भौतिकी

कक्षा 12 के लिए पाठ्यपुस्तक



भाग 2

भौतिकी भाग 2

ग्रंथ-सूची

पाठ्यपुस्तकें

इस पुस्तक में जिन विषयों को सम्मिलित किया गया है, उन विषयों के अतिरिक्त अध्ययन के लिए आप निम्नलिखित पुस्तकों में से एक या अधिक पुस्तकें पढ़ना चाहेंगे। यद्यपि इन पुस्तकों में से कुछ उच्च स्तर की हैं और उनमें ऐसे अनेक विषय दिए गए हैं जो इस पुस्तक में नहीं हैं।

1 **Ordinary Level Physics**, A.F. Abbott, Arnold-Heinemann (1984).

2 **Advanced Level Physics**, M. Nelkon and P. Parker, 6th Edition Arnold-Heinemann (1987).

3 **Advanced Physics**, Tom Duncan, John Murray (2000).

4 **Fundamentals of Physics**, David Halliday, Robert Resnick and Jearl Walker, 7th Edition John Wiley (2004).

5 **University Physics**, H.D. Young, M.W. Zemansky and F.W. Sears, Narosa Pub. House (1982).

6 **Problems in Elementary Physics**, B. Bukhovtsa, V. Krivchenkov, G. Myakishev and V. Shalnov, Mir Publishers, (1971).

7 **Lectures on Physics** (3 volumes), R.P. Feynman, Addision – Wesley (1965).

8 **Berkeley Physics Course** (5 volumes) McGraw Hill (1965).

a. Vol. 1 – Mechanics: (Kittel, Knight and Ruderman)

b. Vol. 2 – Electricity and Magnetism (E.M. Purcell)

c. Vol. 3 – Waves and Oscillations (Frank S. Craw-ford)

d. Vol. 4 – Quantum Physics (Wichmann)

e. Vol. 5 – Statistical Physics (F. Reif)

9 **Fundamental University Physics**, M. Alonso and E. J. Finn, Addison — Wesley (1967).

10 **College Physics**, R.L. Weber, K.V. Manning, M.W. White and G.A. Weygand, Tata McGraw Hill (1977).

11 **Physics**: **Foundations and Frontiers**, G. Gamow and J.M. Cleveland, Tata McGraw Hill (1978).

12 **Physics for the Inquiring Mind**, E.M. Rogers, Princeton University Press (1960).

13 **PSSC Physics Course**, DC Heath and Co. (1965) Indian Edition, NCERT (1967).

14 **Physics Advanced Level**, Jim Breithampt, Stanley Thornes Publishers (2000).

15 **Physics,** Patrick Fullick, Heinemann (2000).

16 **Conceptual Physics,** Paul G. Hewitt, Addision-Wesley (1998).

17 **College Physics,** Raymond A. Serway and Jerry S. Faughn, Harcourt Brace and Co. (1999).

18 **University Physics,** Harris Benson, John Wiley (1996).

19 **University Physics,** William P. Crummet and Arthur B. Western, Wm.C. Brown (1994).
20 **General Physics,** Morton M. Sternheim and Joseph W. Kane, John Wiley (1988).
21 **Physics,** Hans C. Ohanian, W.W. Norton (1989).
22 **Advanced Physics,** Keith Gibbs, Cambridge University Press(1996).
23 **Understanding Basic Mechanics,** F. Reif, John Wiley (1995).
24 **College Physics,** Jerry D. Wilson and Anthony J. Buffa, Prentice-Hall (1997).
25 **Senior Physics, Part – I,** I.K. Kikoin and A.K. Kikoin, Mir Publishers (1987).
26 **Senior Physics, Part – II,** B. Bekhovtsev, Mir Publishers (1988).
27 **Understanding Physics,** K. Cummings, Patrick J. Cooney, Priscilla W. Laws and Edward F. Redish, John Wiley (2005).
28 **Essentials of Physics,** John D. Cutnell and Kenneth W. Johnson, John Wiley (2005).

सामान्य पुस्तकें

विज्ञान के अनुदेशित तथा मनोरंजक सामान्य अध्ययन के लिए आप निम्नलिखित पुस्तकों में से कुछ पुस्तकें पढ़ना चाहेंगे। तथापि ध्यान रखिए, इनमें से कुछ पुस्तकों को लिखने का स्तर आपकी प्रस्तुत पुस्तक के स्तर से काफ़ी उच्च रखा गया है।

1 **Mr. Tompkins** in paperback, G. Gamow, Cambridge University Press (1967).
2 **The Universe and Dr. Einstein**, C. Barnett, Time Inc. New York (1962).
3 **Thirty years that Shook Physics**, G. Gamow, Double Day, New York (1966).
4 **Surely You're Joking, Mr. Feynman**, R.P. Feynman, Bantam books (1986).
5 **One, Two, Three... Infinity**, G. Gamow, Viking Inc. (1961).
6 **The Meaning of Relativity**, A. Einstein, (Indian Edition) Oxford and IBH Pub. Co (1965).
7 **Atomic Theory and the Description of Nature**, Niels Bohr, Cambridge (1934).
8 **The Physical Principles of Quantum Theory**, W. Heisenberg, University of Chicago Press (1930).
9 **The Physics- Astronomy Frontier**, F. Hoyle and J.V. Narlikar, W.H. Freeman (1980).
10 **The Flying Circus of Physics with Answer**, J. Walker, John Wiley and Sons (1977).
11 **Physics for Everyone** (series), L.D. Landau and A.I. Kitaigorodski, MIR Publisher (1978).
Book 1: Physical Bodies
Book 2: Molecules
Book 3: Electrons
Book 4: Photons and Nuclei.
12 **Physics can be Fun**, Y. Perelman, MIR Publishers (1986).
13 **Power of Ten**, Philip Morrison and Eames, W.H. Freeman (1985).
14 **Physics in your Kitchen Lab**., I.K. Kikoin, MIR Publishers (1985).
15 **How Things Work : The Physics of Everyday Life**, Louis A. Bloomfield, John Wiley (2005).
16 **Physics Matters : An Introduction to Conceptual Physics,** James Trefil and Robert M. Hazen, John Wiley (2004).

भौतिकी

भाग 2

कक्षा 12 के लिए पाठ्यपुस्तक

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

प्रस्तावना

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

भारत का संविधान

उद्देशिका

हम, भारत के लोग, भारत को एक **संपूर्ण प्रभुत्व-संपन्न, समाजवादी, पंथ-निरपेक्ष, लोकतंत्रात्मक गणराज्य** बनाने के लिए तथा उसके समस्त नागरिकों को:

सामाजिक, आर्थिक और राजनैतिक **न्याय,**

विचार, अभिव्यक्ति, विश्वास, धर्म
और उपासना की **स्वतंत्रता,**

प्रतिष्ठा और अवसर की **समता**
प्राप्त कराने के लिए,

तथा उन **सबमें** व्यक्ति की गरिमा और
राष्ट्र की एकता और अखंडता
सुनिश्चित करने वाली बंधुता बढ़ाने के लिए

दृढ़संकल्प होकर **अपनी इस संविधान सभा में** आज तारीख 26 नवंबर, 1949 ई. (मिति मार्गशीर्ष शुक्ला सप्तमी, संवत् दो हज़ार छह विक्रमी) को **एतद्द्वारा इस संविधान को अंगीकृत, अधिनियमित और आत्मार्पित करते हैं।**

आमुख

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 तरंगदैर्ध्य

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

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
गगन गुप्त, *रीडर*, डी.ई.एस.एम., एन.सी.ई.आर.टी., नयी दिल्ली
जे.पी. अग्रवाल, *अवकाशप्राप्त प्राचार्य*, शिक्षा निदेशालय, राष्ट्रीय राजधानी क्षेत्र, दिल्ली

सदस्य-समन्वयक

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

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।

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; एस.वी. 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; शशि प्रभा, *प्रवक्ता*, एन.सी.ई.आर.टी., नयी दिल्ली।

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 स्टाफ को उनके सहयोग के लिए आभार प्रकट करती है। परिषद् विजय कंप्यूटर्स का इस पुस्तक की टाइपिंग के लिए आभार व्यक्त करती है। इस पुस्तक में सहयोग के लिए परिषद् मुसर्रत परवीन, अवध किशोर सिंह, अमर सिंह सचान, *कॉपी एडीटर*; रणधीर ठाकुर *प्रूफ़ रीडर*; इन्द्र कुमार, ऋतु शर्मा, *डीटीपी ऑपरेटर*; दीपक कपूर, *कंप्यूटर स्टेशन प्रभारी*, डी.ई.एस.एम. और प्रकाशन विभाग के सहयोग हेतु हार्दिक आभार ज्ञापित करती है।

भौतिकी भाग 1 कक्षा 12 की विषय-सूची

प्रस्तावना *iii*

आमुख *ix*

अध्याय 1
वैद्युत आवेश तथा क्षेत्र 1

अध्याय 2
स्थिर वैद्युत विभव तथा धारिता 51

अध्याय 3
विद्युत धारा 93

अध्याय 4
गतिमान आवेश और चुंबकत्व 132

अध्याय 5
चुंबकत्व एवं द्रव्य 173

अध्याय 6
वैद्युतचुंबकीय प्रेरण 204

अध्याय 7
प्रत्यावर्ती धारा 233

अध्याय 8
वैद्युतचुंबकीय तरंगें 269

उत्तर 288

पारिभाषिक शब्दावली 308

विषय-सूची

प्रस्तावना *iii*

आमुख *v*

अध्याय 9

किरण प्रकाशिकी एवं प्रकाशिक यंत्र

9.1 भूमिका 311
9.2 गोलीय दर्पणों द्वारा प्रकाश का परावर्तन 312
9.3 अपवर्तन 318
9.4 पूर्ण आंतरिक परावर्तन 321
9.5 गोलीय पृष्ठों तथा लेंसों द्वारा अपवर्तन 325
9.6 प्रिज़्म में अपवर्तन 332
9.7 प्रिज़्म द्वारा परिक्षेपण 333
9.8 सूर्य के प्रकाश के कारण कुछ प्राकृतिक परिघटनाएँ 335
9.9 प्रकाशिक यंत्र 337

