मान को निकालिए।

(b) स्रोत की वह आवृत्ति कितनी है जिसके लिए परिपथ द्वारा अवशोषित माध्य शक्ति अधिकतम है।

(c) स्रोत की किस आवृत्ति के लिए परिपथ को स्थानांतरित शक्ति अनुनादी आवृत्ति की शक्ति की आधी है।

(d) दिए गए परिपथ के लिए Q कारक कितना है?

7.21 एक श्रेणीबद्ध *LCR* परिपथ के लिए जिसमें $L = 3.0$ H, $C = 27\ \mu$F तथा $R = 7.4\ \Omega$ अनुनादी आवृत्ति तथा Q कारक निकालिए। परिपथ के अनुनाद की तीक्ष्णता को सुधारने की इच्छा से "अर्ध उच्चिष्ठ पर पूर्ण चौड़ाई" को 2 गुणक द्वारा घटा दिया जाता है। इसके लिए उचित उपाय सुझाइए।

7.22 निम्नलिखित प्रश्नों के उत्तर दीजिए–

(a) क्या किसी ac परिपथ में प्रयुक्त तात्क्षणिक वोल्टता परिपथ में श्रेणीक्रम में जोड़े गए अवयवों के सिरों पर तात्क्षणिक वोल्टताओं के बीजगणितीय योग के बराबर होता है? क्या यही बात rms वोल्टताओं में भी लागू होती है?

(b) प्रेरण कुंडली के प्राथमिक परिपथ में एक संधारित्र का उपयोग करते हैं।

(c) एक प्रयुक्त वोल्टता संकेत एक dc वोल्टता तथा उच्च आवृत्ति के एक ac वोल्टता के अध्यारोपण से निर्मित है। परिपथ एक श्रेणीबद्ध प्रेरक तथा संधारित्र से निर्मित है। दर्शाइए कि dc संकेत C तथा ac संकेत L के सिरे पर प्रकट होगा।

(d) एक लैंप से श्रेणीक्रम में जुड़ी चोक को एक dc लाइन से जोड़ा गया है। लैंप तेजी से चमकता है। चोक में लोहे के क्रोड को प्रवेश कराने पर लैंप की दीप्ति में कोई अंतर नहीं पड़ता है। यदि एक ac लाइन से लैंप का संयोजन किया जाए तो तदनुसार प्रेक्षणों की प्रागुक्ति कीजिए।

(e) ac मेंस के साथ कार्य करने वाली फ्लोरोसेंट ट्यूब में प्रयुक्त चोक कुंडली की आवश्यकता क्यों होती है? चोक कुंडली के स्थान पर सामान्य प्रतिरोधक का उपयोग क्यों नहीं होता?

7.23 एक शक्ति संप्रेषण लाइन अपचयी ट्रांसफार्मर में जिसकी प्राथमिक कुंडली में 4000 फेरे हैं, 2300 वोल्ट पर शक्ति निवेशित करती है। 230 V की निर्गत शक्ति प्राप्त करने के लिए द्वितीयक में कितने फेरे होने चाहिए?

7.24 एक जल विद्युत शक्ति संयंत्र में जल दाब शीर्ष 300 m की ऊँचाई पर है तथा उपलब्ध जल प्रवाह $100\ \text{m}^3\text{s}^{-1}$ है। यदि टर्बाइन जनित्र की दक्षता 60% हो तो संयंत्र से उपलब्ध विद्युत शक्ति का आकलन कीजिए, $g = 9.8\ \text{m s}^{-2}$।

7.25 440 V पर शक्ति उत्पादन करने वाले किसी विद्युत संयंत्र से 15 km दूर स्थित एक छोटे से कस्बे में 220 V पर 800 kW शक्ति की आवश्यकता है। विद्युत शक्ति ले जाने वाली दोनों तार की लाइनों का प्रतिरोध 0.5 Ω प्रति किलोमीटर है। कस्बे को उप-स्टेशन में लगे 4000 – 220 V अपचयी ट्रांसफार्मर से लाइन द्वारा शक्ति पहुँचती है।

(a) ऊष्मा के रूप में लाइन से होने वाली शक्ति के क्षय का आकलन कीजिए।

(b) संयंत्र से कितनी शक्ति की आपूर्ति की जानी चाहिए, यदि क्षरण द्वारा शक्ति का क्षय नगण्य है।

(c) संयंत्र के उच्चायी ट्रांसफार्मर की विशेषता बतलाइए।

7.26 ऊपर किए गए अभ्यास को पुनः कीजिए। इसमें पहले के ट्रांसफार्मर के स्थान पर 40,000 – 220 V का अपचयी ट्रांसफार्मर है। [पूर्व की भाँति क्षरण के कारण हानियों को नगण्य मानिए, यद्यपि अब यह सन्निकटन उचित नहीं है क्योंकि इसमें उच्च वोल्टता पर संप्रेषण होता है]। अतः समझाइए कि क्यों उच्च वोल्टता संप्रेषण अधिक वरीय है?

© NCERT not to be republished

12091CH08

अध्याय 8

वैद्युतचुंबकीय तरंगें

© NCERT not to be republished

8.1 भूमिका

अध्याय 4 में हमने सीखा है कि विद्युत धारा चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करती है तथा दो धारावाही तार परस्पर एक-दूसरे पर चुंबकीय बल आरोपित करते हैं। इसके अतिरिक्त, अध्याय 6 में हम यह देख चुके हैं कि समय के साथ परिवर्तनशील चुंबकीय क्षेत्र विद्युत क्षेत्र उत्पन्न करता है। परंतु, क्या इसका विलोम भी सत्य है? क्या समय के साथ परिवर्तित होता हुआ विद्युत क्षेत्र चुंबकीय क्षेत्र को उत्पन्न करता है? जेम्स क्लार्क मैक्सवेल (1831-1879) ने यह तर्क प्रस्तुत किया कि वास्तव में ऐसा ही होता है। न केवल विद्युत धारा वरन समय के साथ परिवर्तनशील विद्युत क्षेत्र भी चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करता है। समय के साथ परिवर्तनशील धारा से जुड़े संधारित्र के बाहर किसी बिंदु पर चुंबकीय क्षेत्र ज्ञात करने के लिए ऐम्पियर का नियम लगाते समय, मैक्सवेल का ध्यान इस नियम संबंधी एक असंगति की ओर गया। इस असंगति को दूर करने के लिए उन्होंने एक अतिरिक्त धारा के अस्तित्व का सुझाव दिया जिसको उन्होंने विस्थापन धारा नाम दिया।

उन्होंने विद्युत व चुंबकीय क्षेत्रों तथा उनके स्रोतों—आवेश एवं धारा-घनत्व को सम्मिलित कर, समीकरणों का एक समुच्चय सूत्रबद्ध किया। इन समीकरणों को मैक्सवेल समीकरण कहते हैं। लोरेंज का बल सूत्र (अध्याय 4) और मिला लें तो ये समीकरण विद्युत-चुंबकत्व के सभी आधारभूत नियमों को गणितीय रूप में व्यक्त करते हैं।

मैक्सवेल के समीकरणों से उभरने वाली सबसे महत्वपूर्ण प्रागुक्ति वैद्युतचुंबकीय तरंगों का अस्तित्व होना है जो अंतरिक्ष में संचरित समय के साथ बदलते (युग्मित) विद्युतीय एवं चुंबकीय क्षेत्र हैं। मैक्सवेल के समीकरणों के अनुसार, इन तरंगों की चाल, प्रकाशीय मापन द्वारा प्राप्त प्रकाश



जेम्स क्लार्क मैक्सवेल (1831–1879)

जेम्स क्लार्क मैक्सवेल (1831 – 1879) स्कॉटलैंड के एडिनबर्ग में जन्मे, उन्नीसवीं शती के महानतम भौतिकविदों में से एक। उन्होंने गैस के अणुओं की तापीय गतियों के वितरण के लिए व्यंजक व्युत्पन्न किया और वे उन पहले लोगों में से एक थे जिन्होंने श्यानता आदि मापन योग्य राशियों का उपयोग कर आण्विक प्राचलों के विश्वसनीय आकलन प्राप्त किए। मैक्सवेल की सबसे बड़ी उपलब्धि, विद्युत एवं चुंबकत्व के (कूलॉम, ऑर्स्टेड, ऐम्पियर एवं फैराडे द्वारा खोजे गए) नियमों के एकीकरण द्वारा संगत समीकरणों का एक समुच्चय प्रस्तुत करना था, जिन्हें आज हम मैक्सवेल के समीकरणों के नाम से जानते हैं। इनके आधार पर वे इस सर्वाधिक महत्वपूर्ण निष्कर्ष पर पहुँचे कि प्रकाश, वैद्युतचुंबकीय तरंग ही है। मजे की बात यह है कि मैक्सवेल, फैराडे के वैद्युत अपघटन के नियमों से उत्पन्न इस विचार से सहमत नहीं थे कि विद्युत की प्रकृति कण रूप में है।

की चाल (3×10^8 m/s) के लगभग बराबर होती है। इससे हम इस महत्वपूर्ण निष्कर्ष पर पहुँचे कि प्रकाश एक वैद्युतचुंबकीय तरंग है। इस प्रकार, मैक्सवेल के कार्य ने विद्युत, चुंबकत्व एवं प्रकाश के क्षेत्रों को एकीकृत कर दिया। 1885 में, हर्ट्ज़ ने प्रयोग द्वारा वैद्युतचुंबकीय तरंगों के अस्तित्व को प्रदर्शित किया। मार्कोनी एवं अन्य आविष्कर्ताओं ने यथासमय, इसके तकनीकी उपयोग में संचार के क्षेत्र में जो क्रांति की, उसके आज हम प्रत्यक्षदर्शी हैं।

इस अध्याय में, पहले हम विस्थापन धारा की आवश्यकता एवं उसके परिणामों के विषय में चर्चा करेंगे। फिर हम वैद्युतचुंबकीय तरंगों का एक विवरणात्मक चित्र प्रस्तुत करेंगे। वैद्युतचुंबकीय तरंगों का संपूर्ण वर्णक्रम, जो गामा किरणों (तरंगदैर्घ्य $\sim 10^{-12}$ m) से दीर्घ रेडियो तरंगों (तरंगदैर्घ्य $\sim 10^6$ m) तक फैला है, उसके विषय में चर्चा की जाएगी। संचार प्रणाली में वैद्युतचुंबकीय तरंगें किस प्रकार संप्रेषित एवं अभिगृहीत की जाती हैं इस विषय में अध्याय 15 में चर्चा करेंगे।

8.2 विस्थापन धारा

अध्याय 4 में हम देख चुके हैं कि विद्युत धारा अपने चारों ओर एक चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करती है। मैक्सवेल ने दर्शाया कि तार्किक संगति के लिए यह आवश्यक है कि परिवर्तनशील विद्युत क्षेत्र भी चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करे। यह प्रभाव बहुत ही महत्त्व का है, क्योंकि यह रेडियो तरंगों, गामा किरणों, एवं दृश्य प्रकाश के अतिरिक्त भी अन्य सभी वैद्युतचुंबकीय तरंगों के अस्तित्व की व्याख्या करता है।

यह देखने के लिए कि परिवर्तनशील विद्युत क्षेत्र किस प्रकार चुंबकीय क्षेत्र के उद्भव का कारण बनता है। आइए हम किसी संधारित्र के आवेशन की प्रक्रिया पर विचार करें और संधारित्र के बाहर किसी बिंदु पर चुंबकीय क्षेत्र ज्ञात करने के लिए ऐम्पियर के परिपथीय नियम (अध्याय 4)

$$\oint \mathbf{B}.\mathbf{dl} = \mu_0 \, i \, (t) \qquad (8.1)$$

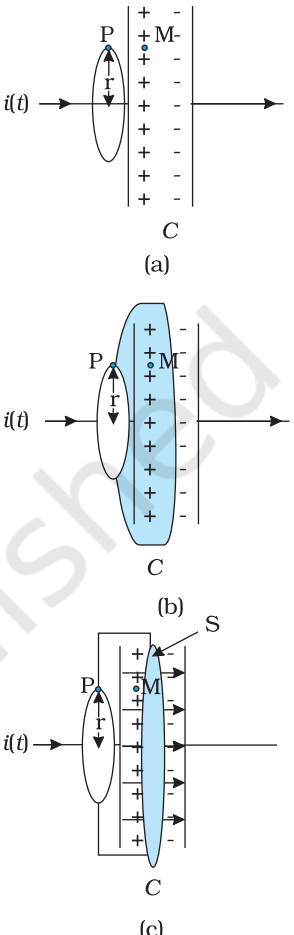
का उपयोग करें।

[चित्र 8.1(a)] में एक समांतर प्लेट संधारित्र C दर्शाया गया है जो एक ऐसे परिपथ का भाग है जिसमें समय के साथ परिवर्तनशील धारा $i\,(t)$ प्रवाहित हो रही है। आइए, समांतर प्लेट संधारित्र के बाह्य क्षेत्र में स्थित किसी बिंदु जैसे कि P पर चुंबकीय क्षेत्र ज्ञात करें। इसके लिए, हम r त्रिज्या का एक समतल वृत्ताकार लूप लेते हैं जिसका तल धारावाही तार की दिशा के लंबवत है और जिसका केंद्र तार के ऊपर है [चित्र 8.1(a)]। सममिति के आधार पर हम कह सकते हैं कि चुंबकीय क्षेत्र की दिशा वृत्ताकार लूप की परिधि के अनुदिश है और लूप के प्रत्येक बिंदु पर इसका परिमाण समान है। इस कारण, यदि क्षेत्र का परिमाण B है तो समीकरण (8.1) का वाम पक्ष $B\,(2\pi r)$ है।

$$B(2\pi r) = \mu_0 i\,(t) \qquad (8.2)$$

© NCERT not to be republished

अब इसी परिसीमा वाली एक अन्य सतह पर विचार कीजिए। यह घड़े के आकार की एक सतह है जो धारा को कहीं भी नहीं छूती है [चित्र 8.1(b)] पर इसकी तली संधारित्र की दोनों प्लेटों के बीच में है और उसका मुँह ऊपर वर्णित वृत्ताकार लूप है। दूसरी ऐसी सतह (बिना ढक्कन के) टिफिन बॉक्स के आकार की है [चित्र 8.1(c)]। *समान* प्राचलों वाली ऐसी सतहों के लिए ऐम्पियर का नियम लगाने पर, हम पाते हैं कि समीकरण (8.1) के बाईं ओर का मान तो नहीं बदलता है पर दाईं ओर का मान *शून्य* है *न कि* $\mu_0 i\,(t)$, क्योंकि चित्र 8.1(b) एवं (c) में दर्शायी गई सतहों से कोई धारा नहीं गुजरती है। इसलिए, हमारा सामना एक *विरोधाभास* से होता है। एक प्रकार से गणना करें तो बिंदु P पर चुंबकीय क्षेत्र है; दूसरी प्रकार गणना करें तो P पर चुंबकीय क्षेत्र शून्य होता है। क्योंकि यह विरोधाभास हमारे द्वारा लागू किए गए ऐम्पियर के परिपथीय नियम के कारण उत्पन्न होता है। इस नियम में संभवत: कोई पद छूट गया है। छूटा हुआ यह पद ऐसा होना चाहिए कि चाहे हम किसी भी सतह का उपयोग करें बिंदु P पर चुंबकीय क्षेत्र का समान मान प्राप्त हो।



चित्र 8.1 एक समांतर प्लेट संधारित्र *C*, जो एक ऐसे परिपथ का भाग है जिसमें समय के साथ परिवर्तनशील धारा $i\,(t)$ प्रवाहित हो रही है; तथा, (a) में *r* त्रिज्या का एक लूप दर्शाया गया है जो लूप पर स्थित P बिंदु पर चुंबकीय क्षेत्र ज्ञात करने के लिए बनाया गया है; (b) में एक घट-आकार, सतह दर्शायी गई है जो संधारित्र के अंदर इसकी प्लेटों के बीच से गुजरती है एवं (a) में दर्शाया गया लूप इसका रिम है; (c) में (टिफिन की आकृति की) एक अन्य सतह दर्शायी गई है, वृत्ताकार लूप जिसका रिम है एवं समतल वृत्ताकार तली *S* संधारित्र की प्लेटों के बीच में है। तीर संधारित्र प्लेटों के बीच एक समय विद्युत क्षेत्र दर्शाते हैं।

यदि हम चित्र 8.1(c) को ध्यानपूर्वक देखें तो छूटे हुए पद का अनुमान लगाया जा सकता है। क्या संधारित्र की प्लेटों के *बीच* की सतह *S* से गुजरती हुई किसी राशि के मान में परिवर्तन हो रहा है। जी हाँ, वास्तव में उनके बीच विद्युत क्षेत्र बदल रहा है। यदि संधारित्र की प्लेटों का क्षेत्रफल *A* हो एवं इस पर कुल आवेश *Q* हो तो प्लेटों के बीच विद्युत क्षेत्र **E** का परिमाण $(Q/A)/\varepsilon_0$ होता है [देखिए समीकरण (2.41)]। यह क्षेत्र चित्र 8.1(c) की सतह *S* के लंबवत होता है। इसका परिमाण संधारित्र की प्लेटों के क्षेत्रफल *A* पर समान रहता है पर इनके बाहर शून्य हो जाता है। इसलिए, सतह *S* से गुजरने वाला *विद्युत फ्लक्स*, गाउस के नियम के उपयोग से होता है

$$\Phi_E = |\mathbf{E}|\,A = \frac{1}{\varepsilon_0}\frac{Q}{A}A = \frac{Q}{\varepsilon_0} \qquad (8.3)$$