अध्याय 10

तरंग-प्रकाशिकी

10.1 भूमिका 353
10.2 हाइगेंस का सिद्धांत 355
10.3 हाइगेंस सिद्धांत का उपयोग करते हुए समतल तरंगों का अपवर्तन तथा परावर्तन 357
10.4 तरंगों का कला-संबद्ध तथा कला-असंबद्ध योग 362
10.5 प्रकाश तरंगों का व्यतिकरण तथा यंग का प्रयोग 364
10.6 विवर्तन 369
10.7 ध्रुवण 378

अध्याय 11

विकिरण तथा द्रव्य की द्वैत प्रकृति

11.1 भूमिका 388
11.2 इलेक्ट्रॉन उत्सर्जन 389
11.3 प्रकाश-विद्युत प्रभाव 390
11.4 प्रकाश-विद्युत प्रभाव का प्रायोगिक अध्ययन 391
11.5 प्रकाश-विद्युत प्रभाव तथा प्रकाश का तरंग सिद्धांत 395

11.6 आइंस्टाइन का प्रकाश-विद्युत समीकरण : विकिरण का ऊर्जा क्वांटम 395
11.7 प्रकाश की कणीय प्रकृति : फ़ोटॉन 397
11.8 द्रव्य की तरंग प्रकृति 400
11.9 डेविसन तथा जर्मर प्रयोग 405

अध्याय 12
परमाणु

12.1 भूमिका 416
12.2 एल्फा कण प्रकीर्णन तथा परमाणु का रदरफोर्ड नाभिकीय मॉडल 417
12.3 परमाण्वीय स्पेक्ट्रम 422
12.4 हाइड्रोजन परमाणु का बोर का मॉडल 424
12.5 हाइड्रोजन परमाणु का लाइन स्पेक्ट्रम 430
12.6 बोर के क्वांटमीकरण के द्वितीय अभिगृहीत का दे ब्रॉग्ली द्वारा स्पष्टीकरण 432

अध्याय 13
नाभिक

13.1 भूमिका 440
13.2 परमाणु द्रव्यमान एवं नाभिक की संरचना 440
13.3 नाभिक का साइज़ 443
13.4 द्रव्यमान-ऊर्जा तथा नाभिकीय बंधन-ऊर्जा 444
13.5 नाभिकीय बल 447
13.6 रेडियोऐक्टिवता 448
13.7 नाभिकीय ऊर्जा 453

अध्याय 14
अर्धचालक इलेक्ट्रॉनिकी– पदार्थ, युक्तियाँ तथा सरल परिपथ

14.1 भूमिका 469
14.2 धातुओं, चालकों तथा अर्धचालकों का वर्गीकरण 470
14.3 नैज अर्धचालक 474
14.4 अपद्रव्यी अर्धचालक 476
14.5 p-n संधि 480
14.6 अर्धचालक डायोड 481
14.7 संधि डायोड का दिष्टकारी के रूप में अनुप्रयोग 485
14.8 विशिष्ट प्रयोजन p-n संधि डायोड 487
14.9 संधि ट्रांज़िस्टर 492
14.10 अंकक इलेक्ट्रॉनिकी तथा तर्क (लॉज़िक) गेट 503
14.11 एकीकृत परिपथ 507

अध्याय 15

संचार व्यवस्था

15.1	भूमिका	515
15.2	संचार व्यवस्था के अवयव	515
15.3	इलेक्ट्रॉनिक संचार व्यवस्थाओं में उपयोग होने वाली मूल शब्दावली	517
15.4	सिग्नलों की बैंड-चौड़ाई	519
15.5	प्रेषण माध्यम की बैंड-चौड़ाई	520
15.6	वैद्युतचुंबकीय तरंगों का संचरण	521
15.7	माडुलन तथा इसकी आवश्यकता	524
15.8	आयाम माडुलन	526
15.9	आयाम माडुलित तरंग को उत्पन्न करना	527
15.10	आयाम माडुलित तरंग का संसूचन	528

परिशिष्ट	534
उत्तर	536
ग्रंथ-सूची	556
पारिभाषिक शब्दावली	558
शब्द-सूची	563

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।

अध्याय 9

किरण प्रकाशिकी एवं प्रकाशिक यंत्र

9.1 भूमिका

प्रकृति ने मानव नेत्र (दृष्टि पटल) को वैद्युतचुंबकीय स्पेक्ट्रम के एक छोटे परिसर में वैद्युत चुंबकीय तरंगों को सुग्राहिता सहित संसूचित कर सकने योग्य बनाया है। इस वैद्युतचुंबकीय स्पेक्ट्रम से संबंधित विकिरणों (तरंगदैर्घ्य लगभग 400 nm से 750 nm) को प्रकाश कहते हैं। मुख्य रूप से प्रकाश एवं दृष्टि की संवेदना के कारण ही हम अपने चारों ओर के संसार को समझते एवं उसकी व्याख्या करते हैं।

अपने सामान्य अनुभव से हम प्रकाश के विषय में अपनी अंतर्दृष्टि द्वारा दो बातों का उल्लेख कर सकते हैं। पहली, यह अत्यधिक तीव्र चाल से गमन करता है तथा, दूसरी, यह सरल रेखा में गमन करता है। इस तथ्य को पूर्ण रूप से समझने में लोगों को कुछ समय लगा कि प्रकाश की चाल (c) परिमित है तथा इसे मापा जा सकता है। वर्तमान में, इसका निर्वात में मान्य मान $c = 2.99792458 \times 10^8\ \text{m s}^{-1}$ है। अनेक प्रयोजनों के लिए, इसका मान $c = 3 \times 10^8\ \text{m s}^{-1}$ पर्याप्त है। निर्वात में प्रकाश की चाल प्रकृति में प्राप्य उच्चतम चाल है।

हमारी अंतर्दर्शी धारणा कि प्रकाश सरल रेखा में गमन करता है, (जो कुछ हमने अध्याय 8 में सीखा था) का खंडन करती प्रतीत होती है क्योंकि वहाँ हमने प्रकाश को वैद्युतचुंबकीय तरंग माना था जिसकी तरंगदैर्घ्य स्पेक्ट्रम के दृश्य भाग में होती है। इन दोनों तथ्यों में सामंजस्य कैसे स्थापित किया जाए? इसका उत्तर यह है कि दैनिक जीवन की सामान्य वस्तुओं के साइज़ (व्यापक रूप में कुछ सेंटीमीटर की कोटि अथवा इससे अधिक) की तुलना में प्रकाश की तरंगदैर्घ्य काफ़ी कम होती है। जैसा कि आप अध्याय 10 में सीखेंगे, इस स्थिति में, प्रकाश तरंग को एक बिंदु से दूसरे बिंदु तक किसी सरल रेखा के अनुदिश गमन करते हुए माना जा सकता है। इस पथ को *प्रकाश*

किरण कहते हैं तथा इसी प्रकार की किरणों के समूह से *प्रकाश-पुंज* बनता है।

इस अध्याय में, हम प्रकाश के किरण रूप का उपयोग करते हुए, प्रकाश के परावर्तन, अपवर्तन तथा विक्षेपण की परिघटनाओं के बारे में विचार करेंगे। परावर्तन तथा अपवर्तन के मूल नियमों का उपयोग करते हुए हम समतल तथा गोलीय परावर्ती एवं अपवर्ती पृष्ठों द्वारा प्रतिबिंबों की रचना का अध्ययन करेंगे। तत्पश्चात हम मानव नेत्र सहित कुछ महत्वपूर्ण प्रकाशिक यंत्रों की रचना एवं कार्य विधि का वर्णन करेंगे।

प्रकाश का कणिका मॉडल

न्यूटन का प्रकाश से संबंधित गहन प्रायोगिक कार्य एवं सैद्धांतिक अध्ययन प्राय: उनके गणित, यांत्रिकी तथा गुरुत्वाकर्षण से संबंधित मौलिक योगदानों को धुँधला कर देता है। उन्होंने प्रकाशिकी के क्षेत्र में पथ प्रदर्शक योगदान दिया। दकार्ते द्वारा प्रस्तुत कणिका मॉडल को उन्होंने और अधिक विकसित किया। इसमें यह माना गया कि प्रकाश ऊर्जा छोटे-छोटे कणों में संकेंद्रित होती है, जिसको उन्होंने *कणिकाएँ* कहा। न्यूटन ने प्रतिपादित किया कि प्रकाश ऊर्जा इन कणिकाओं में संकेंद्रित होती है। उन्होंने यह भी कल्पना की कि प्रकाश की कणिकाएँ द्रव्यमानरहित प्रत्यास्थ कण हैं। अपने यांत्रिकी के ज्ञान के आधार पर उन्होंने परावर्तन तथा अपवर्तन का सरल मॉडल प्रस्तुत किया। यह एक सामान्य प्रेक्षण है कि जब कोई गेंद किसी चिकने समतल पृष्ठ से टकराकर वापस लौटती है तो वह परावर्तन के नियमों का पालन करती है। जब यह टक्कर प्रत्यास्थ होती है तो वेग का परिमाण अपरिवर्तित रहता है। क्योंकि पृष्ठ चिकना है, पृष्ठ के समांतर कोई बल कार्य नहीं करता, अत: संवेग का इस दिशा में घटक भी अपरिवर्तित रहता है। केवल पृष्ठ के लंबवत घटक, अर्थात संवेग का अभिलंबवत घटक ही परावर्तन में उत्क्रमित हो जाता है। न्यूटन ने तर्क किया कि दर्पणों जैसे चिकने पृष्ठ कणिकाओं को इसी प्रकार परावर्तित करते हैं।