अब यदि संधारित्र की प्लेटों पर आवेश *Q* समय के साथ परिवर्तित हो तो यहाँ एक धारा $i = (\mathrm{d}Q/\mathrm{d}t)$ होगी। इसलिए समीकरण (8.3) से

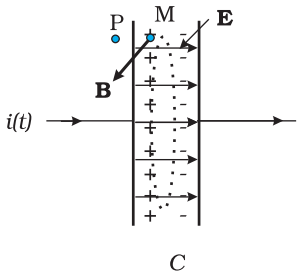
$$\frac{\mathrm{d}\Phi_E}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{Q}{\varepsilon_0}\right) = \frac{1}{\varepsilon_0}\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}$$

यह निर्दिष्ट करता है कि ऐम्पियर के नियम में संगति के लिए,

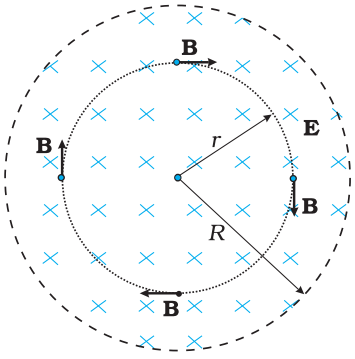
$$\varepsilon_0\left(\frac{\mathrm{d}\Phi_E}{\mathrm{d}t}\right) = i \qquad (8.4)$$

यही ऐम्पियर के परिपथीय नियम का छूटा हुआ पद है। यदि हम किसी भी सतह से होकर चालकों द्वारा वाहित कुल धारा में, ε_0 गुणा विद्युत फ्लक्स के परिवर्तन की दर जोड़ें तो हम ऐम्पियर के परिपथीय नियम का सामान्यीकरण कर सकते हैं। तब सभी सतहों के लिए धारा का मान *i* समान होगा। तब कहीं पर भी ऐम्पियर का सामान्यीकृत नियम लगाने पर *B* के प्राप्त मान में कोई विसंगति नहीं आएगी। बिंदु P पर, B का मान शून्येतर ही होगा चाहे इसकी गणना करने के लिए हम कोई भी सतह लें। प्लेटों के बाहर, किसी बिंदु P पर *B* का मान वही होगा जो ठीक इसके अंदर बिंदु M पर होना चाहिए [चित्र 8.1(a)]। आवेशों के प्रवाह के कारण चालकों में जो धारा प्रवाहित होती है उसे *चालन धारा* कहा जाता है। समीकरण (8.4) द्वारा व्यक्त धारा एक नवीन पद है। जो परिवर्तनशील विद्युत क्षेत्र (या विद्युतीय विस्थापन, जो अभी भी कभी उपयोग में आता है) के कारण अस्तित्व में आता है। इसको इसलिए *विस्थापन धारा* अथवा मैक्सवेल की विस्थापन धारा कहा जाता है। चित्र 8.2, ऊपर वर्णित समांतर प्लेट संधारित्र के अंदर विद्युत एवं चुंबकीय क्षेत्र दर्शाता है।

© NCERT not to be republished



(a)



(b)

चित्र 8.2 (a) संधारित्र की प्लेटों के बीच स्थित बिंदु M पर विद्युत क्षेत्र **E** एवं चुंबकीय क्षेत्र **B** (b) चित्र (a) का परिच्छेदीय आरेख।

मैक्सवेल द्वारा किया गया व्यापकीकरण निम्न है। चुंबकीय क्षेत्र का स्रोत केवल प्रवाहमान आवेशों से निर्मित चालन विद्युत धारा ही नहीं होती, अपितु समय के सापेक्ष विद्युत क्षेत्र में परिवर्तन की दर भी इसका कारण बन सकती है। अधिक स्पष्टता से इस बात को कहें तो कुल धारा i, i_c द्वारा निर्दिष्ट चालन धारा एवं i_d (= ε_0 ($d\Phi_E/dt$)) द्वारा निर्दिष्ट विस्थापन धारा के योग के बराबर होती है। अत:

$$i = i_c + i_d = i_c + \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \tag{8.5}$$

सुस्पष्ट शब्दों में इसका अर्थ है कि संधारित्र की प्लेटों के बाहर केवल चालन धारा $i_c = i$ होती है, तथा कोई विस्थापन धारा नहीं होती, अर्थात् $i_d = 0$ । दूसरी ओर संधारित्र के अंदर कोई चालन धारा नहीं होती, अर्थात् $i_c = 0$ और केवल विस्थापन धारा होती है जिससे $i_d = i$ ।

व्यापकीकृत (एवं यथार्थ) ऐम्पियर के परिपथीय नियम का स्वरूप समीकरण (8.1) जैसा है। बस केवल एक अंतर है "ऐसी किसी भी सतह, जिसकी परिमिति बंद लूप है से गुजरने वाली कुल धारा चालन धारा एवं विस्थापन धारा का योग होती है।" व्यापक रूप में यह नियम

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 i_c + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \tag{8.6}$$

तथा इसे ऐम्पियर मैक्सवेल नियम कहते हैं।

किसी भी दृष्टि से विस्थापन धारा के भौतिक प्रभाव चालन धारा के समान हैं। कुछ स्थितियों में, उदाहरणार्थ, किसी चालक तार में नियत विद्युत क्षेत्र के लिए विस्थापन धारा का मान शून्य हो सकता है क्योंकि किसी विद्युत क्षेत्र **E** समय के साथ परिवर्तित नहीं होता। कुछ दूसरी स्थितियों में, जैसे कि ऊपर बताए गए आवेशित होते संधारित्र में चालन एवं विस्थापन धारा दोनों ही उपस्थित हो सकते हैं पर अलग-अलग दिक्स्थानों में। परंतु अधिकतर स्थितियों में दोनों एक ही स्थान पर विद्यमान हो सकते हैं क्योंकि कोई भी माध्यम पूर्ण चालक या पूर्ण विद्युतरोधी नहीं होता। सर्वाधिक रोचक तथ्य यह है कि किसी विशाल क्षेत्र में जहाँ कोई भी चालन धारा नहीं होती, समय के साथ परिवर्तनशील विद्युत क्षेत्र के कारण केवल विस्थापन धारा ही होती है। ऐसे क्षेत्र में, आसपास कोई (चालन) धारा स्रोत नहीं होने पर भी चुंबकीय क्षेत्र विद्यमान होगा। इस विस्थापन धारा के अस्तित्व की प्रागुक्ति प्रयोग द्वारा पुष्ट की जा सकती है। उदाहरण के लिए, चित्र 8.2(a) के संधारित्र की प्लेटों के बीच (माना बिंदु M पर) चुंबकीय क्षेत्र मापा जा सकता है। यह ठीक उतना ही पाया जाएगा जितना कि बाहर के किसी बिंदु (माना P) पर।

विस्थापन धारा के (शब्दश:) दूरगामी परिणाम हैं। एक तथ्य जिसकी ओर हमारा ध्यान एकदम आकर्षित होता है, वह यह है कि विद्युत एवं चुंबकत्व अब और अधिक सममितीय* हो गए हैं। फैराडे का प्रेरण संबंधी नियम यह बताता है कि प्रेरित विद्युत वाहक बल चुंबकीय फ्लक्स *परिवर्तन की दर के बराबर* होता है। अब, चूँकि दो बिंदुओं 1 एवं 2 के बीच विद्युत वाहक बल, बिंदु 1 से बिंदु 2 तक इकाई आवेश को ले जाने में किया गया कार्य है। विद्युत वाहक बल की उपस्थिति एक विद्युत क्षेत्र की उपस्थिति को इंगित करती है। फैराडे के विद्युत चुंबकीय प्रेरण संबंधी नियम को हम दूसरे शब्दों में इस प्रकार भी कह सकते हैं कि समय के साथ परिवर्तनशील *चुंबकीय क्षेत्र, विद्युत क्षेत्र* उत्पन्न करता है। यह तथ्य कि समय के साथ परिवर्तनशील *विद्युत क्षेत्र, चुंबकीय क्षेत्र* उत्पन्न करता

* ये अभी भी पूर्णत: सममितीय नहीं हैं। विद्युत क्षेत्र को उत्पन्न करने के लिए विद्युत आवेशों के सादृश्य चुंबकीय क्षेत्र के स्रोत (चुंबकीय एकल ध्रुव, magnetic monopole) ज्ञात नहीं हैं।

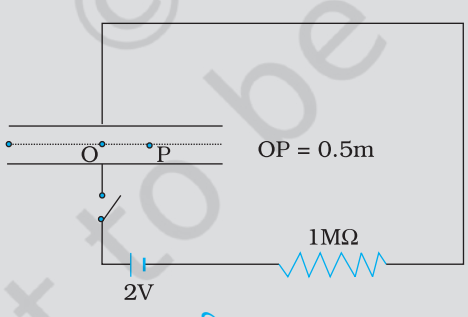
© NCERT not to be republished

है, फैराडे के नियम का सममितीय प्रतिरूप है और विस्थापन धारा के चुंबकीय क्षेत्र का स्रोत होने का परिणाम है। अत: समय पर निर्भर वैद्युत एवं चुंबकीय क्षेत्र एक-दूसरे की उत्पत्ति के कारण हैं। फैराडे का विद्युत चुंबकीय प्रेरण का नियम एवं मैक्सवेल-ऐम्पियर का परिपथीय नियम इस कथन की परिमाणात्मक अभिव्यक्ति है। जहाँ धारा, कुल धारा है जैसा कि समीकरण (8.5) से स्पष्ट है। इस सममिति की एक अत्यंत महत्वपूर्ण निष्पत्ति विद्युत चुंबकीय तरंगों का अस्तित्व है जिसके विषय में हम अगले अनुभाग में चर्चा करेंगे।

निर्वात में मैक्सवेल के समीकरण

1. $\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = Q/\varepsilon_0$ (विद्युत संबंधी गाउस नियम)
2. $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$ (चुंबकत्व संबंधी गाउस नियम)
3. $\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \frac{-d\Phi_B}{dt}$ (फैराडे नियम)
4. $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 i_c + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$ (ऐम्पियर-मैक्सवेल नियम)

उदाहरण 8.1 एक समांतर प्लेट संधारित्र जिसकी वृत्ताकार प्लेटों की त्रिज्या 1 m है, धारिता 1 nF है। समय $t = 0$ पर इसको आवेशित करने के लिए $R = 1\ \text{M}\Omega$ के एक प्रतिरोधक के साथ श्रेणीक्रम में 2V की बैटरी से जोड़ा गया है (चित्र 8.3)। 10^{-3}s के पश्चात संधारित्र के बीच में दोनों प्लेटों के केंद्र एवं उनकी परिमिति के ठीक मध्य में स्थित बिंदु P पर चुंबकीय क्षेत्र का परिकलन कीजिए। [क्षण t पर संधारित्र पर आवेश $q(t) = CV[1 - \exp(-t/\tau)]$ होता है, जहाँ समय नियतांक $\tau = CR$ है]।



चित्र 8.3

हल CR परिपथ का समय नियतांक $\tau = CR = 10^{-3}$ s । अत:

$q(t) = CV[1 - \exp(-t/\tau)]$
$= 2 \times 10^{-9}[1 - \exp(-t/10^{-3})]$

t क्षण पर प्लेटों के बीच विद्युत क्षेत्र,

$$E = \frac{q(t)}{\varepsilon_0 A} = \frac{q}{\pi\varepsilon_0}$$; क्योंकि $A = \pi(1)^2\ \text{m}^2$ = प्रत्येक प्लेट का क्षेत्रफल

अब बिंदु P से गुजरते हुए प्लेटों के समांतर एक (1/2) m त्रिज्या के वृत्ताकार लूप की कल्पना कीजिए। लूप के प्रत्येक बिंदु पर चुंबकीय क्षेत्र **B** का परिमाण समान है और इसकी दिशा लूप के अनुदिश है। लूप से गुजरने वाले फ्लक्स Φ_E का मान है–

उदाहरण 8.1

© NCERT not to be republished

उदाहरण 8.1

Φ_E = E × लूप का क्षेत्रफल

$$= E \times \pi \times \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{\pi E}{4} = \frac{q}{4\varepsilon_0}$$

विस्थापन धारा

$$i_d = \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

$$= \frac{1}{4}\frac{dq}{dt} = 0.5 \times 10^{-6} \exp(-1),$$

$t = 10^{-3}$s रखने पर। अब लूप के लिए ऐम्पियर का नियम लागू करने पर,

$$B \times 2\pi \times \left(\frac{1}{2}\right) = \mu_0 (i_c + i_d) = \mu_0 (0 + i_d) = 0.5 \times 10^{-6}\, \mu_0 \exp(-1)$$

अथवा, $B = 0.74 \times 10^{-13}$ T

8.3 वैद्युतचुंबकीय तरंगें

8.3.1 तरंगों के स्रोत

वैद्युतचुंबकीय (electromagnetic, संक्षेप में em) तरंगें उत्पन्न कैसे होती हैं? न तो स्थिर आवेश, न ही एकसमान गति से चलते हुए आवेश (स्थिर धारा), वैद्युतचुंबकीय तरंगों के स्रोत हो सकते हैं। क्योंकि, स्थिर आवेश तो केवल स्थिरवैद्युत क्षेत्र उत्पन्न करते हैं जबकि गतिमान आवेश चुंबकीय क्षेत्र भी उत्पन्न करते हैं पर वह समय के साथ परिवर्तित नहीं होता। मैक्सवेल के सिद्धांत की यह एक महत्वपूर्ण निष्पत्ति है कि त्वरित आवेश वैद्युतचुंबकीय तरंगें विकिरित करते हैं। इस मौलिक निष्पत्ति का प्रमाण प्रस्तुत पुस्तक के विस्तार क्षेत्र से परे है, परंतु हम इसको एक अपरिष्कृत, गुणात्मक विवेचन के आधार पर स्वीकार कर सकते हैं। मान लीजिए कि एक आवेश है जो किसी निश्चित आवृत्ति से दोलन कर रहा है (कोई दोलन करता हुआ आवेश भी एक त्वरित आवेश का उदाहरण है)। यह उस क्षेत्र में एक दोलित विद्युत क्षेत्र उत्पन्न करता है जो पुनः एक दोलित चुंबकीय क्षेत्र को जन्म देता है जो पुनः एक दोलित विद्युत क्षेत्र की उत्पत्ति का कारण बनता है और यह प्रक्रिया चलती रहती है। अतः दोलित विद्युत एवं चुंबकीय क्षेत्र एक-दूसरे को संपोषित करते हैं या कहें कि तरंग गमन करती है। स्वाभाविक रूप से वैद्युतचुंबकीय तरंगों की आवृत्ति, आवेश के दोलनों की आवृत्ति के बराबर होती है। गमनकारी तरंगों से जुड़ी ऊर्जा, स्रोत अर्थात त्वरित आवेश की ऊर्जा से ही प्राप्त होती है।

पूर्वोक्त चर्चा के आधार पर हो सकता है कि इस प्रागुक्ति का परीक्षण कि प्रकाश विद्युत चुंबकीय तरंग है, सहज हो सकता है। हम विचार कर सकते हैं कि दृश्य प्रकाश (माना कि पीला) उत्पन्न करने के लिए हमें बस एक आवेश को उस प्रकाश की आवृत्ति से दोलन कराने के लिए एक ac परिपथ की आवश्यकता है। लेकिन अफसोस की बात यह है कि ऐसा संभव नहीं है। पीले प्रकाश की आवृत्ति लगभग 6×10^{14} Hz है जबकि अत्यधिक आधुनिक इलैक्ट्रॉनिक परिपथों से भी जो अधिकतम आवृत्ति हम प्राप्त कर पाते हैं वह लगभग 10^{11} Hz होती है। यही कारण है कि जब वैद्युतचुंबकीय तरंगों का प्रायोगिक प्रदर्शन हुआ तो वह निम्न आवृत्ति की तरंगों (रेडियो तरंगों के परिसर में) के लिए ही हुआ, जैसा कि हर्ट्ज़ के प्रयोग (1887) के प्रकरण में देख सकते हैं।

मैक्सवेल के सिद्धांत के परीक्षण के लिए किए गए हर्ट्ज़ के सफल प्रयोग ने सनसनी फैला दी तथा ये प्रयोग इस क्षेत्र में अन्य महत्वपूर्ण कार्यों के लिए प्रेरणा का आधार बने। इस संबंध में

2022-23

© NCERT not to be republished

दो महत्वपूर्ण उपलब्धियाँ उल्लेख किए जाने योग्य हैं। हर्ट्ज़ के प्रयोग के सात साल बाद, जगदीश चंद्र बसु ने कलकत्ता में कार्य करते हुए काफी कम तरंगदैर्घ्य (25 mm से 5 mm) की वैद्युतचुंबकीय तरंगें उत्पन्न करने और उन्हें प्रेक्षित करने में सफलता प्राप्त की। उनका प्रयोग भी हर्ट्ज़ के प्रयोग की भाँति ही प्रयोगशाला तक ही सीमित रहा।

लगभग उसी समय इटली में गुगलीओ मार्कोनी ने हर्ट्ज़ के कार्य का अनुसरण करते हुए कई किलोमीटर तक की दूरियों तक वैद्युतचुंबकीय तरंगें संप्रेषित करने में सफलता प्राप्त की। मार्कोनी के प्रयोग से संचार के क्षेत्र में वैद्युतचुंबकीय तरंगों के उपयोग का प्रारंभ हुआ।



हेनरिच रूडोल्फ हर्ट्ज़ (1857 – 1894) जर्मन भौतिकविद्, जिन्होंने पहली बार रेडियो तरंगों को प्रसारित किया और ग्रहण किया। उन्होंने वैद्युतचुंबकीय तरंगें पैदा कीं, उन्हें आकाश में भेजा और उनका तरंगदैर्घ्य तथा चाल ज्ञात किया। उन्होंने दर्शाया कि वैद्युतचुंबकीय तरंगों के कंपनों की प्रकृति, परावर्तन एवं अपवर्तन ठीक वैसे ही थे जैसे प्रकाश एवं ऊष्मा तरंगों में, और इस प्रकार पहली बार इनकी अभिन्नता सिद्ध की। उन्होंने गैसों में विद्युत विसर्जन संबंधी शोध की अगुवाई की और प्रकाश-विद्युत प्रभाव की खोज की।

हेनरिच रूडोल्फ हर्ट्ज़ (1857–1894)

8.3.2 वैद्युतचुंबकीय तरंगों की प्रकृति

मैक्सवेल के समीकरणों के आधार पर यह दर्शाया जा सकता है कि किसी वैद्युतचुंबकीय तरंग में विद्युतीय एवं चुंबकीय क्षेत्र एक-दूसरे के लंबवत होते हैं और इसके गमन की दिशा के भी। विस्थापन धारा पर दिए गए विवेचन के आधार पर भी यह तर्कसंगत प्रतीत होता है। चित्र 8.2 पर विचार कीजिए। संधारित्र में प्लेटों के बीच विद्युत क्षेत्र प्लेटों के लंबवत है। विस्थापन धारा के द्वारा उत्पन्न चुंबकीय क्षेत्र संधारित्र की प्लेटों के समांतर वृत्त के अनुदिश है। अतः इस स्थिति में **B** तथा **E** परस्पर लंबवत हैं। यह एक सामान्य लक्षण है।

चित्र (8.4) में हमने z दिशा में गमन करती हुई एक समतल वैद्युतचुंबकीय तरंग का प्रारूपिक उदाहरण प्रदर्शित किया है (किसी क्षण t पर, क्षेत्रों को z-निर्देशांक के फलन के रूप में दर्शाया गया है)। विद्युत क्षेत्र E_x, x-अक्ष के अनुदिश है और किसी क्षण t पर z के साथ ज्यावक्रीय रूप में परिवर्तित होता है। चुंबकीय क्षेत्र B_y, y-अक्ष के अनुदिश है और यह भी z के साथ ज्यावक्रीय रूप में परिवर्तित होता है। विद्युत क्षेत्र E_x एवं चुंबकीय क्षेत्र B_y एक दूसरे के लंबवत हैं एवं गमन दिशा, z के भी लंबवत है। E_x एवं B_y को हम निम्नवत लिख सकते हैं :

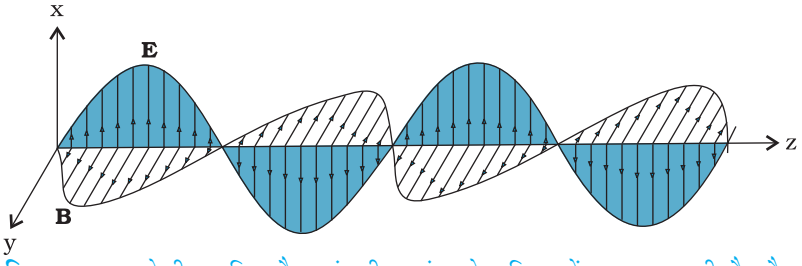
$$E_x = E_0 \sin (kz - \omega t) \qquad [8.7(a)]$$

$$B_y = B_0 \sin (kz - \omega t) \qquad [8.7(b)]$$

यहाँ k एवं तरंग की तरंगदैर्घ्य λ में निम्नलिखित सामान्य संबंध है

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \qquad (8.8)$$

तथा यहाँ ω कोणीय आवृत्ति है, k तरंग सदिश (या गमन सदिश) **k** का परिमाण है। k की दिशा तरंग के गमन की दिशा निर्दिष्ट करती है। तरंग की गमन चाल (ω/k) है। E_x एवं B_y के लिए समीकरणों [8.7(a) एवं (b)] तथा मैक्सवेल के समीकरणों का उपयोग करके आप निम्न परिणाम पर पहुँच सकते हैं –



चित्र 8.4 एक रेखीय ध्रुवित वैद्युतचुंबकीय तरंग जो z-दिशा में गमन कर रही है और जिसका दोलनकारी विद्युत क्षेत्र **E**, x-दिशा के अनुदिश एवं दोलनकारी चुंबकीय क्षेत्र **B**, y-दिशा के अनुदिश है।

© NCERT not to be republished

$\omega = ck$, यहाँ, $c = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$ [8.9(a)]

समीकरण $\omega = ck$, सभी तरंगों के लिए प्रामाणिक संबंध है (देखिए कक्षा 11 भौतिकी पाठ्यपुस्तक, अनुभाग 15.4)। प्राय: इस संबंध को आवृत्ति, ν $(=\omega/2\pi)$ एवं तरंगदैर्घ्य, λ $(=2\pi/k)$ के पदों में इस रूप में लिखा जाता है–

$$2\pi\nu = c\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \quad \text{अथवा}$$

$\nu\lambda = c$ [8.9(b)]

मैक्सवेल के समीकरणों के आधार पर इस निष्कर्ष पर भी पहुँचा जा सकता है कि किसी वैद्युतचुंबकीय तरंग में विद्युत एवं चुंबकीय क्षेत्र परस्पर निम्नलिखित समीकरण द्वारा संबंधित है –

$B_0 = (E_0/c)$ (8.10)

अब हम वैद्युतचुंबकीय तरंगों के कुछ अभिलक्षणों पर टिप्पणियाँ करते हैं। वे मुक्त स्थान या निर्वात में, विद्युत एवं चुंबकीय क्षेत्रों के स्व:संपोषित दोलन हैं। वे इस अर्थ में अभी तक हमारे द्वारा अध्ययन की गई अन्य तरंगों से भिन्न हैं कि इनमें विद्युत एवं चुंबकीय क्षेत्रों के दोलनों के लिए किसी *भौतिक माध्यम* की आवश्यकता नहीं होती। वायु में ध्वनि तरंगें अनुदैर्घ्य तरंगें होती हैं जो गमन दिशा में संपीडनों एवं विरलनों के रूप में चलती हैं। दृढ़ एवं विरूपण का विरोध करने वाले ठोस में भी अनुप्रस्थ प्रत्यास्थ तरंगें गमन कर सकती हैं। उन्नीसवीं शताब्दी के वैज्ञानिक इस यांत्रिक चित्र के ऐसे अभ्यस्त हो गए थे कि उन्होंने एक ऐसे सर्वव्यापी माध्यम की कल्पना की जो सब जगह और सब पदार्थों में विद्यमान था और जो विद्युत एवं चुंबकीय क्षेत्रों के प्रति वैसे ही क्रिया-प्रतिक्रिया करता था जैसे कोई भी प्रत्यास्थ माध्यम करता है। उन्होंने इस माध्यम को *ईथर* नाम दिया। वे इस ईथर माध्यम की सत्यता के लिए इतने आश्वस्त थे कि सर आर्थर कॉनन डॉयल (जो कि प्रसिद्ध जासूस शरलक होल्म्स के सृष्टिकर्ता) ने द *पॉइज़न बैल्ट* (Poison Belt)नामक उपन्यास की रचना की जिसमें सौरमंडल एक विषैले ईथर वाले क्षेत्र से गुजरता माना गया है। अब हम जानते हैं कि इस प्रकार के किसी भौतिक माध्यम की आवश्यकता नहीं है। माइकल्सन एवं मोरले के 1887 में किए गए प्रसिद्ध प्रयोग ने *ईथर* की प्राक्कल्पना को पूरी तरह धराशायी कर दिया। दिक्काल में दोलन करते विद्युत एवं चुंबकीय क्षेत्र, निर्वात में भी एक-दूसरे को संपोषित करके बनाए रख सकते हैं।

लेकिन, अगर एक भौतिक माध्यम वास्तव में विद्यमान हो तो उदाहरण के लिए हम जानते हैं कि प्रकाश जो वैद्युतचुंबकीय तरंगें ही हैं; काँच में से गमन करता है। यह हम पहले ही देख चुके हैं कि किसी माध्यम में कुल विद्युत एवं चुंबकीय क्षेत्रों को उस माध्यम की आपेक्षिक विद्युतशीलता ε एवं आपेक्षिक चुंबकशीलता μ के पदों में वर्णित किया जाता है (यह राशियाँ बताती हैं कि बाह्य क्षेत्र की तुलना में कुल क्षेत्र कितने गुना है)। मैक्सवेल समीकरणों में विद्युत एवं चुंबकीय क्षेत्रों के विवरण में ε_0 एवं μ_0 का स्थान यह राशियाँ ले लेती हैं। आपेक्षिक विद्युतशीलता ε एवं आपेक्षिक चुंबकशीलता μ वाले किसी माध्यम में, प्रकाश का वेग हो जाता है

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \qquad (8.11)$$

अत: किसी माध्यम में प्रकाश का वेग उस माध्यम के वैद्युत एवं चुंबकीय गुणों पर निर्भर करता है। अगले अध्याय में हम देखेंगे कि एक माध्यम के सापेक्ष दूसरे माध्यम का *अपवर्तनांक* इन दो माध्यमों में प्रकाश के वेग के अनुपात में होता है।

मुक्त आकाश अथवा निर्वात में वैद्युतचुंबकीय तरंगों का वेग एक महत्वपूर्ण, मौलिक नियतांक

© NCERT not to be republished

है। विभिन्न तरंगदैर्घ्य की वैद्युतचुंबकीय तरंगों पर किए गए प्रयोगों ने यह दर्शाया है कि यह वेग (जो तरंगदैर्घ्य पर निर्भर नहीं है) सभी के लिए समान होता है और इसका मान 3×10^8 m/s से कुछ मीटर प्रति सेकंड कम या अधिक होता है। निर्वात में वैद्युतचुंबकीय तरंगों के वेग का नियत होना, प्रयोगों द्वारा इतनी दृढ़ता से पुष्ट हो चुका है और इसका मान इतनी अधिक यथार्थता से ज्ञात किया जा चुका है कि इसको *लंबाई* के मानक के रूप में स्वीकार कर लिया गया है। अर्थात मीटर को अब उस दूरी के रूप में *परिभाषित* किया जाता है कि जो दूरी प्रकाश द्वारा $1/c$ समय में तय की जाती है [$(1/c)$ सेकंड = $(2.99792458 \times 10^8)^{-1}$ सेकंड]। यह परिभाषीकरण निम्न कारण से किया गया है। समय के मूल मात्रक को कुछ परमाणु आवृत्तियों अर्थात किसी विशिष्ट प्रक्रिया में परमाणु द्वारा उत्सर्जित प्रकाश की आवृत्ति के पदों में बहुत अधिक यथार्थता से परिभाषित किया जा सकता है। लेकिन लंबाई के मूल मात्रक को सीधे-सीधे इतनी ही यथार्थता से परिभाषित करना कठिन है। प्रकाश की चाल c के लिए पूर्व के मापनों में, तात्कालिक लंबाई का मात्रक (मीटर छड़) प्रयोग करके ज्ञात किए गए मान लगभग 2.9979246×10^8 m/s प्राप्त हुए। क्योंकि c का मान नियत संख्या है अतः लंबाई को c एवं समय के मात्रक के पदों में परिभाषित किया जा सकता है!

हर्ट्ज़ ने न केवल वैद्युतचुंबकीय तरंगों का अस्तित्व प्रदर्शित किया बल्कि उन्होंने यह भी दर्शाया कि प्रकाश तरंगों की तुलना में एक करोड़ गुना तरंगदैर्घ्य की तरंगें विवर्तित, अपवर्तित एवं ध्रुवित हो सकती हैं। इस प्रकार, उन्होंने विकिरणों की तरंग प्रकृति को निर्णायक रूप से स्थापित कर दिया। इसके अतिरिक्त उन्होंने अप्रगामी वैद्युतचुंबकीय तरंगें उत्पन्न कीं और दो क्रमागत प्रस्पंदों के बीच की दूरी माप कर उनका तरंगदैर्घ्य ज्ञात किया। क्योंकि तरंग की आवृत्ति (दोलित्र की आवृत्ति के समान होने के कारण) ज्ञात थी, उन्होंने सूत्र $v = \nu\lambda$ का उपयोग कर इन तरंगों की चाल ज्ञात की और पाया कि यह तरंगें भी उतनी ही चाल से चलती हैं जिससे कि प्रकाश चलता है।

इस तथ्य को कि वैद्युतचुंबकीय तरंगें ध्रुवित होती हैं किसी सुबाह्य AM रेडियो के स्टेशन के प्रति व्यवहार द्वारा सुगमता से परखा जा सकता है। यदि किसी AM रेडियो में दूरदर्शी ऐंटीना लगा है तो यह सिग्नल के विद्युतीय भाग के प्रति प्रतिक्रिया दर्शाता है। जब ऐंटीना को क्षैतिज कर देते हैं तो सिग्नल अत्यधिक घट जाता है। कुछ सुबाह्य रेडियो में क्षैतिज ऐंटीना लगे होते हैं जो वैद्युतचुंबकीय तरंगों के चुंबकीय घटक के प्रति संवेदनशील होते हैं। इस प्रकार के रेडियो के ऐंटीना को सिग्नल प्राप्त करने के लिए क्षैतिज रहना चाहिए। इन स्थितियों में सिग्नल की प्रभावी ग्राह्यता रेडियो के प्रसारण स्टेशन के सापेक्ष विन्यास पर भी निर्भर करेगी।

क्या अन्य तरंगों की तरह वैद्युतचुंबकीय तरंगें भी ऊर्जा एवं संवेग वहन करती हैं? जी हाँ, वे ऊर्जा एवं संवेग वहन करती हैं। अध्याय 2 में हमने अध्ययन किया था कि किसी मुक्त या निर्वातित क्षेत्र में यदि विद्युत क्षेत्र E विद्यमान होता है तो उस क्षेत्र में ऊर्जा घनत्व $(\varepsilon_0 E^2/2)$ होता है। इसी प्रकार चुंबकीय क्षेत्र B से संबंधित चुंबकीय ऊर्जा घनत्व $(B^2/2\mu_0)$ होता है। क्योंकि वैद्युतचुंबकीय तरंग में वैद्युत एवं चुंबकीय क्षेत्र दोनों ही होते हैं इसके साथ एक शून्येतर ऊर्जा घनत्व जुड़ा होता है। अब मान लीजिए कि वैद्युतचुंबकीय तरंग की गमन दिशा के लंबवत कोई तल है (चित्र 8.4)। यदि इस तल में कोई वैद्युत आवेश होंगे तो वे वैद्युतचुंबकीय तरंगों के विद्युत एवं चुंबकीय क्षेत्रों के कारण गति में आकर उस गत्यावस्था में बने रहेंगे। इस प्रकार वह आवेश तरंगों से ऊर्जा एवं संवेग प्राप्त करते हैं। इससे यही तथ्य स्पष्ट होता है कि (अन्य तरंगों की भाँति) वैद्युतचुंबकीय तरंगें भी ऊर्जा एवं संवेग वहन करती हैं। चूँकि यह संवेग वहन करती हैं इसलिए एक वैद्युतचुंबकीय तरंग दाब डालती है जिसे *विकिरण दाब* कहते हैं।

यदि t समय में किसी सतह पर स्थानांतरित कुल ऊर्जा U हो तो यह दर्शाया जा सकता है कि इस सतह को प्रदान किया गया कुल संवेग (यह मानते हुए कि सतह द्वारा कुल ऊर्जा अवशोषित की गई है) होगा,

$$p = \frac{U}{c} \qquad (8.12)$$

2022-23

जब तेज धूप आपके हाथ पर पड़ती है तो आप अनुभव करते हैं कि आपके हाथ द्वारा वैद्युतचुंबकीय तरंगें अवशोषित की जा रही हैं (आपका हाथ गर्म हो जाता है)। वैद्युतचुंबकीय तरंगें आपके हाथ पर संवेग भी स्थानांतरित करती हैं, पर क्योंकि c का मान अत्यधिक है, अत: स्थानांतरित संवेग का परिमाण बहुत छोटा होता है और आपको दाब का अनुभव नहीं होता। 1903 में, अमेरिकी वैज्ञानिकों निकोल्स एवं हुल ने दृश्य प्रकाश का विकिरण दाब मापने में सफलता प्राप्त की तथा समीकरण (8.12) की पुष्टि की। यह 7×10^{-6} N/m^2 की कोटि का पाया गया। इस प्रकार, 10 cm^2 क्षेत्रफल की सतह पर विकिरण के कारण बल केवल 7×10^{-9} N होता है।

वैद्युतचुंबकीय तरंगों का बड़ा प्रौद्योगिकीय महत्त्व, इनके द्वारा एक स्थान से दूसरे स्थान तक ऊर्जा वहन करने की क्षमता से ही प्रस्फुटित होता है। रेडियो एवं टीवी सिग्नलों के रूप में प्रसारण स्टेशनों से यही ऊर्जा अभिग्राहकों तक पहुँच कर उन्हें क्रियाशील बनाती है। प्रकाश के रूप में सूर्य से ऊर्जा पृथ्वी तक पहुँचती है जिसके कारण पृथ्वी पर जीवन संभव हुआ है।

उदाहरण 8.2

उदाहरण 8.2 25 MHz आवृत्ति की एक समतल वैद्युतचुंबकीय तरंग निर्वात में x-दिशा के अनुदिश गतिमान है। दिक्काल (space) में किसी विशिष्ट बिंदु पर इसका $\mathbf{E} = 6.3\ \hat{\mathbf{j}}$ V/m है। इस बिंदु पर $\mathbf{B}$ का मान क्या है?