अपवर्तन की परिघटना की व्याख्या करने के लिए, न्यूटन ने अभिगृहीत प्रस्तुत किया कि कणिकाओं की चाल जल अथवा काँच में, वायु की अपेक्षा अधिक होती है। तथापि, बाद में यह ज्ञात हुआ कि प्रकाश की चाल जल अथवा काँच में वायु की अपेक्षा कम होती है।

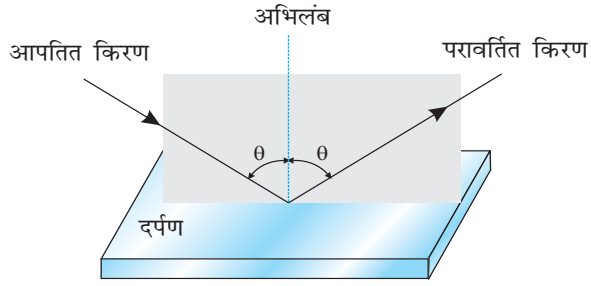
प्रकाशिकी के क्षेत्र में, प्रयोगकर्ता के रूप में न्यूटन, सिद्धांतवादी न्यूटन की तुलना में कहीं अधिक दक्ष थे। उन्होंने कई ऐसी परिघटनाओं का प्रेक्षण किया जिनको कणिकाओं के पदों में स्पष्ट कर पाना कठिन है। उदाहरण के लिए, जल के पृष्ठ पर तेल की पतली फ़िल्म के कारण विभिन्न वर्णों का प्रेक्षण। प्रकाश के आंशिक परावर्तन का गुण ऐसा ही एक अन्य उदाहरण है। जब भी कोई तरण ताल (Swimming pool) के जल में देखता है, तब वह अपने चेहरे का प्रतिबिंब तो उसमें देखता ही है लेकिन साथ में ताल की पेंदी भी देखता है। न्यूटन ने तर्क किया कि जल के पृष्ठ पर आपतित कणिकाओं में से कुछ का परावर्तन होता है तथा कुछ पारगमित हो जाती हैं। परंतु दो प्रकार की कणिकाओं में भेद किस गुणधर्म के आधार पर किया जाए। न्यूटन को कुछ अप्रागुक्त, सांयोगिक परिघटनाओं की परिकल्पना करनी पड़ी जिनके द्वारा यह निश्चित किया जा सकता था कि कोई कणिका परावर्तित होगी अथवा नहीं। तथापि, अन्य परिघटनाओं की व्याख्या करने के लिए यह मानना पड़ा कि कणिकाएँ ऐसे व्यवहार करती हैं जैसे कि वे सर्वसम हों। ऐसी दुविधा प्रकाश के तरंग रूप में नहीं होती। कोई भी आने वाली तरंग वायु तथा जल की परिसीमा पर दो दुर्बल तरंगों में बँट सकती है।

9.2 गोलीय दर्पणों द्वारा प्रकाश का परावर्तन

हम परावर्तन के नियमों से परिचित हैं। परावर्तन कोण (अर्थात, परावर्तित किरण तथा परावर्तक पृष्ठ अथवा दर्पण के आपतन बिंदु पर अभिलंब के बीच का कोण), आपतन कोण (आपतित किरण तथा दर्पण के आपतन बिंदु अभिलंब के बीच का कोण) के बराबर होता है। इसके अतिरिक्त, आपतित किरण, परावर्तित किरण तथा परावर्तक पृष्ठ के आपतन बिंदु पर अभिलंब एक ही समतल में होते हैं (चित्र 9.1)। ये नियम किसी भी परावर्तक पृष्ठ, चाहे वह समतल हो या वक्रित हो, के प्रत्येक बिंदु के लिए वैध हैं। तथापि, हम अपने विवेचन को वक्रित पृष्ठों की विशेष स्थिति, अर्थात गोलीय पृष्ठों तक ही सीमित रखेंगे। इस स्थिति में अभिलंब खींचने का तात्पर्य, पृष्ठ के आपतन

बिंदु पर खींचे गए स्पर्शी पर लंब खींचना है। इसका अर्थ यह हुआ कि अभिलंब वक्रता त्रिज्या के अनुदिश अर्थात आपतन बिंदु को दर्पण के वक्रता केंद्र से मिलाने वाली रेखा पर है।

हम पहले ही अध्ययन कर चुके हैं कि गोलीय दर्पण का ज्यामितीय केंद्र इसका *ध्रुव* कहलाता है, जबकि गोलीय लेंस के ज्यामितीय केंद्र को *प्रकाशिक केंद्र* कहते हैं। गोलीय दर्पण के ध्रुव तथा वक्रता केंद्र को मिलाने वाली सरल रेखा *मुख्य अक्ष* कहलाती है। गोलीय लेंसों में जैसा कि आप बाद में देखेंगे, प्रकाशिक केंद्र को मुख्य फोकस से मिलाने वाली रेखा *मुख्य अक्ष* कहलाती है।

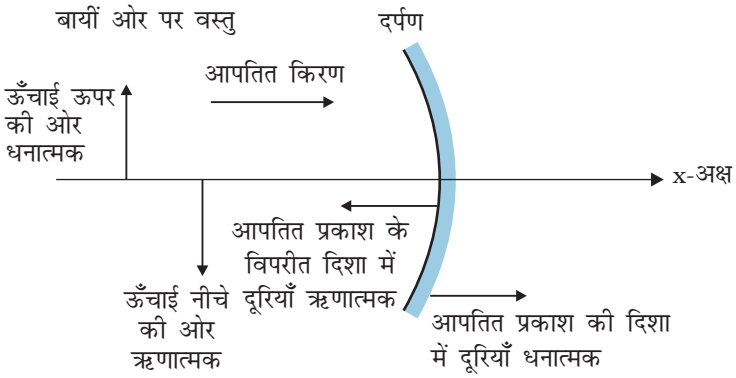


चित्र 9.1 आपतित किरण, परावर्तित किरण तथा परावर्तक पृष्ठ के आपतन बिंदु पर अभिलंब एक ही तल में होते हैं।

9.2.1 चिह्न परिपाटी

गोलीय दर्पणों द्वारा परावर्तन तथा गोलीय लेंसों द्वारा अपवर्तन के लिए प्रासंगिक सूत्र व्युत्पन्न करने के लिए, सर्वप्रथम हमें दूरियाँ मापने के लिए कोई चिह्न परिपाटी अपनानी होगी। इस पुस्तक में हम *कार्तीय चिह्न परिपाटी* (cartesian sign convention) का पालन करेंगे। इस परिपाटी के अनुसार वस्तु को दर्पण/लेंस के बायीं ओर रखते हैं तथा सभी दूरियाँ दर्पण के ध्रुव अथवा लेंस के प्रकाशिक केंद्र से मापी जाती हैं। आपतित प्रकाश की दिशा में मापी गई दूरियाँ धनात्मक मानी जाती हैं तथा जो दूरियाँ आपतित प्रकाश की दिशा के विपरीत दिशा में मापी जाती हैं वे ऋणात्मक मानी जाती हैं (चित्र 9.2)। x-अक्ष के सापेक्ष तथा दर्पण/लेंस के मुख्य अक्ष (x-अक्ष) के अभिलंबवत, उपरिमुखी मापित ऊँचाइयाँ धनात्मक मानी जाती हैं (चित्र 9.2)। अधोमुखी मापित ऊँचाइयों को ऋणात्मक लिया जाता है।

सामान्य मान्य परिपाटी के साथ हमें गोलीय दर्पणों के लिए एकल सूत्र तथा गोलीय लेंसों के लिए एकल सूत्र मिल जाते हैं तथा इन सूत्रों द्वारा हम विभिन्न स्थितियों का निपटान कर सकते हैं।