हल $\mathbf{B}$ एवं $\mathbf{E}$ के परिमाण एक-दूसरे से निम्नलिखित समीकरण द्वारा संबंधित हैं–

$$B = \frac{E}{c}$$

$$= \frac{6.3\ \text{V/m}}{3\times10^{8}\ \text{m/s}} = 2.1\times10^{-8}\ \text{T}$$

इसकी दिशा के संबंध में हम जानते हैं कि $\mathbf{E}$ y-दिशा के अनुदिश है और तरंग x-दिशा के अनुदिश गमन कर रही है। अत: $\mathbf{B}$ x- एवं y-अक्षों दोनों के लंबवत दिशा में होना चाहिए। सदिश बीजगणित का उपयोग करने पर, $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ को x-दिशा में होना चाहिए। चूँकि $(+\hat{\mathbf{j}}) \times (+\hat{\mathbf{k}}) = \hat{\mathbf{i}}$, $\mathbf{B}$ z-दिशा के अनुदिश है।

अत: $\mathbf{B} = 2.1 \times 10^{-8}\ \hat{\mathbf{k}}$ T

उदाहरण 8.3

उदाहरण 8.3 किसी समतल वैद्युतचुंबकीय तरंग में चुंबकीय क्षेत्र $B_y = (2 \times 10^{-7})$ T sin $(0.5\times10^{3}x + 1.5\times10^{11}t)$ है

(a) तरंग की आवृत्ति तथा तरंगदैर्घ्य क्या है?

(b) विद्युत क्षेत्र के लिए व्यंजक लिखिए।

हल

(a) दिए गए समीकरण की निम्न समीकरण

$$B_y = B_0 \sin\left[2\pi\left(\frac{x}{\lambda} + \frac{t}{T}\right)\right]$$

से तुलना करने पर

$$\lambda = \frac{2\pi}{0.5\times10^{3}}\ \text{m} = 1.26\ \text{cm}$$

तथा $\frac{1}{T} = \nu = \left(1.5\times10^{11}\right)/2\pi = 23.9\ \text{GHz}$

(b) $E_0 = B_0 c = 2\times10^{-7}\ \text{T} \times 3 \times 10^{8}\ \text{m/s} = 6 \times 10^{1}\ \text{V/m}$

विद्युत क्षेत्र घटक तरंग की गमन दिशा एवं चुंबकीय क्षेत्र की दिशा के लंबवत होता है। अत:, विद्युत क्षेत्र घटक z-अक्ष के अनुदिश निम्नलिखित समीकरण द्वारा व्यक्त होगा

$E_z = 60 \sin (0.5 \times 10^{3}x + 1.5 \times 10^{11}\ t)$ V/m

© NCERT not to be republished

उदाहरण 8.4 $18\ \text{W/cm}^2$ के ऊर्जा फ्लक्स का प्रकाश किसी अपरावर्तक सतह पर अभिलंबवत आपतित होता है। यदि सतह का क्षेत्रफल $20\ \text{cm}^2$ हो तो 30 मिनट की समयावधि में सतह पर लगने वाले औसत बल का परिकलन कीजिए।

हल सतह पर पड़ने वाली कुल ऊर्जा

$$U = (18\ \text{W/cm}^2) \times (20\ \text{cm}^2) \times (30 \times 60)\ \Delta$$
$$= 6.48 \times 10^5\ \text{J}$$

इसलिए, इस सतह को प्रदत्त कुल संवेग (संपूर्ण अवशोषण के लिए):

$$p = \frac{U}{c} = \frac{6.48 \times 10^5\ \text{J}}{3 \times 10^8\ \text{m/s}} = 2.16 \times 10^{-3}\ \text{kg m/s}$$

अत: सतह पर लगा औसत बल है,

$$F = \frac{p}{t} = \frac{2.16 \times 10^{-3}}{0.18 \times 10^4} = 1.2 \times 10^{-6}\ \text{N}$$

यदि सतह पूर्ण परावर्तक होती तो आपका उत्तर क्या होता?

उदाहरण 8.4

उदाहरण 8.5 3 m की दूरी पर स्थित किसी 100 W बल्ब से आ रहे विकिरण द्वारा उत्पन्न विद्युत एवं चुंबकीय क्षेत्रों की गणना कीजिए। आप यह जानते हैं कि बल्ब की दक्षता 2.5% है और यह एक बिंदु स्रोत है।

हल बिंदु स्रोत के रूप में बल्ब सभी दिशाओं में समान रूप से प्रकाश विकिरित करता है। 3 m की दूरी पर इसको घेरने वाली गोलाकार सतह का क्षेत्रफल

$$A = 4\pi r^2 = 4\pi(3)^2 = 113\ \text{m}^2$$

अत:, इस दूरी पर प्रकाश की तीव्रता

$$I = \frac{\text{शक्ति}}{\text{क्षेत्रफल}} = \frac{100\ \text{W} \times 2.5\%}{113\ \text{m}^2}$$
$$= 0.022\ \text{W/m}^2$$

इस तीव्रता में आधा योगदान विद्युत क्षेत्र का है और आधा चुंबकीय क्षेत्र का

$$\frac{1}{2} I = \frac{1}{2}\left(\varepsilon_0 E_{rms}^2 c\right)$$
$$= \frac{1}{2}\left(0.022\ \text{W/m}^2\right)$$

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{0.022}{\left(8.85 \times 10^{-12}\right)\left(3 \times 10^8\right)}}\ \text{V/m}$$
$$= 2.9\ \text{V/m}$$

विद्युत क्षेत्र E का यह मान वर्ग माध्य मूल मान है। क्योंकि किसी प्रकाश पुंज में विद्युत क्षेत्र ज्यावक्रीय होता है। E_0 का मान है,

$$E_0 = \sqrt{2} E_{\text{rms}} = \sqrt{2} \times 2.9\ \text{V/m}$$
$$= 4.07\ \text{V/m}$$

इस प्रकार, आप देखते हैं कि वह प्रकाश जिसका उपयोग आप पढ़ने के लिए करते हैं उसका विद्युत क्षेत्र काफी शक्तिशाली है। इसकी तुलना टी.वी. अथवा FM तरंगों के विद्युत क्षेत्र की शक्ति से कीजिए जो कुछ माइक्रोवोल्ट प्रति मीटर की कोटि के होते हैं।

अब, आइए हम चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता का परिकलन करें,

उदाहरण 8.5

© NCERT not to be republished

उदाहरण 8.5

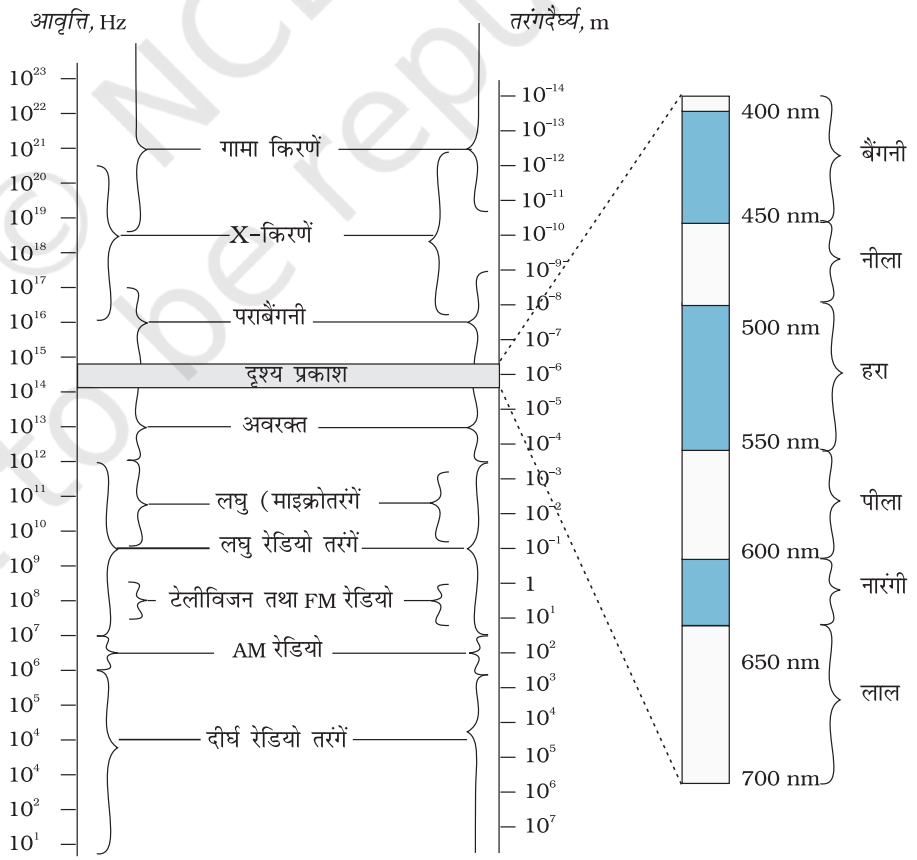
$$B_{rms} = \frac{E_{rms}}{c} = \frac{2.9 \ \text{V m}^{-1}}{3 \times 10^8 \ \text{m s}^{-1}}$$
$$= 9.6 \times 10^{-9} \ \text{T}$$

प्रकाश पुंज में क्षेत्र ज्यावक्रीय हैं, शिखर चुंबकीय क्षेत्र, $B_0 = \sqrt{2} \ B_{rms} = 1.4 \times 10^{-8}$ T। ध्यान देने योग्य बात यह है कि यद्यपि चुंबकीय क्षेत्र में ऊर्जा विद्युत क्षेत्र में ऊर्जा के बराबर है, स्पष्टत: चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता बहुत कम है।

8.4 वैद्युतचुंबकीय स्पेक्ट्रम

जिस समय मैक्सवेल ने वैद्युतचुंबकीय तरंगों संबंधी अपना सिद्धांत प्रस्तुत किया था तो दृश्य प्रकाश तरंगें ही एक मात्र सुपरिचित वैद्युतचुंबकीय (em) तरंगें थीं। पराबैगनी एवं अवरक्त तरंगों का अस्तित्व अभी मुश्किल से साबित हो पाया था। उन्नीसवीं शताब्दी के अंत तक X- किरणें एवं गामा किरणें भी खोज ली गई थीं। अब हम जानते हैं कि दृश्य प्रकाश तरंगें, X- किरणें, गामा किरणें, रेडियो तरंगें, सूक्ष्म (माइक्रो) तरंगें, पराबैंगनी एवं अवरक्त तरंगें ये सभी em तरंगें हैं। तरंगों का आवृत्ति के क्रम में वर्गीकरण (चित्र 8.5) *वैद्युतचुंबकीय स्पेक्ट्रम* कहलाता है। *एक प्रकार की तरंग और उसके निकटवर्ती दूसरे प्रकार की तरंग के बीच कोई स्पष्ट विभाजन रेखा नहीं है।* वर्गीकरण मोटे तौर पर इस बात पर आधारित है कि तरंगें किस प्रकार उत्पन्न एवं/अथवा संसूचित की जाती हैं।

अब हम वैद्युतचुंबकीय तरंगों के इन विभिन्न प्रकारों का उनकी घटती हुई तरंगदैर्घ्यों के क्रम में वर्णन करेंगे।



चित्र 8.5 वैद्युतचुंबकीय स्पेक्ट्रम जिसके विभिन्न भागों के सामान्य नाम दर्शाए गए हैं। विभिन्न भागों के बीच कोई स्पष्ट विभाजन रेखा नहीं है।

वैद्युतचुंबकीय स्पेक्ट्रम
http://www.fnal.gov/pub/inquiring/more/light
http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/
भौतिकी

© NCERT not to be republished

हम इन विभिन्न प्रकार की वैद्युतचुंबकीय तरंगों का अवरोही तरंगदैर्घ्य के क्रम में, संक्षेप में वर्णन कर रहे हैं।

8.4.1 रेडियो तरंगें

रेडियो तरंगें चालक तारों में आवेशों की त्वरित गति से उत्पन्न होती हैं। इनका उपयोग रेडियो एवं दूरदर्शन की संचार प्रणालियों में किया जाता है। इनका आवृत्ति परास सामान्यत: 500 kHz से लगभग 1000 MHz के बीच होता है। AM (आयाम मॉड्यूलित) बैंड 530 kHz से 1710 kHz के बीच होता है। इससे उच्चतर 54 MHz तक की आवृत्तियाँ लघुतरंग बैंडों के रूप में उपयोग की जाती हैं। टी.वी. तरंगों का परास 54 MHz से 890 MHz के बीच होता है। FM (आवृत्ति मॉड्यूलित) रेडियो बैंड 88 MHz से 108 MHz के बीच फैला होता है। सेल्यूलर फोनों में अत्युच्च आवृत्ति (UHF) बैंड की रेडियो तरंगों का उपयोग करके ध्वनि संदेशों के आदान-प्रदान की व्यवस्था की जाती है। ये तरंगें किस प्रकार प्रसारित एवं अभिगृहित की जाती है, इसका वर्णन अध्याय 15 में किया गया है।

8.4.2 सूक्ष्म तरंगें

सूक्ष्म तरंगों (लघु तरंगदैर्घ्य की रेडियो तरंगें) की आवृत्तियाँ गिगा हर्ट्ज़ (GHz) के परास में होती हैं ये विशेष प्रकार की निर्वात नलिकाओं (vacuum tubes) जिन्हें क्लाइस्ट्रॉन, मेगनेट्रॉन अथवा गन डायोड कहते हैं, द्वारा उत्पन्न होती हैं। अपने लघु तरंगदैर्घ्य के कारण विमान संचालन में रडार प्रणाली के लिए उपयुक्त हैं। रडार, तेज गेदों जैसे कि टेनिस में सर्व की गई गेंदों या वाहनों की गति ज्ञात करने के लिए उपयोग में लाए जाने वाले यंत्र, चाल-गनों (speed guns), गनों की कार्य प्रणाली का भी आधार हैं। माइक्रोवेव ऑवन इन तरंगों का एक रोचक घरेलू अनुप्रयोग है। इन ऑवनों में सूक्ष्म तरंगों की आवृत्ति इस प्रकार चुनी जाती है कि वे जल के अणुओं की अनुनाद आवृत्ति से मेल खा सकें, ताकि तरंगों की ऊर्जा प्रभावी रूप से अणुओं की गतिज ऊर्जा बढ़ाने के लिए स्थानांतरित की जा सके। इससे किसी भी जलयुक्त खाद्य पदार्थ का ताप बढ़ जाता है।



माइक्रोवेव ऑवन

वैद्युतचुंबकीय विकिरणों के स्पेक्ट्रम का एक भाग *सूक्ष्म तरंग* कहलाता है। इन तरंगों की आवृत्ति एवं ऊर्जा दृश्य प्रकाश से कम एवं तरंगदैर्घ्य इससे अधिक होती है। माइक्रोवेव ऑवन का सिद्धांत क्या है, और यह कैसे कार्य करता है?