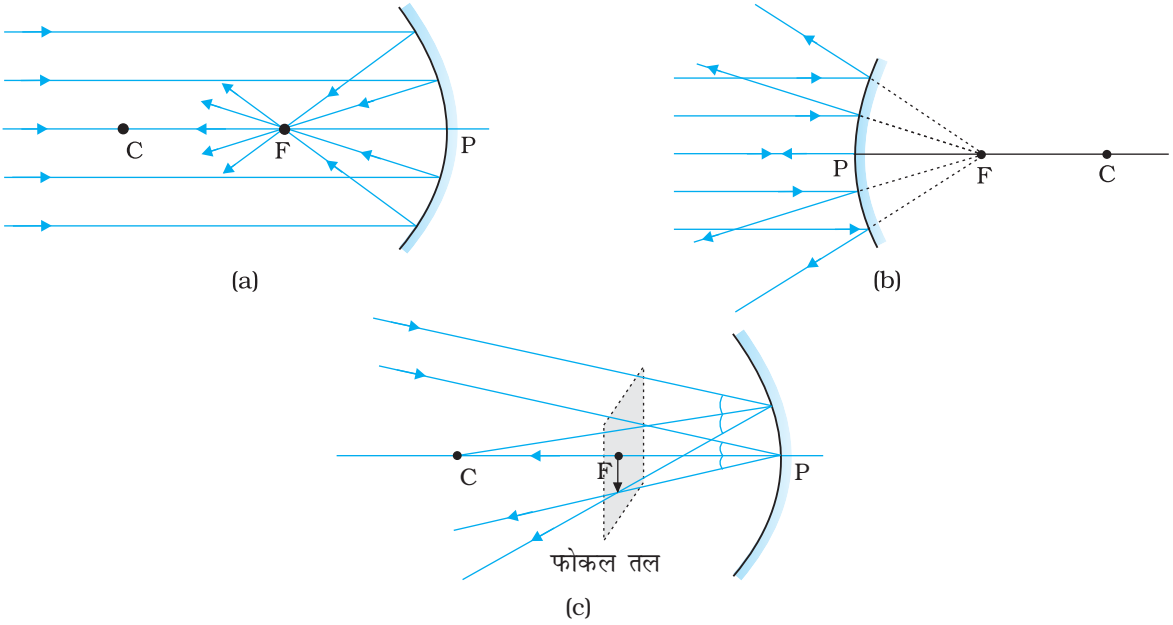


चित्र 9.2 कार्तीय चिह्न परिपाटी।

9.2.2 गोलीय दर्पणों की फोकस दूरी

चित्र 9.3 में दर्शाया गया है कि जब कोई समांतर प्रकाश-पुंज किसी (a) अवतल दर्पण तथा (b) उत्तल दर्पण, पर आपतित होता है तो क्या होता है। हम यहाँ यह मानते हैं कि किरणें *उपाक्षीय* (paraxial) हैं, अर्थात वे दर्पण के ध्रुव P के निकट के बिंदुओं पर आपतित हैं तथा मुख्य अक्ष से छोटे कोण बनाती हैं। परावर्तित किरणें अवतल दर्पण के मुख्य अक्ष पर बिंदु F पर अभिसरित होती हैं [चित्र 9.3 (a)]। उत्तल दर्पण के लिए, परावर्तित किरणें इसके मुख्य अक्ष पर बिंदु F से अपसरित होती प्रतीत होती हैं [चित्र 9.3 (b)]। बिंदु F दर्पण का *मुख्य फ़ोकस* कहलाता है। यदि समांतर उपाक्षीय प्रकाश-पुंज अक्ष से कोई कोण बनाते हुए दर्पण पर आपतित होता है तो परावर्तित किरणें मुख्य अक्ष के बिंदु F से गुज़रने वाले तथा मुख्य अक्ष के अभिलंबवत तल के किसी बिंदु पर अभिसरित (अथवा उस बिंदु से अपसरित होती प्रतीत) होंगी। इस तल को दर्पण का *फ़ोकस समतल* कहते हैं [चित्र 9.3 (c)]।

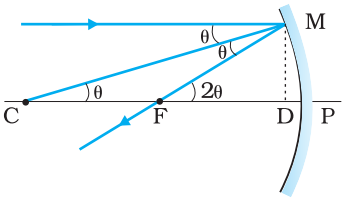
दर्पण के फ़ोकस F तथा ध्रुव P के बीच की दूरी दर्पण की *फ़ोकस दूरी* कहलाती है तथा इसे f द्वारा निर्दिष्ट किया जाता है। अब हम यह दर्शाते हैं कि $f = R/2$, यहाँ R दर्पण की वक्रता त्रिज्या है। किसी आपतित प्रकाश किरण के परावर्तन की ज्यामिति चित्र 9.4 में दर्शायी गई है।



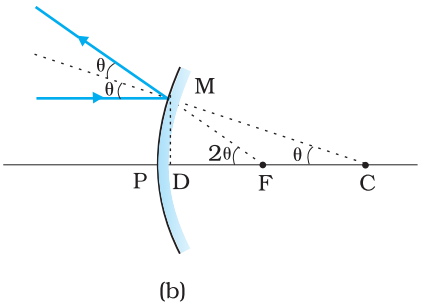
चित्र 9.3 अवतल तथा उत्तल दर्पण के फोकस।

मान लीजिए C दर्पण का वक्रता केंद्र है। मुख्य अक्ष के समांतर एक प्रकाश किरण पर विचार कीजिए जो दर्पण से M पर टकराती है। तब CM बिंदु M पर दर्पण पर अभिलंब होगा। मान लीजिए θ आपतन कोण है तथा MD बिंदु M से मुख्य अक्ष पर लंब है। तब,

$\angle MCP = \theta$ तथा $\angle MFP = 2\theta$



(a)



(b)

चित्र 9.4 (a) अवतल गोलीय दर्पण, तथा (b) उत्तल गोलीय दर्पण, पर किसी आपतित किरण के परावर्तन की ज्यामिति।

अब, $\tan\theta = \frac{MD}{CD}$ तथा $\tan 2\theta = \frac{MD}{FD}$ (9.1)

θ के लघु मानों के लिए, जो कि उपाक्षीय किरणों के लिए सत्य है,

$\tan\theta \approx \theta$, $\tan 2\theta \approx 2\theta$

इसलिए समीकरण (9.1) से प्राप्त होता है

$$\frac{MD}{FD} = 2\,\frac{MD}{CD}$$

अथवा, $FD = \frac{CD}{2}$ (9.2)

अथवा, θ के लघु मान के लिए, बिंदु D बिंदु P के बहुत निकट है। इसलिए, $FD = f$ तथा $CD = R$। अतः समीकरण (9.2) से प्राप्त होता है

$f = R/2$ (9.3)

9.2.3 दर्पण समीकरण

यदि किसी बिंदु से आरंभ होकर प्रकाश किरणें परावर्तन तथा/अथवा अपवर्तन के पश्चात किसी अन्य बिंदु पर मिलती हैं तो वह बिंदु पहले बिंदु का *प्रतिबिंब* कहलाता है। यदि किरणें वास्तव में इस बिंदु पर अभिसरित होती हैं तो प्रतिबिंब *वास्तविक* होता है। इसके विपरीत, यदि किरणें वास्तव में नहीं मिलतीं, परंतु पीछे की ओर बढ़ाए जाने पर उस बिंदु से अपसरित होती प्रतीत होती हैं तो वह प्रतिबिंब *आभासी* होता है। इस प्रकार किसी वस्तु का परावर्तन तथा/अथवा अपवर्तन द्वारा स्थापित प्रतिबिंब उस वस्तु का बिंदु-दर-बिंदु तदनुरूप होता है।

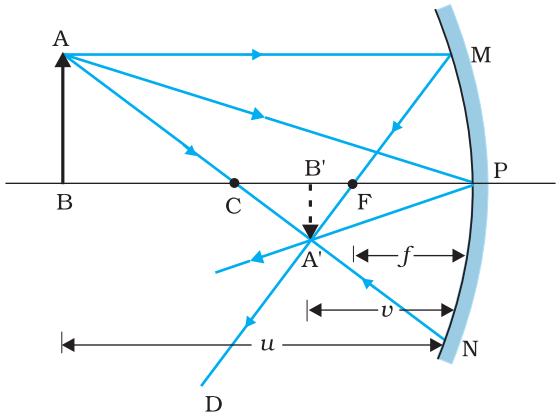
सिद्धांत रूप में, हम वस्तु के किसी बिंदु से निकलने वाली कोई दो किरणें ले सकते हैं, उनके पथ अनुरेखित करते हैं, उनका प्रतिच्छेद बिंदु ज्ञात करते हैं और इस प्रकार, किसी गोलीय दर्पण द्वारा परावर्तन के कारण बना किसी बिंदु का प्रतिबिंब प्राप्त करते हैं। तथापि, व्यवहार में निम्नलिखित किरणों में से कोई सी दो किरणें लेना सुविधाजनक होता है :

(i) किसी बिंदु से आने वाली वह किरण जो मुख्य अक्ष के समांतर है। परावर्तित किरण दर्पण के फ़ोकस से गुज़रती है।

(ii) वह किरण जो किसी अवतल दर्पण के वक्रता केंद्र से गुज़रती है अथवा उत्तल दर्पण के वक्रता केंद्र से जाती प्रतीत होती है। परावर्तित किरण केवल अपना पथ पुनः अनुरेखित करती है।

(iii) वह किरण जो किसी अवतल दर्पण के मुख्य फ़ोकस से गुज़रती है अथवा उत्तल दर्पण के मुख्य फ़ोकस से गुज़रती (की ओर दिष्ट) प्रतीत होती है। परावर्तित किरण मुख्य अक्ष के समांतर गमन करती है।

(iv) कोई किरण जो ध्रुव पर किसी भी कोण पर आपतित होती है। परावर्तित किरण, परावर्तन के नियमों का पालन करती है।



चित्र 9.5 किसी अवतल दर्पण द्वारा प्रतिबिंब रचना का किरण आरेख

चित्र 9.5 बिंब के बिंदु A से निकलने वाली तीन किरणों को ध्यान में रखकर किरण-आरेख दर्शाता है। इसमें अवतल दर्पण द्वारा बनाया गया बिंब AB का प्रतिबिंब A′B′ (इस स्थिति में वास्तविक) दर्शाया गया है। इसका यह अर्थ नहीं है कि बिंदु A से केवल तीन किरणें ही निकलती हैं। किसी भी स्रोत से सभी दिशाओं में अनंत किरणें निकलती हैं। अतः यदि बिंदु A से निकलने वाली प्रत्येक किरण, अवतल दर्पण द्वारा परावर्तन के पश्चात बिंदु A′ से होकर गुज़रती है तो बिंदु A′ बिंदु A का वास्तविक प्रतिबिंब है।

अब हम दर्पण समीकरण अथवा बिंब दूरी (u), प्रतिबिंब दूरी (v) तथा फ़ोकस दूरी (f) के बीच संबंध व्युत्पन्न करेंगे।

चित्र 9.5 से, दोनों समकोण त्रिभुज A′B′F तथा MPF समरूप हैं। (उपाक्षीय किरणों के लिए, MP को सरल रेखा CP के लंबवत माना जा सकता है।) अतः

$$\frac{B'A'}{PM}=\frac{B'F}{FP}$$

अथवा $$\frac{B'A'}{BA}=\frac{B'F}{FP} \quad (\because PM = AB) \qquad (9.4)$$

क्योंकि $\angle APB = \angle A'PB'$, समकोण त्रिभुज A′B′P तथा ABP भी समरूप हैं। अतः

$$\frac{B'A'}{BA}=\frac{B'P}{BP} \qquad (9.5)$$

समीकरण (9.4) तथा (9.5) की तुलना करने पर हमें प्राप्त होगा

$$\frac{B'F}{FP}=\frac{B'P-FP}{FP}=\frac{B'P}{BP} \qquad (9.6)$$

समीकरण (9.6) में दूरियों के परिमाण सम्मिलित हैं। अब हम चिह्न परिपाटी को लागू करते हैं। हम नोट करते हैं कि प्रकाश बिंब से दर्पण MPN की ओर गमन करता है। इस प्रकार इस दिशा को धनात्मक लिया जाता है। ध्रुव P से बिंब AB, प्रतिबिंब A′B′ तथा फ़ोकस F तक पहुँचने के लिए हमें आपतित प्रकाश की दिशा के विपरीत दिशा में गमन करना पड़ता है। इसलिए, इन तीनों के चिह्न

ऋणात्मक होंगे। अत:

$$B'P = -v,\ FP = -f,\ BP = -u$$

समीकरण (9.6) में इनका उपयोग करने पर प्राप्त होता है

$$\frac{-v+f}{-f} = \frac{-v}{-u}$$

अथवा $$\frac{v-f}{f} = \frac{v}{u}$$

$$\frac{1}{v}+\frac{1}{u} = \frac{1}{f} \qquad (9.7)$$

यह संबंध *दर्पण समीकरण* कहलाता है।

वस्तु के साइज़ के सापेक्ष प्रतिबिंब का साइज़ भी एक महत्वपूर्ण विचारणीय राशि है। हम किसी दर्पण के रैखिक *आवर्धन* (m) को प्रतिबिंब के साइज़ (h') तथा बिंब के साइज़ (h) के अनुपात के रूप में परिभाषित करते हैं। अत:

$$m = \frac{h'}{h} \qquad (9.8)$$

h तथा h' को मान्य चिह्न परिपाटी के अनुसार धनात्मक अथवा ऋणात्मक लिया जाएगा। त्रिभुजों A′B′P तथा ABP, में हमें मिलता है,

$$\frac{B'A'}{BA} = \frac{B'P}{BP}$$

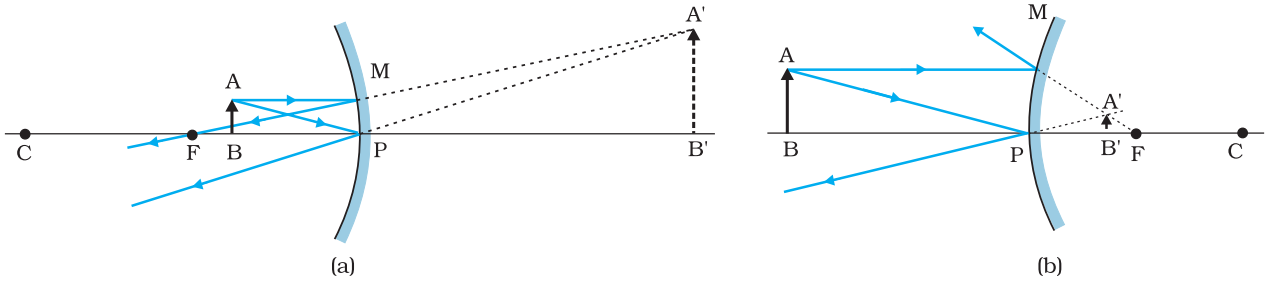
चिह्न परिपाटी लगाने पर, यह हो जाएगा

$$\frac{-h'}{h} = \frac{-v}{-u}$$

इस प्रकार

$$m = \frac{h'}{h} = -\frac{v}{u} \qquad (9.9)$$

यहाँ पर हमने दर्पण समीकरण [समीकरण (9.7)] तथा आवर्धन सूत्र [समीकरण (9.9)] अवतल दर्पण द्वारा बने वास्तविक तथा उलटे प्रतिबिंब के लिए व्युत्पन्न किए हैं। परंतु वास्तव में उचित चिह्न परिपाटी का उपयोग करने पर, ये संबंध गोलीय दर्पणों (अवतल तथा उत्तल) द्वारा परावर्तन के सभी उदाहरणों (चाहे प्रतिबिंब वास्तविक बने या आभासी) पर लागू होते हैं। चित्र 9.6 में अवतल तथा उत्तल दर्पण द्वारा आभासी प्रतिबिंबों की रचना के किरण-आरेख दर्शाए गए हैं। आप स्वयं यह सत्यापित कर सकते हैं कि समीकरण (9.7) तथा (9.9) इन उदाहरणों के लिए भी मान्य हैं।



चित्र 9.6 (a) अवतल दर्पण द्वारा प्रतिबिंब की रचना जबकि बिंब बिंदु P तथा F के बीच स्थित है, तथा (b) उत्तल दर्पण द्वारा प्रतिबिंब की रचना।

उदाहरण 9.1

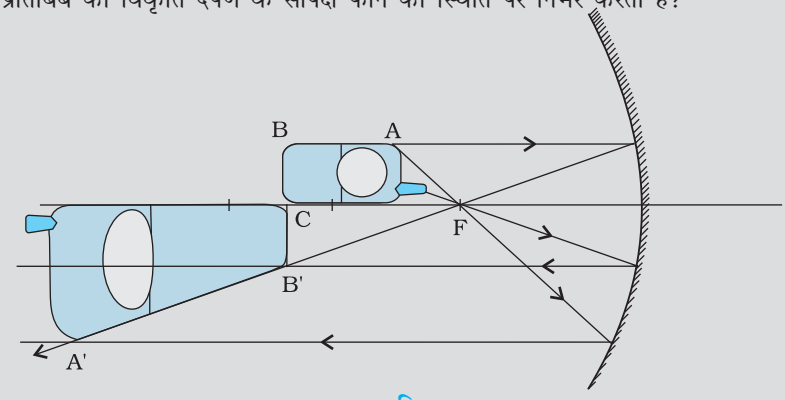
उदाहरण 9.1 मान लीजिए चित्र 9.5 में दर्शाए अवतल दर्पण के परावर्तक पृष्ठ के नीचे का आधा भाग किसी अपारदर्शी (अपरावर्ती) पदार्थ से ढक दिया गया है। दर्पण के सामने स्थित किसी बिंब के दर्पण द्वारा बने प्रतिबिंब पर इसका क्या प्रभाव पड़ेगा?

हल

आप सोच सकते हैं कि प्रतिबिंब में बिंब का आधा भाग दिखाई देगा। परंतु यह मानते हुए कि परावर्तन के नियम दर्पण के शेष भाग पर भी लागू होते हैं, अतः दर्पण द्वारा बिंब का पूर्ण प्रतिबिंब बनेगा। तथापि, क्योंकि परावर्ती पृष्ठ का क्षेत्रफल कम हो गया है। इसलिए प्रतिबिंब की तीव्रता कम हो जाएगी (इस उदाहरण में आधी)।

उदाहरण 9.2

उदाहरण 9.2 किसी अवतल दर्पण के मुख्य अक्ष पर एक मोबाइल फोन रखा है। उचित किरण आरेख द्वारा प्रतिबिंब की रचना दर्शाइए। व्याख्या कीजिए कि आवर्धन एकसमान क्यों नहीं है। क्या प्रतिबिंब की विकृति दर्पण के सापेक्ष फोन की स्थिति पर निर्भर करती है?



चित्र 9.7

हल

चित्र 9.7 में फ़ोन के प्रतिबिंब की रचना का प्रकाश-किरण आरेख दर्शाया गया है। मुख्य अक्ष के लंबवत समतल में स्थित भाग का प्रतिबिंब उसी समतल में होगा। यह उसी साइज़ का होगा, अर्थात B′C = BC। आप स्वयं ही पूर्ण रूप से समझ सकते हैं कि प्रतिबिंब में विकृति क्यों है?

उदाहरण 9.3

उदाहरण 9.3 कोई वस्तु 15 cm वक्रता त्रिज्या के अवतल दर्पण से (i) 10 cm तथा (ii) 5 cm दूरी पर रखी है। प्रत्येक स्थिति में प्रतिबिंब की स्थिति, प्रकृति तथा आवर्धन परिकलित कीजिए।

हल

फोकस दूरी $f = -15/2$ cm $= -7.5$ cm

(i) बिंब दूरी $u = -10$ cm । तब समीकरण (9.7) से प्राप्त होगा

$$\frac{1}{v}+\frac{1}{-10}=\frac{1}{-7.5}$$

अथवा $$v=\frac{10\times 7.5}{-2.5}=-30 \text{ cm}$$

प्रतिबिंब बिंब की दिशा में दर्पण से 30 cm दूरी पर बनेगा।

आवर्धन $$m=-\frac{v}{u}=-\frac{(-30)}{(-10)}=-3$$

प्रतिबिंब आवर्धित, वास्तविक तथा उलटा है।

उदाहरण 9.3

(ii) बिंब दूरी $u = -5$ cm तब समीकरण (9.7) से

$$\frac{1}{v}+\frac{1}{-5}=\frac{1}{-7.5}$$

अथवा $$v=\frac{5\times 7.5}{(7.5-5)}=15 \text{ cm}$$

प्रतिबिंब दर्पण के पीछे 15 cm दूरी पर बनता है। यह प्रतिबिंब आभासी है।

आवर्धन $m = -\frac{v}{u} = -\frac{15}{(-5)} = 3$

यह प्रतिबिंब आवर्धित, आभासी तथा सीधा है।

उदाहरण 9.4

उदाहरण 9.4 मान लीजिए कि आप किसी स्थिर कार में बैठे हैं। आप 2 m वक्रता त्रिज्या के पार्श्व दृश्य दर्पण में किसी धावक को अपनी ओर आता हुआ देखते हैं। यदि धावक 5 m s^{-1} की चाल से दौड़ रहा हो, तो उसका प्रतिबिंब कितनी चाल से दौड़ता प्रतीत होगा जबकि धावक (a) 39 m, (b) 29 m, (c) 19 m, तथा (d) 9 m दूर है।

हल

दर्पण समीकरण (9.7), से हमें प्राप्त होता है

$$v=\frac{fu}{u-f}$$

उत्तल दर्पण के लिए, क्योंकि $R = 2$ m, $f = 1$ m. तब

$$u = -39 \text{ m}, \quad v=\frac{(-39)\times 1}{-39-1}=\frac{39}{40}\text{m}$$

क्योंकि धावक 5 m s^{-1} की अपरिवर्ती चाल से चलता है, 1 s के पश्चात ($u=-39+5=-34$ m) के लिए प्रतिबिंब की स्थिति v होगी (34/35)m,