हमारा उद्देश्य भोजन को पकाना या इसे गर्म करने का होता है। सभी भोज्य वस्तुओं; जैसे - फलों, सब्जियों, मांस, अनाज इत्यादि का एक अवयव जल भी होता है। जब हम कहते हैं कि कोई पिंड गर्म हो गया है तो इससे हमारा क्या आशय होता है? जब किसी वस्तु का ताप बढ़ता है तो इसके परमाणुओं एवं अणुओं की यादृच्छिक गति की ऊर्जा बढ़ जाती है और वे अधिक ऊर्जा से चलने, दोलन करने या घूर्णन करने लगते हैं। जल के अणुओं के घूर्णन की आवृत्ति लगभग 2.45 गिगा हर्ट्ज़ (GHz) है। यदि जल को इस आवृत्ति की सूक्ष्म तरंगें मिल जाएँ तो उसके अणु इन विकिरणों को अवशोषित कर लेंगे जो जल को गर्म करने के तुल्य ही हैं। ये अणु इस ऊर्जा को निकटवर्ती भोजन-अणुओं के साथ बाँट लेते हैं और इस प्रकार भोजन गर्म हो जाता है।

माइक्रोवेव ऑवन में आपको चीनी मिट्टी के बर्तनों का उपयोग करना चाहिए, धातु के बर्तनों का नहीं अन्यथा संचित विद्युत आवेशों के कारण आपको झटका लग सकता है। धातुएँ अत्यधिक ऊष्मा के कारण पिघल भी सकती हैं। चीनी मिट्टी का पात्र अप्रभावित और ठंडा बना रहता है। क्योंकि इसके विशाल अणु अपेक्षाकृत बहुत कम आवृत्ति से घूर्णन एवं कंपन करते हैं और इस कारण सूक्ष्म तरंगों को अवशोषित नहीं कर पाते। अत: वे गर्म नहीं होते।

इस प्रकार, माइक्रोवेव ऑवन का मूल सिद्धांत यह है कि इसके जिस स्थान पर हम भोजन रखते हैं वहाँ उपयुक्त आवृत्ति की सूक्ष्म तरंगें उत्पन्न की जाएँ। इस प्रकार बर्तन को गर्म करने में ऊर्जा व्यर्थ नहीं होती। पारंपरिक विधि में पहले बर्नर पर रखा हुआ पात्र गर्म होता है, फिर इससे ऊर्जा पात्र में रखे भोजन को स्थानांतरित होती है, जबकि माइक्रोवेव ऑवन ऊर्जा सीधे जल के अणुओं को और उनसे संपूर्ण भोजन को प्राप्त होती है।

2022-23

8.4.3 अवरक्त तरंगें

अवरक्त तरंगें (Infrared Waves) गर्म पिंडों एवं अणुओं से उत्पन्न होती हैं। यह बैंड दृश्य स्पेक्ट्रम के निम्न आवृत्ति या दीर्घ तरंगदैर्घ्य सिरे से संलग्नित होता है। अवरक्त तरंगों को कभी-कभी *ऊष्मा तरंगें* भी कहा जाता है। ऐसा इसलिए है क्योंकि अधिकांश पदार्थों में विद्यमान जल के अणु अवरक्त तरंगों को तुरंत अवशोषित कर लेते हैं (कई अन्य अणु, जैसे, CO_2, NH_3, आदि भी अवरक्त तरंगों को अवशोषित कर लेते हैं।) अवशोषण के पश्चात उनकी तापीय गति बढ़ जाती है, अर्थात वे गर्म हो जाते हैं और अपने परिवेश को गर्म करने लगते हैं। अवरक्त लैम्पों का उपयोग कायचिकित्सा में किया जाता है। अवरक्त विकिरण की पृथ्वी की गर्मी अर्थात माध्य ताप बनाए रखने में भी हरित गृह प्रभाव के द्वारा एक अहम भूमिका है। पृथ्वी पर आने वाला दृश्य प्रकाश (जो अपेक्षाकृत सरलतापूर्वक वायुमंडल से गुजर जाता है, पृथ्वी के पृष्ठ द्वारा अवशोषित हो जाता है और दीर्घ तरंगदैर्घ्य की अवरक्त तरंगों के रूप में पुनर्विकिरित हो जाता है। यह विकिरण, कार्बन डाइऑक्साइड एवं जल वाष्प जैसे हरित गृह प्रभावकारी गैसों के द्वारा वायुमंडल में रोक लिया जाता है। उपग्रहों में लगे अवरक्त संसूचकों का उपयोग सैनिक उद्देश्यों एवं फसलों की वृद्धि का प्रेक्षण करने के लिए किया जाता है। इलैक्ट्रॉनिक युक्तियाँ (उदाहरण के लिए प्रकाश उत्सर्जक डायोड) भी अवरक्त तरंगें उत्सर्जित करती हैं और घरेलू इलैक्ट्रॉनिक प्रणालियों जैसे टी.वी. सैट, वीडियो रिकॉर्डर एवं हाई-फाई प्रणालियों के रिमोट नियंत्रकों में ये बहुलता से प्रयोग की जाती हैं।

8.4.4 दृश्य प्रकाश तरंगें

यह वैद्युतचुंबकीय तरंगों का सर्वाधिक सुपरिचित रूप है। यह उस स्पेक्ट्रम का भाग है जिसके लिए मानवीय नेत्र संवेदनशील होते हैं। इसका आवृत्ति परास लगभग 4×10^{14} हर्ट्ज़ से 7×10^{14} हर्ट्ज़ या तरंगदैर्घ्य परास लगभग 700 – 400 nm होता है। हमारे चारों ओर की वस्तुओं से उत्सर्जित या परावर्तित होने वाला दृश्य प्रकाश जगत के विषय में सभी सूचनाएँ हमें उपलब्ध कराता है। हमारे नेत्र तरंगदैर्घ्यों के इस परास के लिए संवेदनशील हैं। विभिन्न जंतु तरंगदैर्घ्यों के विभिन्न परासों के लिए संवेदनशील हैं। उदाहरणार्थ, सर्प अवरक्त तरंगों को संसूचित कर सकते हैं। कई कीटों का दृश्य परास पराबैंगनी तरंगों तक पहुँचता है।

8.4.5 पराबैंगनी तरंगें

इसमें लगभग 4×10^{-7} m (400 nm) से 6×10^{-10}m (0.6 nm) तरंगदैर्घ्य परास की तरंगें सम्मिलित हैं। पराबैंगनी (UV) विकिरण विशिष्ट लैंपों एवं बहुत गर्म पिंडों से उत्पन्न होते हैं। सूर्य पराबैंगनी प्रकाश का एक महत्वपूर्ण स्रोत है। परंतु, सौभाग्य से इसका अधिकांश भाग वायुमंडल की लगभग 40 – 50 km की ऊँचाई पर स्थित ओजोन परत में अवशोषित हो जाता है। अधिक परिमाण में UV प्रकाश के संपर्क में आने का मानवों पर हानिकारक प्रभाव होता है। UV विकिरणों के पड़ने से त्वचा में अधिक मेलानिन का उत्पादन होता है जिससे त्वचा ताम्र रंग की हो जाती है। UV विकिरण सामान्य काँच द्वारा अवशोषित हो जाते हैं। अत: काँच लगी खिड़कियों से छन कर आने वाले प्रकाश के कारण धूप-ताम्रता (sunburn) नहीं होती है।

वेल्डिंग करने वाले लोग, वेल्डिंग चिनगारियों से निकलने वाली UV किरणों से अपनी आँखों की सुरक्षा के लिए विशिष्ट काँच युक्त धूप के चश्मे पहनते हैं या काँच की खिड़कियों से युक्त मुखौटे अपने चेहरे पर लगाते हैं। अपनी छोटी तरंगदैर्घ्यों के कारण, पराबैंगनी किरणों को अति परिशुद्ध अनुप्रयोगों, जैसे लासिक (LASIK – Laser-assisted in situ keratomileusis) नेत्र शल्यता में उपयोग हेतु अत्यंत संकीर्ण किरण-पुंजों में फ़ोकसित किया जा सकता है। जल शोधक में पराबैंगनी (UV) लैंपों का उपयोग जीवाणुओं को मारने में होता है।

चूँकि ओजोन परत एक संरक्षक की भूमिका अदा करती है इसलिए क्लोरोफ्लोरो-कार्बन (CFCs) गैसों (जैसे फ्रीऑन) द्वारा इसका ह्रास अंतर्राष्ट्रीय स्तर पर चिंता का विषय है।

© NCERT not to be republished

8.4.6 X-किरणें

वैद्युतचुंबकीय स्पेक्ट्रम के UV भाग के पश्चात X-किरणों का क्षेत्र है। चिकित्सीय उपयोगिता के कारण हम X-किरणों से परिचित हैं। इसका परास तरंगदैर्घ्य 10^{-8} m (10 nm) से लेकर नीचे 10^{-13} m (10^{-4}nm) तक फैला है। X-किरणों के उत्पादन की एक सामान्य विधि किसी धात्वीय लक्ष्य पर उच्च ऊर्जा के इलेक्ट्रॉनों की बौछार करना है। चिकित्सा में X-किरणों को नैदानिक साधन के रूप में तथा कुछ प्रकार के कैंसर के उपचार के लिए उपयोग में लाते हैं। चूँकि X-किरणें सजीव ऊतकों तथा जीवों को हानि पहुँचाती हैं या नष्ट कर देती हैं इसलिए इनसे अनावश्यक अथवा अधिक उद्भासन (exposure) से बचने की सावधानी बरतनी चाहिए।

8.4.7 गामा किरणें

ये वैद्युतचुंबकीय स्पेक्ट्रम के ऊपरी आवृत्ति के क्षेत्र में होती हैं तथा इनकी तरंगदैर्घ्य लगभग 10^{-10} m से लेकर 10^{-14} m से भी कम होती है। उच्च आवृत्ति का यह विकिरण नाभिकीय अभिक्रियाओं में उत्पन्न होता है। यह रेडियोधर्मी नाभिकों द्वारा भी उत्सर्जित होता है। ये चिकित्सा में कैंसर कोशिकाओं को नष्ट करने के लिए भी उपयोगी हैं।

सारणी 8.1 में विभिन्न प्रकार की वैद्युतचुंबकीय तरंगों, उनके उत्पादन एवं संसूचन को सार रूप में प्रस्तुत किया गया है। जैसा कि पहले बताया गया है, विभिन्न किरणों के क्षेत्रों के मध्य कोई तीक्ष्ण सीमाएँ नहीं हैं तथा ये दूसरे क्षेत्रों में भी व्यापित होते हैं।

सारणी 8.1 विभिन्न वैद्युतचुंबकीय तरंगों के अभिलक्षण

प्रकार	तरंगदैर्घ्य का परास	उत्पादन	संसूचन
रेडियो तरंगें	> 0.1 m	एरियल (aerial) में इलेक्ट्रॉनों का द्रुत त्वरण या मंदन	अभिग्राहक के एरियल
सूक्ष्म तरंगें	0.1m से 1 mm	क्लेस्ट्रॉन या मेग्नाट्रॉन वाल्व	बिंदु संपर्क डायोड
अवरक्त तरंगें	1mm से 700 nm	परमाणुओं एवं अणुओं के कंपन	थर्मोपाइल, बोलोमीटर, अवरक्त फोटोग्राफिक फिल्म
प्रकाश तरंगें	700 nm से 400 nm	परमाणु में इलेक्ट्रॉन, जब उच्चतर ऊर्जा स्तर से निम्नतर ऊर्जा स्तर पर संक्रमण करते हैं	मानवीय नेत्र, फोटो सेल, फोटोग्राफिक फिल्म
पराबैंगनी प्रकाश तरंगें	400 nm से 1 nm	परमाणु के आंतरिक शैलों में इलेक्ट्रॉनों का एक ऊर्जा स्तर से दूसरे ऊर्जा स्तर पर संक्रमण	फोटो सेल फोटोग्राफिक फिल्म
X-किरणें	1nm से 10^{-3} nm	X-किरण नलिका अथवा आंतरिक शैलों के इलेक्ट्रॉन	फोटोग्राफिक फिल्म, गीगर ट्यूब, आयनीकरण प्रकोष्ठ
गामा किरणें	$<10^{-3}$ nm	नाभिकों का रेडियोऐक्टिव क्षय	फोटोग्राफिक फिल्म, गीगर ट्यूब, आयनीकरण प्रकोष्ठ

© NCERT not to be republished

सारांश

1. मैक्सवेल ने ऐम्पियर के नियम में एक विसंगति पाई तथा इस विसंगति को दूर करने के लिए एक अतिरिक्त धारा के अस्तित्व का सुझाव दिया जिसे विस्थापन धारा कहते हैं। विस्थापन धारा समय के साथ परिवर्तित होने वाले विद्युत क्षेत्र के कारण उत्पन्न होती है और इसको इस प्रकार लिख सकते हैं

$$i_d = \varepsilon_0 \frac{\mathrm{d}\Phi_E}{\mathrm{d}t}$$

यह ठीक उसी प्रकार चुंबकीय क्षेत्र के स्रोत का कार्य करती है जैसे कि चालन धारा।

2. एक त्वरित आवेश वैद्युतचुंबकीय तरंगें उत्पन्न करता है। आवर्ती रूप से, ν आवृत्ति से दोलन करता एक विद्युत आवेश उसी आवृत्ति ν की वैद्युतचुंबकीय तरंगों को उत्पन्न करता है। एक वैद्युत द्विध्रुव वैद्युतचुंबकीय तरंगों का मौलिक स्रोत है।
3. कुछ मीटर कोटि तरंगदैर्घ्य वाली वैद्युतचुंबकीय तरंगें प्रयोगशाला में सबसे पहले 1887 में हर्ट्ज़ द्वारा उत्पन्न व संसूचित की गईं। इस प्रकार उन्होंने मैक्सवेल की मौलिक भविष्यवाणी की पुष्टि की।
4. किसी वैद्युतचुंबकीय तरंग में विद्युत तथा चुंबकीय क्षेत्र, दिक्काल में ज्यावक्रीय ढंग से दोलन करते हैं। दोलनशील विद्युत व चुंबकीय क्षेत्र **E** तथा **B** परस्पर तथा वैद्युतचुंबकीय तरंग के संचरण की दिशा के लंबवत होते हैं। z-अक्ष के अनुदिश संचरित आवृत्ति ν तथा तरंगदैर्घ्य λ की किसी तरंग के लिए हमें निम्नलिखित सूत्र उपलब्ध है :

$$E = E_x(t) = E_0 \sin(kz - \omega t)$$

$$= E_0 \sin\left[2\pi\left(\frac{z}{\lambda} - \nu t\right)\right] = E_0 \sin\left[2\pi\left(\frac{z}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)\right]$$

$$B = B_y(t) = B_0 \sin(kz - \omega t)$$

$$= B_0 \sin\left[2\pi\left(\frac{z}{\lambda} - \nu t\right)\right] = B_0 \sin\left[2\pi\left(\frac{z}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)\right]$$

ये परस्पर निम्नलिखित सूत्र द्वारा संबंधित हैं : $E_0/B_0 = c$

5. निर्वात में वैद्युतचुंबकीय तरंग की चाल c, μ_0 तथा ε_0 (चुंबकशीलता तथा विद्युतशीलता) से इस प्रकार संबंधित हैं : $c = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$ । c का मान प्रकाशीय मापों द्वारा प्राप्त प्रकाश की चाल के बराबर होता है।

प्रकाश एक वैद्युतचुंबकीय तरंग है इसलिए c प्रकाश की भी चाल है। प्रकाश के अतिरिक्त सभी वैद्युतचुंबकीय तरंगों की मुक्त आकाश में वही चाल c है।

प्रकाश या वैद्युतचुंबकीय तरंगों की किसी भौतिक माध्यम में चाल $v = 1/\sqrt{\mu\varepsilon}$ होती है। यहाँ μ माध्यम की चुंबकशीलता तथा ε विद्युतशीलता है।

6. वैद्युतचुंबकीय तरंगें जब दिक्स्थान (space) में संचरित होती हैं तो अपने साथ ऊर्जा वहन करती हैं तथा यह ऊर्जा विद्युत तथा चुंबकीय क्षेत्र में विभाजित होती है।

वैद्युतचुंबकीय तरंगें संवेग का भी वहन करती हैं। जब ये तरंगें किसी पृष्ठ पर पड़ती हैं तो वे पृष्ठ पर दाब डालती हैं। यदि t समय में पृष्ठ को स्थानांतरित संपूर्ण ऊर्जा U हो तो पृष्ठ को दिया गया कुल संवेग $p = U/c$ होगा।

7. वैद्युतचुंबकीय तरंगों का स्पेक्ट्रम सिद्धांततः तरंगों के अनंत परिसर में विस्तृत होता है। 10^{-2} Å या 10^{-12} m से 10^{6} m तक तरंगदैर्घ्य के बढ़ते हुए क्रम में समायोजित करने पर विभिन्न

© NCERT not to be republished

भाग अलग-अलग नाम से इस प्रकार जाने जाते हैं, γ-किरणें, X-किरणें, पराबैंगनी किरणें, दृश्य प्रकाश, अवरक्त प्रकाश, सूक्ष्म तरंगें तथा रेडियो तरंगें।
ये द्रव्य से विद्युत तथा चुंबकीय क्षेत्रों के द्वारा पारस्परिक क्रिया करती हैं जिससे सभी द्रव्यों में विद्यमान आवेश दोलन प्रारंभ कर देते हैं। विस्तृत पारस्परिक क्रिया तथा इस प्रकार अवशोषण, प्रकीर्णन आदि की क्रिया विधि em तरंग की तरंगदैर्घ्य तथा माध्यम के परमाणु एवं अणुओं की प्रकृति पर निर्भर करती है।