अत: 1 s में प्रतिबिंब की स्थिति में विस्थापन होगा

$$\frac{39}{40}-\frac{34}{35}=\frac{1365-1360}{1400}=\frac{5}{1400}=\frac{1}{280}\text{m}$$

इसलिए जब धावक दर्पण से 39 m तथा 34 m के बीच में है, तो प्रतिबिंब की औसत चाल है (1/280) m s^{-1}

इसी प्रकार यह देखा जा सकता है कि जब $u = -29$ m, -19 m तथा -9 m है तब जिस चाल से प्रतिबिंब गति करता प्रतीत होगा वह क्रमश:

$$\frac{1}{150}\text{m s}^{-1}, \frac{1}{60}\text{m s}^{-1} \text{ तथा } \frac{1}{10}\text{m s}^{-1} \text{ होंगी।}$$

यद्यपि धावक एक अपरिवर्ती चाल से गतिमान है तथापि धावक दर्पण के जैसे-जैसे निकट आएगा उसके प्रतिबिंब की चाल में पर्याप्त वृद्धि प्रतीत होती जाएगी। यह परिघटना किसी स्थिर कार अथवा स्थिर बस में बैठा कोई भी व्यक्ति देख सकता है। यदि पीछे से आने वाला वाहन एक अपरिवर्ती चाल से लगातार पास आ रहा हो तो, चलते हुए वाहनों में इसी प्रकार की परिघटना देखी जा सकती है।

9.3 अपवर्तन

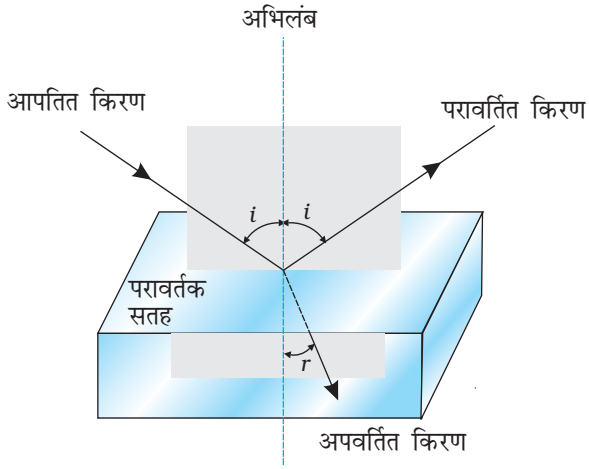
जब किसी पारदर्शी माध्यम में गमन करता कोई प्रकाश किरण-पुंज किसी दूसरे पारदर्शी माध्यम से टकराता है, तो प्रकाश का एक भाग पहले माध्यम में वापस परावर्तित हो जाता है। जबकि शेष भाग दूसरे माध्यम में प्रवेश करता है। हम प्राय: किसी किरण-पुंज को प्रकाश की किरण द्वारा निरूपित करते हैं। जब कोई प्रकाश की किरण एक माध्यम से दूसरे माध्यम में तिर्यक आपतित होकर गमन

करती है तो दोनों माध्यमों के अंतरापृष्ठ पर इसके संचरण की दिशा परिवर्तित हो जाती है। इस परिघटना को *प्रकाश का अपवर्तन* कहते हैं। स्नेल ने प्रयोगों द्वारा अपवर्तन के निम्नलिखित नियम प्रतिपादित किए।

(i) आपतित किरण, अपवर्तित किरण तथा अंतरापृष्ठ के आपतन बिंदु पर अभिलंब, एक ही समतल में होते हैं।

(ii) किन्हीं दो माध्यमों के युगल के लिए, आपतन कोण की ज्या (sine) तथा अपवर्तन कोण की ज्या का अनुपात एक स्थिरांक होता है।

याद रखिए, आपतन कोण (i) तथा अपवर्तन कोण (r) वे कोण हैं जो आपतित किरण तथा अपवर्तित किरण क्रमशः अभिलंब के साथ बनाती हैं। अतः



चित्र 9.8 प्रकाश का अपवर्तन तथा परावर्तन।

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n_{21} \qquad (9.10)$$

यहाँ n_{21} एक स्थिरांक है, जिसे पहले माध्यम के सापेक्ष दूसरे माध्यम का *अपवर्तनांक* कहते हैं। समीकरण (9.10) अपवर्तन के *स्नेल के नियम* के नाम से जानी जाती है। ध्यान देने योग्य बात यह है कि n_{21} दो माध्यम के युगल का अभिलक्षण है (तथा यह प्रकाश की तरंगदैर्घ्य पर भी निर्भर करता है), परंतु यह आपतन कोण पर निर्भर नहीं करता।

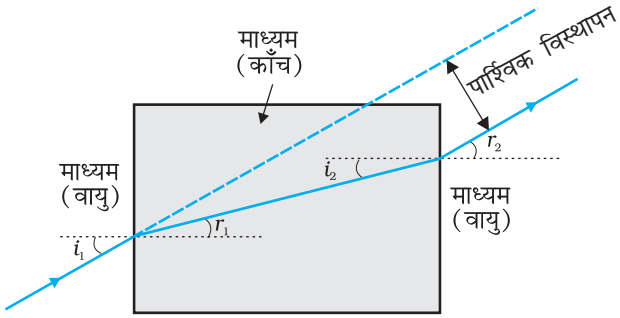
समीकरण (9.10) से यदि $n_{21} > 1$, $r < i$, अर्थात अपवर्तित किरण अभिलंब की ओर मुड़ जाती है। इस दशा में माध्यम 2 को माध्यम 1 की तुलना में *प्रकाशतः सघन* (अथवा संक्षेप में, *सघन*) माध्यम कहते हैं। इसके विपरीत यदि $n_{21} < 1$, $r > i$, तो अपवर्तित किरण अभिलंब से दूर मुड़ती है। यह वह स्थिति है जिसमें आपतित किरण किसी सघन माध्यम से गमन करती हुई विरल माध्यम में अपवर्तित होती है।

नोट : *प्रकाशिक घनत्व तथा द्रव्यमान घनत्व के बीच भ्रम उत्पन्न नहीं होना चाहिए। द्रव्यमान घनत्व एकांक आयतन का द्रव्यमान है। यह संभव है कि किसी प्रकाशिक सघन माध्यम का द्रव्यमान घनत्व प्रकाशिक विरल माध्यम के द्रव्यमान घनत्व से कम हो (प्रकाशिक घनत्व दो माध्यमों में प्रकाश की चाल का अनुपात है)। उदाहरण के लिए, तारपीन का तेल तथा जल। तारपीन के तेल का द्रव्यमान घनत्व जल के द्रव्यमान घनत्व से कम होता है। लेकिन इसका प्रकाशिक घनत्व अधिक होता है।*

यदि n_{21} माध्यम 2 का माध्यम 1 के सापेक्ष अपवर्तनांक है तथा n_{12} माध्यम 1 का माध्यम 2 के सापेक्ष अपवर्तनांक है, तब यह स्पष्ट है कि

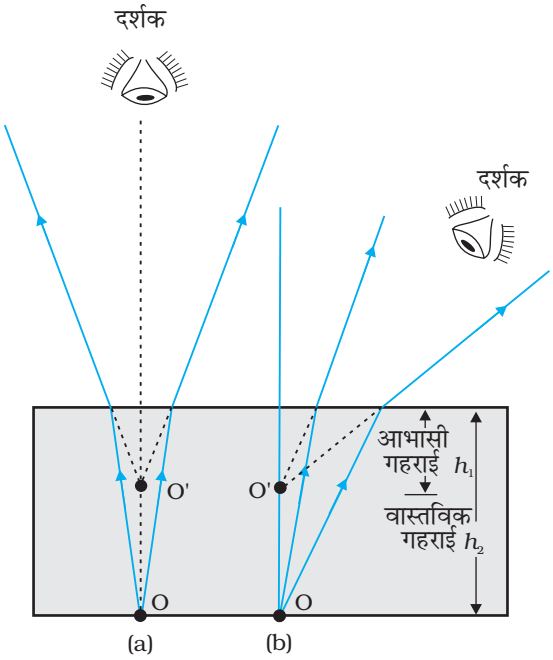
$$n_{12} = \frac{1}{n_{21}} \qquad (9.11)$$

यदि n_{32} माध्यम 3 का माध्यम 2 के सापेक्ष अपवर्तनांक है तो यह भी स्पष्ट है कि $n_{32} = n_{31} \times n_{12}$, यहाँ n_{31} माध्यम 3 का माध्यम 1 के सापेक्ष अपवर्तनांक है।



चित्र 9.9 समांतर फलकों के स्लैब से अपवर्तित किसी प्रकाश किरण का पार्श्विक विस्थापन।

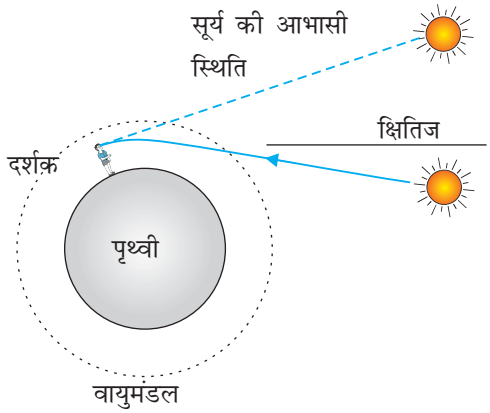
अपवर्तन के नियमों पर आधारित कुछ प्रारंभिक परिणाम तुरंत प्राप्त किए जा सकते हैं। किसी आयताकार स्लैब में, अपवर्तन दो अंतरापृष्ठों पर होता है (वायु-काँच तथा काँच-वायु)। चित्र 9.9