विचारणीय विषय

1. विभिन्न प्रकार की वैद्युतचुंबकीय तरंगों का मौलिक अंतर उनकी तरंगदैर्घ्यों अथवा आवृत्तियों में निहित है क्योंकि ये सभी निर्वात में एक ही चाल से गुजरती हैं। परिणामस्वरूप, तरंगें पदार्थ से अपनी पारस्परिक क्रिया करने की विधि में बहुत भिन्न हैं।
2. त्वरित आवेशित कण वैद्युतचुंबकीय ऊर्जा विकिरित करते हैं। वैद्युतचुंबकीय तरंग की तरंगदैर्घ्य प्राय: तरंग विकीर्णक निकाय के आमाप (साइज़) पर निर्भर करती है। इस प्रकार से γ-किरण जिसकी तरंगदैर्घ्य 10^{-14} m से 10^{-15} m के मध्य है, विशिष्ट रूप से परमाणु-नाभिक से उत्पन्न होती है। X-किरणें भारी परमाणुओं से उत्सर्जित होती हैं। किसी परिपथ में त्वरित इलेक्ट्रॉनों से रेडियो तरंगें उत्पन्न होती हैं। एक संप्रेषक ऐंटीना अति दक्षतापूर्वक उन तरंगों को विकिरित कर सकता है जिनकी तरंगदैर्घ्य उसी परिमाण की हैं, जिस परिमाण का ऐंटीना है तथापि परमाणुओं द्वारा उत्सर्जित दृश्य विकिरण की तरंगदैर्घ्य परमाणु के आकार से काफी अधिक होती है।
3. वैद्युतचुंबकीय तरंग का दोलनशील क्षेत्र आवेशों को त्वरित कर सकता है तथा यह दोलनशील धारा उत्पन्न कर सकता है। इसलिए वैद्युतचुंबकीय तरंगों का पता लगाने के लिए जो उपकरण निर्मित होता है वह इसी तथ्य पर आधारित है। हर्ट्ज़ का मौलिक 'अभिग्राही' ठीक इसी प्रकार काम करता था। सभी आधुनिक व्यावहारिक युक्तियों में इसी मूल सिद्धांत का उपयोग होता है। उच्च आवृत्ति की वैद्युतचुंबकीय तरंगों का पता दूसरी विधि से लगाते हैं जो उन भौतिक प्रभावों पर आधारित हैं, जिन्हें वे द्रव्य के साथ परस्पर क्रिया द्वारा उत्पन्न करते हैं।
4. अवरक्त तरंगें जिनकी आवृत्ति दृश्य प्रकाश से कम होती है, न केवल इलेक्ट्रॉनों को कंपित करती हैं वरन् पदार्थ के सभी परमाणुओं अथवा अणुओं को भी कंपित करती हैं। यह कंपन आंतरिक ऊर्जा को बढ़ाता है तथा परिणामस्वरूप ताप को भी। यही कारण है कि अवरक्त तरंगों को प्राय: *ऊष्मता तरंगें* कहते हैं।
5. हमारी आँख की संवेदनशीलता का केंद्र सूर्य के तरंगदैर्घ्य वितरण के केंद्र पर पड़ता है। ऐसा इसलिए हुआ है क्योंकि मानव इस प्रकार विकसित हुआ है कि उसकी दृष्टि उन तरंगदैर्घ्यों के प्रति सबसे अधिक संवेदनशील है जो सूर्य के विकिरणों में सर्वाधिक प्रबल हैं।

अभ्यास

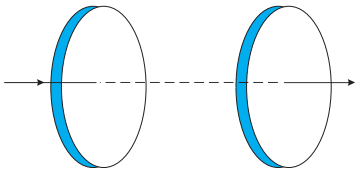
8.1 चित्र 8.6 में एक संधारित्र दर्शाया गया है जो 12 cm त्रिज्या की दो वृत्ताकार प्लेटों को 5.0 cm की दूरी पर रखकर बनाया गया है। संधारित्र को एक बाह्य स्रोत (जो चित्र में नहीं दर्शाया गया है) द्वारा आवेशित किया जा रहा है। आवेशकारी धारा नियत है और इसका मान 0.15A है।

(a) धारिता एवं प्लेटों के बीच विभवांतर परिवर्तन की दर का परिकलन कीजिए।

(b) प्लेटों के बीच विस्थापन धारा ज्ञात कीजिए।

2022-23

(c) क्या किरखोफ का प्रथम नियम संधारित्र की प्रत्येक प्लेट पर लागू होता है? स्पष्ट कीजिए।



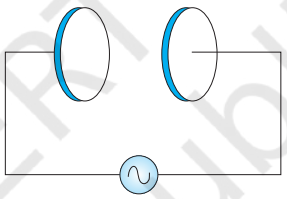
चित्र 8.6

8.2 एक समांतर प्लेट संधारित्र (चित्र 8.7), $R = 6.0$ cm त्रिज्या की दो वृत्ताकार प्लेटों से बना है और इसकी धारिता $C = 100$ pF है। संधारित्र को 230 V, 300 rad s^{-1} की (कोणीय) आवृत्ति के किसी स्रोत से जोड़ा गया है।

(a) चालन धारा का rms मान क्या है?

(b) क्या चालन धारा विस्थापन धारा के बराबर है?

(c) प्लेटों के बीच, अक्ष से 3.0 cm की दूरी पर स्थित बिंदु पर **B** का आयाम ज्ञात कीजिए।



चित्र 8.7

8.3 10^{-10} m तरंगदैर्घ्य की X-किरणों, 6800 Å तरंगदैर्घ्य के प्रकाश, तथा 500 m की रेडियो तरंगों के लिए किस भौतिक राशि का मान समान है?

8.4 एक समतल वैद्युतचुंबकीय तरंग निर्वात में z-अक्ष के अनुदिश चल रही है। इसके विद्युत तथा चुंबकीय क्षेत्रों के सदिश की दिशा के बारे में आप क्या कहेंगे? यदि तरंग की आवृत्ति 30 MHz हो तो उसकी तरंगदैर्घ्य कितनी होगी?

8.5 एक रेडियो 7.5 MHz से 12 MHz बैंड के किसी स्टेशन से समस्वरित हो सकता है। संगत तरंगदैर्घ्य बैंड क्या होगा?

8.6 एक आवेशित कण अपनी माध्य साम्यावस्था के दोनों ओर 10^9 Hz आवृत्ति से दोलन करता है। दोलक द्वारा जनित वैद्युतचुंबकीय तरंगों की आवृत्ति कितनी है?

8.7 निर्वात में एक आवर्त वैद्युतचुंबकीय तरंग के चुंबकीय क्षेत्र वाले भाग का आयाम $B_0 = 510$ nT है। तरंग के विद्युत क्षेत्र वाले भाग का आयाम क्या है?

8.8 कल्पना कीजिए कि एक वैद्युतचुंबकीय तरंग के विद्युत क्षेत्र का आयाम $E_0 = 120$ N/C है तथा इसकी आवृत्ति $\nu = 50.0$ MHz है। (a) B_0, ω, k तथा λ ज्ञात कीजिए, (b) **E** तथा **B** के लिए व्यंजक प्राप्त कीजिए।

8.9 वैद्युतचुंबकीय स्पेक्ट्रम के विभिन्न भागों की पारिभाषिकी पाठ्यपुस्तक में दी गई है। सूत्र $E = h\nu$ (विकिरण के एक क्वांटम की ऊर्जा के लिए : फोटॉन) का उपयोग कीजिए तथा em वर्णक्रम के विभिन्न भागों के लिए eV के मात्रक में फोटॉन की ऊर्जा निकालिए। फोटॉन ऊर्जा के जो विभिन्न परिमाण आप पाते हैं वे वैद्युतचुंबकीय विकिरण के स्रोतों से किस प्रकार संबंधित हैं?

8.10 एक समतल em तरंग में विद्युत क्षेत्र, 2.0×10^{10} Hz आवृत्ति तथा 48 V m^{-1} आयाम से ज्यावक्रीय रूप से दोलन करता है।

© NCERT not to be republished

(a) तरंग की तरंगदैर्घ्य कितनी है?
(b) दोलनशील चुंबकीय क्षेत्र का आयाम क्या है?
(c) यह दर्शाइए कि **E** क्षेत्र का औसत ऊर्जा घनत्व, **B** क्षेत्र के औसत ऊर्जा घनत्व के बराबर है। [$c = 3 \times 10^8$ m s^{-1}]

अतिरिक्त अभ्यास

8.11 कल्पना कीजिए कि निर्वात में एक वैद्युतचुंबकीय तरंग का विद्युत क्षेत्र
$\mathbf{E} = \{(3.1 \text{ N/C}) \cos [(1.8 \text{ rad/m}) y + (5.4 \times 10^6 \text{ rad/s}) t]\} \hat{\mathbf{i}}$ है।
(a) तरंग संचरण की दिशा क्या है?
(b) तरंगदैर्घ्य λ कितनी है?
(c) आवृत्ति ν कितनी है?
(d) तरंग के चुंबकीय क्षेत्र सदिश का आयाम कितना है?
(e) तरंग के चुंबकीय क्षेत्र के लिए व्यंजक लिखिए।

8.12 100 W विद्युत बल्ब की शक्ति का लगभग 5% दृश्य विकिरण में बदल जाता है।
(a) बल्ब से 1 m की दूरी पर,
(b) 10 m की दूरी पर दृश्य विकिरण की औसत तीव्रता कितनी है?
यह मानिए कि विकिरण समदैशिकत: उत्सर्जित होता है और परावर्तन की उपेक्षा कीजिए।

8.13 em वर्णक्रम के विभिन्न भागों के लिए लाक्षणिक ताप परिसरों को ज्ञात करने के लिए $\lambda_m T = 0.29$ cm K सूत्र का उपयोग कीजिए। जो संख्याएँ आपको मिलती हैं वे क्या बतलाती हैं?

8.14 वैद्युतचुंबकीय विकिरण से संबंधित नीचे कुछ प्रसिद्ध अंक, भौतिकी में किसी अन्य प्रसंग में वैद्युतचुंबकीय दिए गए हैं। स्पेक्ट्रम के उस भाग का उल्लेख कीजिए जिससे इनमें से प्रत्येक संबंधित है।
(a) 21 cm (अंतरातारकीय आकाश में परमाण्वीय हाइड्रोजन द्वारा उत्सर्जित तरंगदैर्घ्य)
(b) 1057 MHz (लैंब-विचलन नाम से प्रसिद्ध, हाइड्रोजन में, पास जाने वाले दो समीपस्थ ऊर्जा स्तरों से उत्पन्न विकिरण की आवृत्ति)
(c) 2.7 K [संपूर्ण अंतरिक्ष को भरने वाले समदैशिक विकिरण से संबंधित ताप–ऐसा विचार जो विश्व में बड़े धमाके 'बिग बैंग' के उद्भव का अवशेष माना जाता है]।
(d) 5890 Å - 5896 Å (सोडियम की द्विक रेखाएँ)
(e) 14.4 keV [^{57}Fe नाभिक के एक विशिष्ट संक्रमण की ऊर्जा जो प्रसिद्ध उच्च विभेदन की स्पेक्ट्रमी विधि से संबंधित है (मॉसबौर स्पेक्ट्रोस्कॉपी)]।

8.15 निम्नलिखित प्रश्नों का उत्तर दीजिए :
(a) लंबी दूरी के रेडियो प्रेषित्र लघु-तरंग बैंड का उपयोग करते हैं। क्यों?
(b) लंबी दूरी के TV प्रेषण के लिए उपग्रहों का उपयोग आवश्यक है। क्यों?
(c) प्रकाशीय तथा रेडियो दूरदर्शी पृथ्वी पर निर्मित किए जाते हैं किंतु X-किरण खगोलविज्ञान का अध्ययन पृथ्वी का परिभ्रमण कर रहे उपग्रहों द्वारा ही संभव है। क्यों?
(d) समतापमंडल के ऊपरी छोर पर छोटी-सी ओज़ोन की परत मानव जीवन के लिए निर्णायक है। क्यों?
(e) यदि पृथ्वी पर वायुमंडल नहीं होता तो उसके धरातल का औसत ताप वर्तमान ताप से अधिक होता या कम?
(f) कुछ वैज्ञानिकों ने भविष्यवाणी की है कि पृथ्वी पर नाभिकीय विश्व युद्ध के बाद 'प्रचंड नाभिकीय शीतकाल' होगा जिसका पृथ्वी के जीवों पर विध्वंसकारी प्रभाव पड़ेगा। इस भविष्यवाणी का क्या आधार होगा?

© NCERT not to be republished

भौतिकी

भाग 1

कक्षा 12 के लिए पाठ्यपुस्तक

© NCERT not to be republished



12091

राष्ट्रीय शैक्षिक अनुसंधान और प्रशिक्षण परिषद्
NATIONAL COUNCIL OF EDUCATIONAL RESEARCH AND TRAINING

2022-23

ISBN 81-7450-725-6

प्रथम संस्करण
अप्रैल 2007 चैत्र 1929

पुनर्मुद्रण
नवंबर 2007 कार्तिक 1929
फ़रवरी 2009 फाल्गुन 1930
जनवरी 2010 माघ 1931
जनवरी 2011 माघ 1932
जनवरी 2012 माघ 1933
दिसंबर 2012 अग्रहायण 1934
दिसंबर 2013 अग्रहायण 1935
जनवरी 2015 माघ 1936
दिसंबर 2015 पौष 1937
फ़रवरी 2017 माघ 1938
दिसंबर 2017 अग्रहायण 1939
फ़रवरी 2019 फाल्गुन 1940
जनवरी 2020 पौष 1941
जनवरी 2021 पौष 1942

PD 23T RPS

© राष्ट्रीय शैक्षिक अनुसंधान और प्रशिक्षण परिषद्, 2007

₹ ???.00

एन.सी.ई.आर.टी. वाटरमार्क 80 जी.एस.एम. पेपर पर मुद्रित।

प्रकाशन प्रभाग में सचिव, राष्ट्रीय शैक्षिक अनुसंधान और प्रशिक्षण परिषद्, श्री अरविंद मार्ग, नयी दिल्ली 110 016 द्वारा प्रकाशित तथा .....
..... द्वारा मुद्रित।

सर्वाधिकार सुरक्षित

- प्रकाशक की पूर्व अनुमति के बिना इस प्रकाशन के किसी भाग को छापना तथा इलेक्ट्रॉनिकी, मशीनी,फोटोप्रतिलिपि, रिकॉर्डिंग अथवा किसी अन्य विधि से पुनः प्रयोग पद्धति द्वारा उसका संग्रहण अथवा प्रसारण वर्जित है।
- इस पुस्तक की बिक्री इस शर्त के साथ की गई है कि प्रकाशक की पूर्व अनुमति के बिना यह पुस्तक अपने मूल आवरण अथवा जिल्द के अलावा किसी अन्य प्रकार से व्यापार द्वारा उधारी पर, पुनर्विक्रय या किराए पर न दी जाएगी, न बेची जाएगी।
- इस प्रकाशन का सही मूल्य इस पृष्ठ पर मुद्रित है। रबड़ की मुहर अथवा चिपकाई गई पर्ची (स्टिकर) या किसी अन्य विधि द्वारा अंकित कोई भी संशोधित मूल्य गलत है तथा मान्य नहीं होगा।

एन सी ई आर टी के प्रकाशन प्रभाग के कार्यालय

एन.सी.ई.आर.टी. कैंपस
श्री अरविंद मार्ग
नयी दिल्ली 110 016 फोन : 011-26562708

108, 100 फीट रोड
हेली एक्सटेंशन, होस्डेकेरे
बनाशंकरी III स्टेज
बेंगलुरु 560 085 फोन : 080-26725740

नवजीवन ट्रस्ट भवन
डाकघर नवजीवन
अहमदाबाद 380 014 फोन : 079-27541446

सी.डब्ल्यू.सी. कैंपस
निकट: धनकल बस स्टॉप पनिहटी
कोलकाता 700 114 फोन : 033-25530454

सी.डब्ल्यू.सी. कॉम्प्लैक्स
मालीगाँव
गुवाहाटी 781 021 फोन : 0361-2674869

प्रकाशन सहयोग

अध्यक्ष, प्रकाशन प्रभाग : *अनूप कुमार राजपूत*
मुख्य संपादक : *श्वेता उप्पल*
मुख्य उत्पादन अधिकारी : *अरुण चितकारा*
मुख्य व्यापार प्रबंधक (प्रभारी) : *विपिन दिवान*
संपादक : *नरेश यादव*
उत्पादन सहायक : *??*

आवरण एवं चित्रांकन

श्वेता राव

© NCERT not to be republished

आमुख

राष्ट्रीय पाठ्यचर्या की रूपरेखा (2005) सुझाती है कि बच्चों के स्कूली जीवन को बाहर के जीवन से जोड़ा जाना चाहिए। यह सिद्धांत किताबी ज्ञान की उस विरासत के विपरीत है जिसके प्रभाववश हमारी व्यवस्था आज तक स्कूल और घर के बीच अंतराल बनाए हुए है। नयी राष्ट्रीय पाठ्यचर्या पर आधारित पाठ्यक्रम और पाठ्यपुस्तकें इस बुनियादी विचार पर अमल करने का प्रयास हैं। इस प्रयास में हर विषय को एक मज़बूत दीवार से घेर देने और जानकारी को रटा देने की प्रवृत्ति का विरोध शामिल है। आशा है कि ये कदम हमें राष्ट्रीय शिक्षा नीति (1986) में वर्णित बाल-केंद्रित व्यवस्था की दिशा में काफ़ी दूर तक ले जाएँगे।

इस प्रयत्न की सफलता अब इस बात पर निर्भर है कि स्कूलों के प्राचार्य और अध्यापक बच्चों को कल्पनाशील गतिविधियों और सवालों की मदद से सीखने और सीखने के दौरान अपने अनुभवों पर विचार करने का कितना अवसर देते हैं। हमें यह मानना होगा कि यदि जगह, समय और आज़ादी दी जाए तो बच्चे बड़ों द्वारा सौंपी गई सूचना-सामग्री से जुड़कर और जूझकर नए ज्ञान का सृजन करते हैं। शिक्षा के विविध साधनों एवं स्रोतों की अनदेखी किए जाने का प्रमुख कारण पाठ्यपुस्तक को परीक्षा का एकमात्र आधार बनाने की प्रवृत्ति है। सर्जना और पहल को विकसित करने के लिए ज़रूरी है कि हम बच्चों को सीखने की प्रक्रिया में पूरा भागीदार मानें और बनाएँ, उन्हें ज्ञान की निर्धारित खुराक का ग्राहक मानना छोड़ दें।

ये उद्देश्य स्कूल की दैनिक ज़िंदगी और कार्यशैली में काफ़ी फेरबदल की माँग करते हैं। दैनिक समय-सारणी में लचीलापन उतना ही ज़रूरी है जितना वार्षिक कैलेंडर के अमल में चुस्ती, जिससे शिक्षण के लिए नियत दिनों की संख्या हकीकत बन सके। शिक्षण और मूल्यांकन की विधियाँ भी इस बात को तय करेंगी कि यह पाठ्यपुस्तक स्कूल में बच्चों के जीवन को मानसिक दबाव तथा बोरियत की जगह खुशी का अनुभव कराने में कितनी प्रभावी सिद्ध होती है। बोझ की समस्या से निपटने के लिए पाठ्यक्रम निर्माताओं ने विभिन्न चरणों में ज्ञान का पुनर्निर्धारण करते समय बच्चों के मनोविज्ञान एवं अध्यापन के लिए उपलब्ध समय का ध्यान रखने की पहले से अधिक सचेत कोशिश की है। इस कोशिश को और गहराने के यत्न में यह पाठ्यपुस्तक सोच-विचार और विस्मय, छोटे समूहों में बातचीत एवं बहस और हाथ से की जाने वाली गतिविधियों को प्राथमिकता देती है।

एन.सी.ई.आर.टी. इस पुस्तक की रचना के लिए बनाई गई पाठ्यपुस्तक निर्माण समिति के परिश्रम के लिए कृतज्ञता व्यक्त करती है। परिषद् विज्ञान एवं गणित पाठ्यपुस्तक सलाहकार समिति के अध्यक्ष, प्रोफ़ेसर जे.वी. नार्लीकर और इस पाठ्यपुस्तक के मुख्य सलाहकार, प्रोफ़ेसर ए.डब्ल्यू. जोशी, जिन्होंने इस समिति के कार्य को निर्देशित किया, की विशेष आभारी है। इस पाठ्यपुस्तक के विकास में कई शिक्षकों ने योगदान किया; इस योगदान को संभव बनाने के लिए हम उनके प्राचार्यों के आभारी हैं। हम उन सभी संस्थाओं और संगठनों के प्रति कृतज्ञ हैं जिन्होंने अपने संसाधनों, सामग्री तथा सहयोगियों की मदद लेने में हमें उदारतापूर्वक सहयोग दिया। प्रोफ़ेसर मृणाल मीरी और प्रोफ़ेसर जी. पी. देशपांडे की अध्यक्षता में मानव संसाधन विकास मंत्रालय के अधीन उच्च माध्यमिक शिक्षा विभाग द्वारा गठित निगरानी समिति (मॉनीटरिंग कमेटी) के सदस्यों के अमूल्य समय और सहयोग के लिए हम कृतज्ञ हैं। व्यवस्थागत सुधारों और अपने प्रकाशनों में निरंतर निखार लाने के प्रति समर्पित एन.सी.ई.आर.टी. टिप्पणियों एवं सुझावों का स्वागत करेगी, जिनसे भावी संशोधनों में मदद ली जा सके।

निदेशक

राष्ट्रीय शैक्षिक अनुसंधान और
प्रशिक्षण परिषद्

नयी दिल्ली
20 नवंबर 2006

© NCERT
not to be republished

प्रस्तावना

प्रस्तुत पुस्तक को विद्यार्थियों, शिक्षकों तथा जनमानस (जिसकी भूमिका अनदेखी नहीं की जा सकती) को सौंपते हुए मुझे हर्ष हो रहा है। 2006 में प्रकाशित कक्षा 12 की पाठ्यपुस्तक की यह स्वाभाविक अनुक्रम है। यह पुस्तक पूर्व प्रकाशित पाठ्यपुस्तक का एक सुव्यवस्थित रूप भी है। इस पुस्तक से *धारा के ऊष्मीय तथा रासायनिक प्रभाव* का अध्याय हटा दिया गया है। इस विषय को सी.बी.एस.ई. के पाठ्यक्रम से भी हटा दिया गया है। इसी प्रकार *संचार* के अध्याय से काफी विषय-वस्तु कम की गई है। इस अध्याय को आसानी से समझने योग्य रूप में पुनः लिखा गया है।

यद्यपि अधिकांश अन्य अध्याय पिछले संस्करणों पर ही आधारित हैं, फिर भी बहुत से भाग तथा अनुभाग पुनः लिखे गए हैं। देश के विभिन्न भागों के शिक्षकों से मिले अनेक सुझावों ने पाठ्यपुस्तक निर्माण समिति का मार्गदर्शन किया है।

कक्षा 11 तथा कक्षा 12 दोनों ही कक्षाओं की इन पुस्तकों के निर्माण में महत्त्व दिए जाने वाले बिंदुओं में मूल परिवर्तन किया गया है। दोनों ही पुस्तकों को विद्यार्थियों को बिना यह मानकर प्रेषित किया जा रहा है कि वे भौतिकी का अध्ययन उच्चतर माध्यमिक स्तर से आगे भी करेंगे। यह नया दृष्टिकोण राष्ट्रीय पाठ्यचर्या की रूपरेखा (2005) में दिए गए प्रेक्षणों एवं सुझावों के आधार पर प्रेरित है। इसी प्रकार, आज के शैक्षिक घटनाक्रम, जिसमें कोई विद्यार्थी विविध विषयों का कोई भी संयोजन/चयन कर सकता है, हम यह नहीं मान सकते कि भौतिकी का अध्ययन करने वाला विद्यार्थी गणित का अध्ययन भी कर रहा है। अतः भौतिकी की विषय वस्तु को 'एकला चलो' रूप में प्रस्तुत करना ही एक विकल्प है।

कक्षा 11 की पाठ्यपुस्तक की भाँति, कई अध्यायों में कुछ रोचक बॉक्स सामग्री भी सम्मिलित की गई है। ये पढ़ाने अथवा परीक्षा के लिए नहीं है। इन बॉक्सों को पाठ्यपुस्तक में सम्मिलित करने का उद्देश्य पाठकों के ध्यान को आकर्षित करना, विज्ञान एवं प्रौद्योगिकी के अन्य क्षेत्रों अथवा दैनिक जीवन में कुछ अनुप्रयोगों को दर्शाना, सरल प्रयोग सुझाना, भौतिकी के विभिन्न क्षेत्रों में अभिधारणाओं में संबंध, एकरसता अथवा नीरसता को तोड़कर पुस्तक को सजीव बनाना है।

पुस्तक के प्रत्येक अध्याय के अंत में सारांश, विचारणीय विषय, अभ्यास तथा अतिरिक्त अभ्यास एवं उदाहरण जैसे विशिष्ट लक्षणों को बनाए रखा गया है। संकल्पनाओं पर आधारित कई अभ्यासों को अध्यायों के अंत में दिए गए अभ्यासों से 'उदाहरण एवं उनके हल' के रूप में पाठ्य सामग्री में स्थानांतरित किया गया है। यह आशा की जाती है कि ऐसा करने से अध्याय में दी गई संकल्पनाएँ अधिक बोधगम्य बन जाएँगी। बहुत से नए उदाहरण तथा अभ्यास जोड़े गए हैं। उन विद्यार्थियों के लिए जो आगे भी भौतिकी का अध्ययन करना चाहते हैं, उनके लिए विचारणीय विषय तथा अतिरिक्त अभ्यास काफ़ी उपयोगी और विचारशील सिद्ध होंगे। *पुस्तक से बाहर के साधन* प्रदान करने तथा *ई-शिक्षा* को प्रोत्साहित करने की दृष्टि से प्रत्येक अध्याय में कुछ प्रासंगिक वेबसाइट के पते *ई-भौतिकी* शीर्षक के अंतर्गत प्रदान किए गए हैं। ये साइटें विद्यार्थियों को कुछ विशिष्ट विषयों पर अतिरिक्त सामग्री तथा अन्योन्य क्रियात्मक निदर्शन/प्रयोग प्रदान करती हैं।

भौतिकी की जटिल संकल्पनाओं की समझ, व्यापक बोध तथा महत्त्व जानना आवश्यक है। विद्यार्थियों को इस प्रकार के प्रश्न पूछना/सीखना चाहिए कि 'हम इसे क्यों तथा कैसे जानें' आदि। व्यापक रूप से वह यह पाएँगे कि भौतिकी तथा विज्ञान के क्षेत्र में लगभग सदैव ही 'क्यों' के प्रश्न का उत्तर नहीं पाया जाता। परंतु यह स्वयं में एक सीखने का अनुभव है, क्या आप ऐसा नहीं समझते! इसके विपरीत, 'कैसे' वाले प्रश्नों के अधिकांश प्राकृतिक परिघटनाओं के प्रकरण में भौतिक विज्ञानियों ने तर्कसंगत व सुविवेचित उत्तर दिए हैं। वास्तव में, यह समझने के पश्चात कि घटनाएँ कैसे होती हैं, बहुत सी परिघटनाओं का उपयोग करके मानव के उपयोग के प्रौद्योगिकीय अनुप्रयोग विकसित करना संभव हो पाया है।

उदाहरण के लिए, पुस्तक के किसी प्रकथन पर विचार कीजिए, जैसे 'ऋणावेशित इलेक्ट्रॉन धनावेशित पट्टिका द्वारा आकर्षित होता है' अथवा 'इस प्रयोग में प्रकाश (अथवा इलेक्ट्रॉन) तरंग की भाँति व्यवहार करता है।' आप यह अनुभव करेंगे कि इसके 'क्यों' का उत्तर देना संभव नहीं है। यह प्रश्न 'दर्शनशास्त्र' अथवा 'तत्वमीमांसा' के क्षेत्र के अंतर्गत आता है। परंतु हम 'कैसे' का उत्तर दे सकते हैं, हम आरोपित बल ज्ञात कर सकते हैं, हम फोटॉन (अथवा इलेक्ट्रान) की तरंगदैर्घ्य

© NCERT not to be republished

माप सकते हैं, हम यह निर्धारित कर सकते हैं कि विभिन्न परिस्थितियों में वस्तुएँ कैसे व्यवहार करती हैं तथा इन परिघटनाओं का उपयोग हम अपने लाभ के लिए उपकरण विकसित करने में कर सकते हैं।

समिति के सदस्यों के साथ उच्चतर माध्यमिक स्तर की इन पुस्तकों के लिए कार्य करने में मुझे प्रसन्नता हुई है। पुस्तक निर्माण समिति, पुनरीक्षण समिति तथा संपादन मंडल में कॉलेज तथा विश्वविद्यालयों के शिक्षक, भारतीय प्रौद्योगिकी संस्थानों के शिक्षक, राष्ट्रीय संस्थानों एवं प्रयोगशालाओं के वैज्ञानिकों के उच्चतर माध्यमिक, साथ-साथ विद्यालयों के शिक्षक सम्मिलित किए गए थे। विभिन्न समितियों में उच्चतर माध्यमिक विद्यालयों के शिक्षकों से प्राप्त सुझावों एवं विवेचनात्मक आलोचना अत्यंत प्रशंसनीय पाए गए। अधिकांश बॉक्स सामग्री किसी न किसी समिति के सदस्य द्वारा विकसित की गई है, परंतु उनमें से तीन मित्रों एवं हितैषियों द्वारा जो इन समितियों के सदस्य नहीं हैं, विकसित की गई हैं। हम अध्याय 3, 4 (भाग 1) तथा अध्याय 9 (भाग 2) की बॉक्स सामग्री का उपयोग करने की अनुमति देने के लिए क्रमशः पुणे के डॉ. पी.एन. सेन, दिल्ली की प्रोफ़ेसर रूपमंजरी घोष तथा मुंबई के डॉ. राजेश वी. खापर्डे का आभार प्रकट करते हैं। हम पुनरीक्षण कार्यशाला तथा संपादन कार्यशाला के प्रतिभागियों के प्रति भी आभार प्रकट करते हैं, जिन्होंने पाठ्यपुस्तक की प्रथम पांडुलिपि पर चर्चा करके परिष्कृत किया। हम प्रोफ़ेसर कृष्ण कुमार, निदेशक एन.सी.ई.आर.टी. के प्रति भी आभार प्रकट करते हैं जिन्होंने विज्ञान शिक्षा में सुधार के राष्ट्रीय प्रयास के एक भाग के रूप में इस पुस्तक को प्रस्तुत करने का कार्यभार हमें सौंपा। मैं एन.सी.ई.आर.टी. के संयुक्त निदेशक प्रोफ़ेसर जी. रवीन्द्रा का भी समय-समय पर सहायता देने के लिए धन्यवाद करता हूँ। प्रोफ़ेसर हुकुम सिंह, अध्यक्ष, विज्ञान एवं गणित शिक्षा विभाग, एन.सी.ई.आर.टी. भी हमारे इस कार्य में हर संभव सहायता के लिए इच्छुक रहे हैं।

हम अपने सम्मानित प्रयोक्ताओं, विशेषकर विद्यार्थियों एवं शिक्षकों से प्राप्त समीक्षा एवं सुझावों का आदर करते हैं। हम अपने युवा पाठकों की भौतिकी के रोमांचक कार्य क्षेत्र की ओर अग्रसर होने की कामना करते हैं।

ए.डब्ल्यू. जोशी
मुख्य सलाहकार
पाठ्यपुस्तक निर्माण समिति

© NCERT not to be republished

पाठ्यपुस्तक निर्माण समिति

अध्यक्ष, विज्ञान और गणित पाठ्यपुस्तकों की सलाहकार समिति

जे.वी. नार्लीकर, *इमेरिटस प्रोफ़ेसर*, अंतर-विश्वविद्यालय केंद्र– खगोलविज्ञान और खगोलभौतिकी (आई.यू.सी.ए.ए.), गणेशखिंड, पूना विश्वविद्यालय परिसर, पुणे

मुख्य सलाहकार

ए.डब्ल्यू. जोशी, *हॉनरेरी विजिटिंग साइंटिस्ट*, एन.सी.आर.ए., पूना विश्वविद्यालय परिसर, पुणे
(*भूतपूर्व प्रोफ़ेसर*, भौतिकी विभाग, पूना विश्वविद्यालय)

सदस्य

अंजली क्षीरसागर, *रीडर*, भौतिकी विभाग, पूना विश्वविद्यालय, पुणे
अतुल मोदी, *प्रवक्ता (एस.जी.)*, वी.ई.एस. कला, विज्ञान एवं वाणिज्य महाविद्यालय, मुंबई
अनुराधा माथुर, *पी.जी.टी.*, मॉडर्न स्कूल, बसंत विहार, नयी दिल्ली
अलिका खरे, *प्रोफ़ेसर*, भौतिकी विभाग, भारतीय प्रौद्योगिकी संस्थान, गुवाहाटी
आर. जोशी, *प्रवक्ता (एस.जी.)*, डी.ई.एस.एम., एन.सी.ई.आर.टी., नयी दिल्ली
ए.के. घटक, *इमेरिटस प्रोफ़ेसर*, भौतिकी विभाग, भारतीय प्रौद्योगिकी संस्थान, नयी दिल्ली
एच.सी. प्रधान, *प्रोफ़ेसर*, होमी भाभा विज्ञान शिक्षा केंद्र, (टी.आई.एफ.आर.), मुंबई
एन. पंचपकेशन, *प्रोफ़ेसर (अवकाशप्राप्त)*, भौतिकी एवं खगोलभौतिकी विभाग, दिल्ली विश्वविद्यालय, दिल्ली
एस.एन. प्रभाकर, *पी.जी.टी.*, डी.एम. स्कूल, क्षेत्रीय शिक्षा संस्थान, एन.सी.ई.आर.टी., मैसूर
एस.के. उपाध्याय, *पी.जी.टी.*, जवाहर नवोदय विद्यालय, मुज़फ़्फ़रनगर
एस.के. दाश, *रीडर*, डी.ई.एस.एम., एन.सी.ई.आर.टी., नयी दिल्ली
एस. राय चौधरी, *प्रोफ़ेसर*, भौतिकी एवं खगोलभौतिकी विज्ञान, दिल्ली विश्वविद्यालय, दिल्ली
चित्रा गोयल, *पी.जी.टी.*, राजकीय प्रतिभा विकास विद्यालय, त्यागराज नगर, नयी दिल्ली
बी.के. शर्मा, *प्रोफ़ेसर*, डी.ई.एस.एम., एन.सी.ई.आर.टी., नयी दिल्ली
विश्वजीत कुलकर्णी, *टीचर (ग्रेड I)*, उच्चतर माध्यमिक अनुभाग, श्रीमती पार्वतीबाई चोगुले महाविद्यालय, मारगो, गोवा
वी.एच. रायबागकर, *रीडर*, नौरोसजी वाडिया महाविद्यालय, पुणे

सदस्य-समन्वयक (अंग्रेज़ी संस्करण)