चित्र 9.10 (a) अभिलंबवत, तथा (b) तिर्यक दर्शन के लिए आभासी गहराई।

द्वारा यह आसानी से देखा जा सकता है कि $r_2 = i_1$, अर्थात निर्गत किरण आपतित किरण के समांतर होती है–आपतित किरण के सापेक्ष निर्गत किरण में कोई विचलन नहीं होता, परंतु इसमें आपतित किरण के सापेक्ष पार्श्विक विस्थापन हो जाता है। एक दूसरा सुपरिचित प्रेक्षण यह भी है कि जल से भरे किसी तालाब की पेंदी ऊपर उठी प्रतीत होती है (चित्र 9.10)। अभिलंबवत दिशा के निकट से देखने पर यह दर्शाया जा सकता है कि आभासी गहराई (h_1) वास्तविक गहराई (h_2) को माध्यम (जल) के अपवर्तनांक से विभाजित करने पर प्राप्त होती है।

प्रकाश का वायुमंडलीय अपवर्तन अनेक रोचक परिघटनाएँ दर्शाता है। उदाहरण के लिए, प्रकाश के अपवर्तन के कारण ही सूर्य वास्तविक सूर्योदय से कुछ पहले दृष्टिगोचर होने लगता है तथा वास्तविक सूर्यास्त के कुछ समय पश्चात तक दृष्टिगोचर होता है (चित्र 9.11)। वास्तविक सूर्योदय से हमारा तात्पर्य है क्षितिज से सूर्य का ऊपर उठना। चित्र 9.11 में क्षितिज के सापेक्ष सूर्य की वास्तविक एवं आभासी स्थितियाँ दर्शायी गई हैं। चित्र में इस प्रभाव को समझने की दृष्टि से आवर्धित करके दर्शाया गया है। निर्वात के सापेक्ष वायु का अपवर्तनांक 1.00029 है। इसके कारण सूर्य की दिशा में लगभग आधे डिग्री (1/2°) का आभासी विस्थापन होता है जिसका वास्तविक सूर्यास्त तथा आभासी सूर्यास्त में तदनुरूपी अंतर लगभग 2 मिनट है। सूर्यास्त तथा सूर्योदय के समय सूर्य का आभासी चपटापन (अंडाकार आकृति) भी इसी परिघटना के कारण ही है।



चित्र 9.11 वायुमंडलीय अपवर्तन के कारण वास्तविक समय से पूर्व सूर्योदय तथा वास्तविक समय के पश्चात सूर्यास्त का प्रतीत होना।

उदाहरण 9.5

उदाहरण 9.5 पृथ्वी अपने अक्ष पर एक घूर्णन करने में 24 h लेती है। सूर्य के सापेक्ष पृथ्वी से देखे जाने पर 1° विस्थापित होने में कितना समय लगता है?

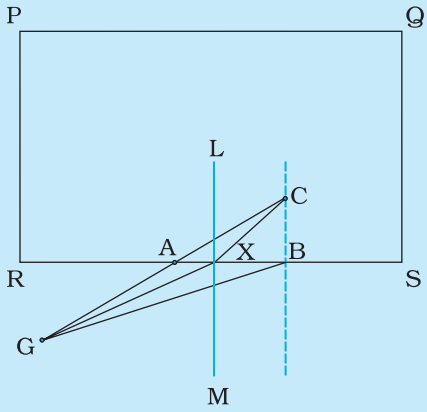
हल

360° विस्थापित होने के लिए लिया गया समय = 24 h

1° विस्थापित होने के लिए लिया गया समय = (24/360) h = 4 min

डूबता हुआ बच्चा, जीवन रक्षक तथा स्नेल का नियम

चित्र में दर्शाए अनुसार एक आयताकार तरण ताल PQRS पर विचार करें। ताल के बाहर बिंदु G पर बैठा एक जीवन रक्षक एक बच्चे को बिंदु C पर डूबते हुए देखता है। रक्षक, बच्चे तक कम-से-कम समय में पहुँचना चाहता है। मान लीजिए G तथा C के बीच ताल का पार्श्व SR है। क्या उसको G तथा C के बीच सरल रेखीय पथ GAC को अपनाना चाहिए अथवा GBC को जिसमें जल में पथ BC सबसे छोटा होगा, या कोई अन्य पथ GXC? वह जानता है कि उसकी धरती पर दौड़ने की चाल v_1 उसके तैरने की चाल v_2 से अधिक है।



मान लीजिए जीवन रक्षक जल में बिंदु X पर प्रवेश करता है। मान लीजिए GX = l_1 तथा XC = l_2। तब G से C तक पहुँचने में लिया गया समय होगा

$$t = \frac{l_1}{v_1} + \frac{l_2}{v_2}$$

इस समय को न्यूनतम बनाने के लिए इसका (X के निर्देशांक के सापेक्ष) अवकलन करना होगा तथा बिंदु X की उस स्थिति को ज्ञात करना होगा ताकि t का मान न्यूनतम हो। ये समस्त परिकलन करने पर (जिसे हम यहाँ पर छोड़ रहे हैं) हमें ज्ञात होता है कि रक्षक को जल में उस बिंदु पर प्रवेश करना चाहिए जहाँ स्नेल का नियम संतुष्ट होता है। इसे समझने के लिए SR के बिंदु X पर एक लंब LM खींचिए। मान लीजिए $\angle GXM = i$ तथा $\angle CXL = r$। तब हम देख सकते हैं कि t न्यूनतम होगा जब

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}$$

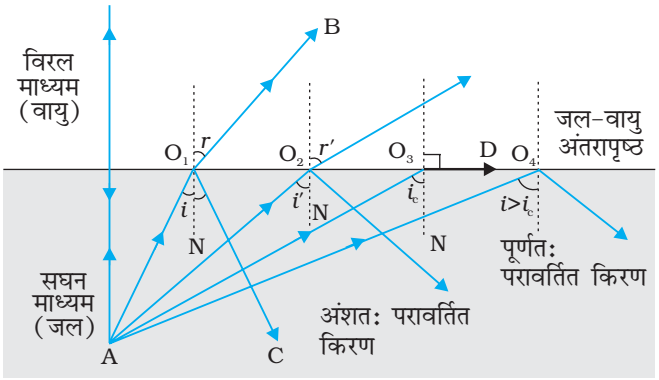
प्रकाश के लिए v_1/v_2, निर्वात में प्रकाश का वेग तथा माध्यम में प्रकाश के वेग का अनुपात, माध्यम का अपवर्तनांक n है।

संक्षेप में, चाहे तरंग हो या कण अथवा कोई मनुष्य, जब भी दो माध्यम तथा दो वेग सम्मिलित होते हैं तो न्यूनतम समय के लिए स्नेल के नियम को अपनाना आवश्यक है।

9.4 पूर्ण आंतरिक परावर्तन

जब प्रकाश किसी प्रकाशतः सघन माध्यम से प्रकाशतः विरल माध्यम में गमन करता है, तब अंतरापृष्ठ पर वह अंशतः वापस उसी माध्यम में परावर्तित हो जाता है तथा अंशतः दूसरे माध्यम में अपवर्तित हो जाता है। इस परावर्तन को *आंतरिक परावर्तन* कहते हैं।

जब कोई प्रकाश किरण सघन माध्यम से विरल माध्यम में प्रवेश करती है तो यह अभिलंब से दूर मुड़ जाती है, उदाहरणार्थ, चित्र 9.12 में किरण AO_1B आपतित किरण AO_1 अंशतः परावर्तित (O_1C) तथा अंशतः पारगमित अथवा अपवर्तित (O_1B) होती है, तथा अपवर्तन कोण (r) आपतन कोण (i) से अधिक होता है। जैसे-जैसे आपतन कोण में वृद्धि होती है, अपवर्तन कोण में भी वृद्धि होती है, जब तक कि किरण AO_3 के लिए अपवर्तन कोण का मान $\pi/2$ (90°) हो जाए। अपवर्तित किरण अभिलंब से इतनी अधिक मुड़ जाती है कि वह दोनों माध्यमों के अंतरापृष्ठ को छूने लगती है। इसे चित्र 9.12 में किरण AO_3D द्वारा दर्शाया गया है। यदि आपतन कोण में इससे अधिक वृद्धि की जाती है (उदाहरण के लिए किरण AO_4) तो अपवर्तन संभव नहीं होता तथा आपतित किरण पूर्णतः परावर्तित हो जाती है। इसे *पूर्ण आंतरिक परावर्तन* कहते हैं। जब किसी पृष्ठ द्वारा प्रकाश परावर्तित होता है तो सामान्यतः इसका कुछ भाग पारगमित हो जाता है। इसलिए परावर्तक पृष्ठ चाहे जितना



चित्र 9.12 सघन माध्यम (जल) तथा विरल माध्यम (वायु) के अंतरापृष्ठ पर बिंदु A (सघन माध्यम में) से विभिन्न कोणों पर आपतित किरणों का अपवर्तन तथा पूर्ण आंतरिक परावर्तन।

भी चिकना क्यों न हो, परावर्तित किरण सदैव आपतित किरण से कम तीव्रता की होती है। दूसरी ओर पूर्ण आंतरिक परावर्तन में प्रकाश का कोई पारगमन नहीं होता।

वह आपतन कोण जिसका तदनुरूपी अपवर्तन कोण 90° होता है, जैसे $\angle AO_3N$, दिए हुए माध्यमों के युगल के लिए *क्रांतिक कोण* (i_c) कहलाता है। स्नेल के नियम [समीकरण (9.10)] के अनुसार हम देखते हैं कि यदि आपेक्षिक अपवर्तनांक एक से कम है, तो क्योंकि $\sin r$ का अधिकतम मान एक होता है, अत: $\sin i$ के मान की कोई ऊपरी सीमा है जिस तक यह नियम लागू किया जा सकता है। यह है $i = i_c$ इस प्रकार

$$\sin i_c = n_{21} \qquad (9.12)$$

i के i_c से अधिक मानों के लिए स्नेल के अपवर्तन के नियम को लागू नहीं किया जा सकता, अत: कोई अपवर्तन संभव नहीं होता।

सघन माध्यम 2 का विरल माध्यम 1 के सापेक्ष अपवर्तनांक होगा $n_{12} = 1/\sin i_c$। सारणी 9.1 में कुछ प्ररूपी क्रांतिक कोणों को सूचीबद्ध किया गया है।