वी.पी. श्रीवास्तव, *रीडर*, डी.ई.एस.एम., एन.सी.ई.आर.टी., नयी दिल्ली

हिंदी अनुवादक

आर.एस. दास, *अवकाशप्राप्त उपप्रधानाचार्य*, बलवंत राय मेहता विद्याभवन सीनियर सेकंडरी स्कूल, नयी दिल्ली
कन्हैया लाल, *अवकाशप्राप्त प्राचार्य*, शिक्षा निदेशालय, राष्ट्रीय राजधानी क्षेत्र, दिल्ली
जे.पी. अग्रवाल, *अवकाशप्राप्त प्राचार्य*, शिक्षा निदेशालय, राष्ट्रीय राजधानी क्षेत्र, दिल्ली
शशि प्रभा, *प्रवक्ता*, डी.ई.एस.एम., एन.सी.ई.आर.टी., नयी दिल्ली

सदस्य-समन्वयक

गगन गुप्त, *रीडर*, डी.ई.एस.एम., एन.सी.ई.आर.टी., नयी दिल्ली

© NCERT not to be republished

भारत का संविधान

भाग 4क

नागरिकों के मूल कर्तव्य

अनुच्छेद 51 क

मूल कर्तव्य – भारत के प्रत्येक नागरिक का यह कर्तव्य होगा कि वह –

(क) संविधान का पालन करे और उसके आदर्शों, संस्थाओं, राष्ट्रध्वज और राष्ट्रगान का आदर करे;

(ख) स्वतंत्रता के लिए हमारे राष्ट्रीय आंदोलन को प्रेरित करने वाले उच्च आदर्शों को हृदय में संजोए रखे और उनका पालन करे;

(ग) भारत की संप्रभुता, एकता और अखंडता की रक्षा करे और उसे अक्षुण्ण बनाए रखे;

(घ) देश की रक्षा करे और आह्वान किए जाने पर राष्ट्र की सेवा करे;

(ङ) भारत के सभी लोगों में समरसता और समान भ्रातृत्व की भावना का निर्माण करे जो धर्म, भाषा और प्रदेश या वर्ग पर आधारित सभी भेदभावों से परे हो, ऐसी प्रथाओं का त्याग करे जो महिलाओं के सम्मान के विरुद्ध हों;

(च) हमारी सामासिक संस्कृति की गौरवशाली परंपरा का महत्त्व समझे और उसका परिरक्षण करे;

(छ) प्राकृतिक पर्यावरण की, जिसके अंतर्गत वन, झील, नदी और वन्य जीव हैं, रक्षा करे और उसका संवर्धन करे तथा प्राणिमात्र के प्रति दयाभाव रखे;

(ज) वैज्ञानिक दृष्टिकोण, मानववाद और ज्ञानार्जन तथा सुधार की भावना का विकास करे;

(झ) सार्वजनिक संपत्ति को सुरक्षित रखे और हिंसा से दूर रहे;

(ञ) व्यक्तिगत और सामूहिक गतिविधियों के सभी क्षेत्रों में उत्कर्ष की ओर बढ़ने का सतत् प्रयास करे, जिससे राष्ट्र निरंतर बढ़ते हुए प्रयत्न और उपलब्धि की नई ऊँचाइयों को छू सके; और

(ट) यदि माता-पिता या संरक्षक है, छह वर्ष से चौदह वर्ष तक की आयु वाले अपने, यथास्थिति, बालक या प्रतिपाल्य को शिक्षा के अवसर प्रदान करे।

© NCERT not to be republished

आभार

इस पुस्तक को अंतिम स्वरूप प्रदान करने के लिए आयोजित कार्यशाला में भाग लेने वाले निम्नलिखित प्रतिभागियों की बहुमूल्य टिप्पणियों के लिए परिषद् निम्नलिखित का आभार व्यक्त करती है : आर.ए. गोयल, *अवकाशप्राप्त प्राचार्य*, शिक्षा निदेशालय, दिल्ली; एन.सी. जैन, *पी.जी.टी.*, एस.ए.सी.जी. सर्वोदय विद्यालय नं. 2, लुडलो कैसल, नयी दिल्ली; के.सी. शर्मा, *प्रवाचक*, क्षेत्रीय शिक्षा संस्थान (एन.सी.ई.आर.टी.), अजमेर; नीलम सहगल, *पी.जी.टी.*, केंद्रीय विद्यालय, जे.एन.यू. परिसर, नयी दिल्ली; डी.सी. पांडेय, *अवकाशप्राप्त शिक्षा अधिकारी*, शिक्षा निदेशालय, दिल्ली; पी.एन. वार्ष्णेय, *अवकाशप्राप्त प्राचार्य*, शिक्षा निदेशालय, दिल्ली।

परिषद् सन 2017 में पाठ्य के पुनरीक्षण और परिष्करण में अमूल्य योगदान के लिए ए.के. श्रीवास्तव, डी.ई.एस.एम., एन.सी.ई.आर.टी., नई दिल्ली; अरनब सेन, एन.ई.आर.आइ.ई., शिलांग; एल.एस. चौहान, आर.आइ.ई., भोपाल; ओ.एन. अवस्थी (रिटायर्ड), आर.आइ.ई., भोपाल; रचना गर्ग, डी.ई.एस.एम., एन.सी.ई.आर.टी., नई दिल्ली; रामन नंबूदरी, आर.आइ.ई., मैसुरू; आर.आर. कोइरेंग, डी.सी.एस., एन.सी.ई.आर.टी., नई दिल्ली; शशि प्रभा, डी.ई.एस.एम., एन.सी.ई.आर.टी., नई दिल्ली; और एस.वी. शर्मा, आर.आइ.ई., अजमेर का भी आभार व्यक्त करती है।

शैक्षिक व प्रशासनिक सहयोग के लिए परिषद् हुकुम सिंह, *प्रोफ़ेसर* तथा *विभागाध्यक्ष*, डी.ई.एस.एम., एन.सी.ई.आर.टी., नयी दिल्ली की आभारी है।

परिषद् ए.पी.सी. कार्यालय तथा डी.ई.एस.एम. के प्रशासनिक स्टॉफ को उनके सहयोग के लिए आभार प्रकट करती है। इस पुस्तक में सहयोग के लिए परिषद् मुसर्रत परवीन, मनोज मोहन *कॉपी एडीटर*; रणधीर ठाकुर *प्रूफ़ रीडर*; ऋतु शर्मा, इन्द्र कुमार *डीटीपी ऑपरेटर*; दीपक कपूर *कंप्यूटर स्टेशन प्रभारी*, डी.ई.एस.एम., विजय कंप्यूटर्स (पुस्तक की टाइपिंग के लिए) और प्रकाशन विभाग का हार्दिक आभार ज्ञापित करती है।

© NCERT not to be republished

भारत का संविधान

भाग-3 (अनुच्छेद 12-35)
(अनिवार्य शर्तों, कुछ अपवादों और युक्तियुक्त निर्बंधन के अधीन)
द्वारा प्रदत्त

मूल अधिकार

समता का अधिकार

- विधि के समक्ष एवं विधियों के समान संरक्षण;
- धर्म, मूलवंश, जाति, लिंग या जन्मस्थान के आधार पर;
- लोक नियोजन के विषय में;
- अस्पृश्यता और उपाधियों का अंत।

स्वातंत्र्य-अधिकार

- अभिव्यक्ति, सम्मेलन, संघ, संचरण, निवास और वृत्ति का स्वातंत्र्य;
- अपराधों के लिए दोष सिद्धि के संबंध में संरक्षण;
- प्राण और दैहिक स्वतंत्रता का संरक्षण;
- छः से चौदह वर्ष की आयु के बच्चों को निःशुल्क एवं अनिवार्य शिक्षा;
- कुछ दशाओं में गिरफ्तारी और निरोध से संरक्षण।

शोषण के विरुद्ध अधिकार

- मानव के दुर्व्यापार और बलात श्रम का प्रतिषेध;
- परिसंकटमय कार्यों में बालकों के नियोजन का प्रतिषेध।

धर्म की स्वतंत्रता का अधिकार

- अंतःकरण की और धर्म के अबाध रूप से मानने, आचरण और प्रचार की स्वतंत्रता;
- धार्मिक कार्यों के प्रबंध की स्वतंत्रता;
- किसी विशिष्ट धर्म की अभिवृद्धि के लिए करों के संदाय के संबंध में स्वतंत्रता;
- राज्य निधि से पूर्णतः पोषित शिक्षा संस्थाओं में धार्मिक शिक्षा या धार्मिक उपासना में उपस्थित होने के संबंध में स्वतंत्रता।

संस्कृति और शिक्षा संबंधी अधिकार

- अल्पसंख्यक-वर्गों को अपनी भाषा, लिपि या संस्कृति विषयक हितों का संरक्षण;
- अल्पसंख्यक-वर्गों द्वारा अपनी शिक्षा संस्थाओं का स्थापन और प्रशासन।

सांविधानिक उपचारों का अधिकार

- उच्चतम न्यायालय एवं उच्च न्यायालय के निर्देश या आदेश या रिट द्वारा प्रदत्त अधिकारों को प्रवर्तित कराने का उपचार।

© NCERT not to be republished

विषय-सूची

आमुख *iii*

प्रस्तावना *v*

अध्याय 1

वैद्युत आवेश तथा क्षेत्र

1.1 भूमिका 1
1.2 वैद्युत आवेश 1
1.3 चालक तथा विद्युतरोधी 5
1.4 प्रेरण द्वारा आवेशन 6
1.5 वैद्युत आवेश के मूल गुण 8
1.6 कूलॉम नियम 10
1.7 बहुल आवेशों के बीच बल 15
1.8 विद्युत क्षेत्र 18
1.9 विद्युत क्षेत्र रेखाएँ 23
1.10 वैद्युत फ्लक्स 25
1.11 वैद्युत द्विध्रुव 27
1.12 एकसमान बाह्य क्षेत्र में द्विध्रुव 31
1.13 संतत आवेश वितरण 32
1.14 गाउस नियम 33
1.15 गाउस नियम के अनुप्रयोग 37

अध्याय 2

स्थिरवैद्युत विभव तथा धारिता

2.1 भूमिका 51
2.2 स्थिरवैद्युत विभव 53
2.3 बिंदु आवेश के कारण विभव 54
2.4 वैद्युत द्विध्रुव के कारण विभव 55
2.5 आवेशों के निकाय के कारण विभव 57
2.6 समविभव पृष्ठ 60
2.7 आवेशों के निकाय की स्थितिज ऊर्जा 61
2.8 बाह्य क्षेत्र में स्थितिज ऊर्जा 64
2.9 चालक–स्थिरवैद्युतिकी 67
2.10 परावैद्युत तथा ध्रुवण 71
2.11 संधारित्र तथा धारिता 73
2.12 समांतर पट्टिका संधारित्र 74
2.13 धारिता पर परावैद्युत का प्रभाव 75

© NCERT not to be republished

2.14 संधारित्रों का संयोजन 78
2.15 संधारित्र में संचित ऊर्जा 80
2.16 वान डे ग्राफ जनित्र 83

अध्याय 3
विद्युत धारा

3.1 भूमिका 93
3.2 विद्युत धारा 93
3.3 चालक में विद्युत धारा 94
3.4 ओम का नियम 95
3.5 इलेक्ट्रान का अपवाह एवं प्रतिरोधकता का उद्गम 97
3.6 ओम के नियम की सीमाएँ 101
3.7 विभिन्न पदार्थों की प्रतिरोधकता 101
3.8 प्रतिरोधकता की ताप पर निर्भरता 103
3.9 विद्युत ऊर्जा, शक्ति 105
3.10 प्रतिरोधकों का संयोजन–श्रेणी संयोजन तथा पार्श्व संयोजन 107
3.11 सेल, विद्युत वाहक बल (emf), आंतरिक प्रतिरोध 110
3.12 श्रेणी तथा पार्श्वक्रम में सेल 113
3.13 किरखोफ के नियम 115
3.14 व्हीटस्टोन सेतु 118
3.15 मीटर सेतु 120
3.16 पोटेंशियोमीटर (विभवमापी) 122

अध्याय 4
गतिमान आवेश और चुंबकत्व

4.1 भूमिका 132
4.2 चुंबकीय बल 133
4.3 चुंबकीय क्षेत्र में गति 137
4.4 संयुक्त विद्युत तथा चुंबकीय क्षेत्रों में गति 140
4.5 विद्युत धारा अवयव के कारण चुंबकीय क्षेत्र, बायो-सावर्ट नियम 143
4.6 विद्युत धारावाही वृत्ताकार पाश के अक्ष पर चुंबकीय क्षेत्र 145
4.7 ऐम्पियर का परिपथीय नियम 147
4.8 परिनालिका तथा टोरॉइड 150
4.9 दो समांतर विद्युत धाराओं के बीच बल–ऐम्पियर 154
4.10 विद्युत धारा पाश पर बल आघूर्ण, चुंबकीय द्विध्रुव 157
4.11 चल कुंडली गैल्वेनोमीटर 163

अध्याय 5
चुंबकत्व एवं द्रव्य

5.1 भूमिका 173
5.2 छड़ चुंबक 174

© NCERT not to be republished

5.3 चुंबकत्व एवं गाउस नियम 181
5.4 भू-चुंबकत्व 185
5.5 चुंबकीकरण एवं चुंबकीय तीव्रता 189
5.6 पदार्थों के चुंबकीय गुण 191
5.7 स्थायी चुंबक एवं विद्युत चुंबक 195

अध्याय 6
वैद्युतचुंबकीय प्रेरण

6.1 भूमिका 204
6.2 फैराडे एवं हेनरी के प्रयोग 205
6.3 चुंबकीय फ्लक्स 206
6.4 फैराडे का प्रेरण का नियम 207
6.5 लेंज का नियम तथा ऊर्जा संरक्षण 210
6.6 गतिक विद्युत वाहक बल 212
6.7 ऊर्जा दृष्टि : एक परिमाणात्मक अध्ययन 215
6.8 भँवर धाराएँ 218
6.9 प्रेरकत्व 219
6.10 प्रत्यावर्ती धारा जनित्र 224

अध्याय 7
प्रत्यावर्ती धारा

7.1 भूमिका 233
7.2 प्रतिरोधक पर प्रयुक्त ac वोल्टता 234
7.3 ac धारा एवं वोल्टता का घूर्णी सदिश द्वारा निरूपण–कलासमंजक (फेजर्स) 237
7.4 प्रेरक पर प्रयुक्त ac वोल्टता 237
7.5 संधारित्र पर प्रयुक्त ac वोल्टता 241
7.6 श्रेणीबद्ध LCR परिपथ पर प्रयुक्त ac वोल्टता 244
7.7 ac परिपथों में शक्ति : शक्ति गुणांक 252
7.8 LC दोलन 255
7.9 ट्रांसफॉर्मर 259

अध्याय 8
वैद्युतचुंबकीय तरंगें

8.1 भूमिका 269
8.2 विस्थापन धारा 270
8.3 वैद्युतचुंबकीय तरंगें 274
8.4 वैद्युतचुंबकीय स्पेक्ट्रम 280

उत्तर 288
पारिभाषिक शब्दावली 308

© NCERT not to be republished

मुखावरण

(http://nobelprize.org तथा 2006 में भौतिकी के नोबेल पुरस्कार से रूपांतरित)

विश्व के विकास के विभिन्न चरण

पश्चावरण

(http://www.iter.org तथा
http://www.dae.gov.in से रूपांतरित)

अंतर्राष्ट्रीय तापनाभिकीय प्रायोगिक रिएक्टर (ITER) युक्ति का व्यवच्छेदित दृश्य। आधार पर खड़ा व्यक्ति स्केल दर्शा रहा है।

ITER एक संयुक्त अंतर्राष्ट्रीय अनुसंधान एवं विकास परियोजना है जिसका उद्देश्य संलयन शक्ति की वैज्ञानिक एवं तकनीकी संभाव्यता का निदर्शन करना है।

भारत इस परियोजना के सात पूर्ण भागीदारी राष्ट्रों में से एक है। अन्य भागीदार यूरोपीय संघ (EURATOM द्वारा निरूपित), जापान, चीन गणराज्य, कोरिया गणराज्य, रूस फेडेरेशन तथा संयुक्त राज्य अमेरिका हैं। ITER का निर्माण यूरोप में फ्रांस के दक्षिण में कैडारके में किया जाएगा तथा इससे 500 MW की संलयन शक्ति उत्पन्न होगी।

सूर्य तथा तारों की ऊर्जा का स्रोत नाभिकीय संलयन है। पृथ्वी पर संलयन-अनुसंधान का उद्देश्य यह निदर्शित करना है कि इस ऊर्जा स्रोत का उपयोग पर्यावरण हितैषी तथा सुरक्षात्मक रूप से विद्युत उत्पन्न करने में किया जा सकता है तथा संसार की बढ़ती जनसंख्या की आवश्यकताओं की पूर्ति के लिए इसके प्रचुर ईंधन भंडार (संपदा) उपलब्ध हैं।

भारत की भूमिका को विस्तार से जानने के लिए परमाणु ऊर्जा विभाग (DAE) की उपरिलिखित वेबसाइट में उपलब्ध *Nuclear India*, Vol. 39, No. 11-12, May-June 2006 का संस्करण देखिए।

© NCERT not to be republished