सारणी 9.1 कुछ पारदर्शी माध्यमों का वायु के सापेक्ष क्रांतिक कोण

पदार्थ माध्यम	अपवर्तनांक	क्रांतिक कोण
जल	1.33	48.75°
क्राउन काँच	1.52	41.14°
सघन फ्लिंट काँच	1.62	37.31°
हीरा	2.42	24.41°

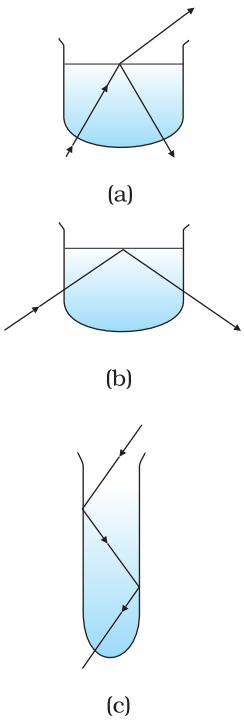
पूर्ण आंतरिक परावर्तन के लिए एक प्रदर्शन

सभी प्रकाशिक परिघटनाओं को आजकल आसानी से उपलब्ध लेसर टॉर्च या संकेतक का प्रयोग करके बड़ी सरलता से प्रदर्शित किया जा सकता है। एक काँच का बीकर लीजिए जिसमें स्वच्छ जल भरा हो। साबुन के एक टुकड़े से जल को कई बार हिलाइए जिससे यह थोड़ा आविल हो जाए। एक लेसर संकेतक लीजिए और इसके किरण-पुंज को आविल जल से गुज़ारिए। आप देखेंगे कि जल के अंदर किरण-पुंज का पथ चमकीला दिखाई देता है।

किरण-पुंज को बीकर के नीचे से इस प्रकार डालिए कि यह दूसरे सिरे पर जल के ऊपरी पृष्ठ पर टकराए। क्या आप देख पाते हैं कि इसमें आंशिक परावर्तन (जो मेज़ के नीचे एक बिंदु के रूप में दिखाई देगा) तथा आंशिक अपवर्तन (जो वायु में निकलकर छत पर एक बिंदु के रूप में दिखाई देता है) होता है [चित्र 9.13 (a)] ? अब लेसर किरण-पुंज को बीकर के एक ओर से इस प्रकार डालिए कि यह जल के ऊपरी पृष्ठ पर तिर्यक टकराए [चित्र 9.13 (b)]। लेसर किरण-पुंज की दिशा को इस प्रकार समायोजित कीजिए कि आपको ऐसा कोण प्राप्त हो जाए जिससे जल के पृष्ठ के ऊपर अपवर्तन पूर्ण रूप से समाप्त हो जाए तथा किरण-पुंज पूर्ण रूप से जल में वापस परावर्तित हो जाए। यह सरलतम रूप में पूर्ण आंतरिक परावर्तन है।

इस जल को एक लंबी परखनली में उलटिए तथा लेसर प्रकाश को इसके ऊपर से डालिए जैसा कि चित्र 9.13 (c) में दर्शाया गया है। लेसर किरण-पुंज की दिशा को इस प्रकार समायोजित कीजिए कि प्रत्येक बार जब यह परखनली की दीवारों से टकराए तो इसका पूर्ण आंतरिक परावर्तन हो। यह दृश्य ऐसा ही है जैसा कि प्रकाशिक तंतुओं में होता है।

ध्यान रखिए कि लेसर किरण-पुंज में कभी भी सीधा न देखें और न ही इसे किसी के चेहरे पर डालें।

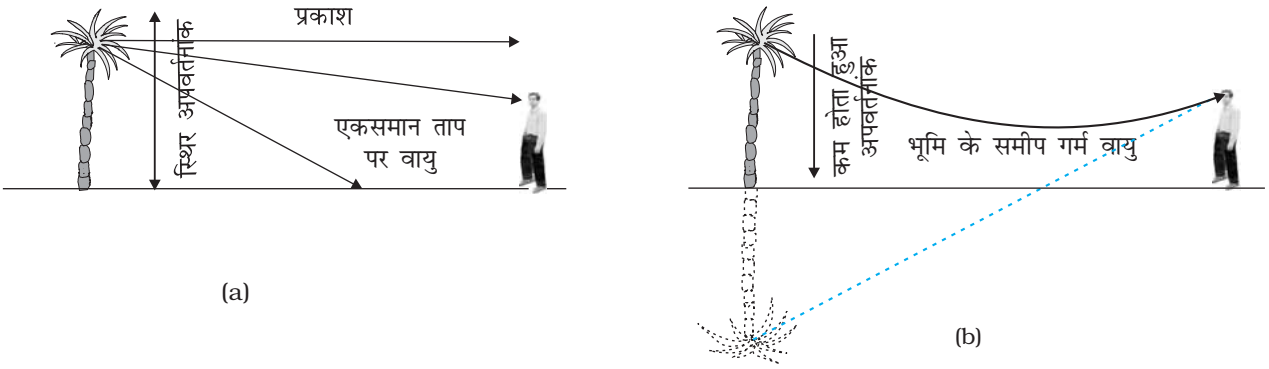


चित्र 9.13 लेसर किरण-पुंज से जल में पूर्ण आंतरिक परावर्तन का प्रेक्षण करना (काँच का बीकर अत्यंत पतला होने के कारण इसमें होने वाले अपवर्तन को नगण्य माना गया है)।

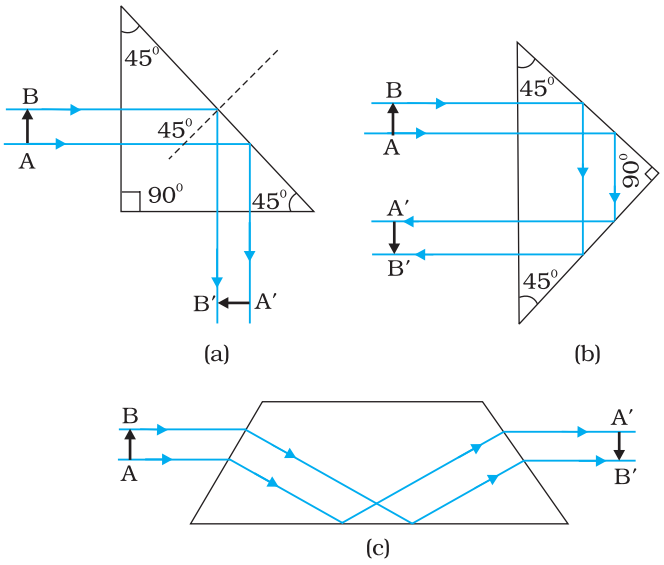
9.4.1 प्रकृति में पूर्ण आंतरिक परावर्तन तथा इसके प्रौद्योगिकीय अनुप्रयोग

(i) *मरीचिका :* गर्मियों के गर्म दिनों में पृथ्वी के निकट की वायु अपने से ऊपर की वायु की तुलना में अधिक गर्म हो जाती है। वायु का अपवर्तनांक घनत्व के साथ बढ़ जाता है। गर्म वायु कम सघन होती है तथा उसका अपवर्तनांक ठंडी वायु की तुलना में कम होता है। यदि वायु प्रवाह धीमा है, अर्थात, वायु शांत है तो वायु की विभिन्न परतों का प्रकाशिक घनत्व ऊँचाई के साथ बढ़ता है। परिणामस्वरूप, किसी ऊँची वस्तु, जैसे किसी पेड़ से आता हुआ प्रकाश ऐसे माध्यम में गमन करता है जिसका अपवर्तनांक भूमिपृष्ठ की ओर घटता जाता है। अत: इस प्रकार की वस्तु से आने वाली प्रकाश की किरण उत्तरोत्तर अभिलंब से दूर मुड़ती जाती है और यदि भूमिपृष्ठ के पास की वायु के लिए आपतन कोण क्रांतिक कोण से अधिक हो जाए तो यह पूर्ण आंतरिक परावर्तित होती है। इसे चित्र 9.14 में दर्शाया गया है। दूरस्थ प्रेक्षक के लिए, प्रकाश भूमिपृष्ठ के कहीं नीचे से आता हुआ प्रतीत होता है। प्रेक्षक स्वाभाविक रूप से यही मान लेता है कि यह प्रकाश भूमिपृष्ठ से ही, जैसे, ऊँची वस्तु के समीप जल से भरे किसी तालाब या पोखर से परावर्तित होकर उस तक पहुँच रहा है। किसी दूरस्थ वस्तु का इस प्रकार बना उलटा प्रतिबिंब दृष्टिभ्रम उत्पन्न करता है। इस परिघटना को *मरीचिका* कहते हैं। इस प्रकार की मरीचिका तप्त मरुस्थलों में अत्यंत सामान्य है। गर्मियों के दिनों में, किसी बस या कार में चलते समय सड़क पर, विशेष रूप से महामार्गों पर, सड़क का दूर का कोई भाग गीला प्रतीत होता है। लेकिन जब आप उस स्थान पर पहुँचते हैं, तो आपको गीलेपन का कोई प्रमाण नहीं मिलता। यह भी मरीचिका के कारण है।

(ii) *हीरा* : हीरे अपनी भव्य चमक के लिए प्रसिद्ध हैं। इनकी चमक मुख्य रूप से उनके भीतर प्रकाश के पूर्ण आंतरिक परावर्तन के कारण है। हीरे-वायु अंतरापृष्ठ के लिए क्रांतिक कोण ($\cong 24.4°$) का मान बहुत कम है। इसलिए यदि एक बार हीरे में प्रकाश प्रवेश कर जाए तो इसके अंदर



चित्र 9.14 (a) किसी प्रेक्षक को पेड़ का उन परिस्थितियों में दिखाई देना जबकि भूमिपृष्ठ के ऊपर की वायु एकसमान ताप पर है। (b) जब धरती के निकट वायु की परतें परिवर्ती ताप पर होती हैं तथा धरती के पास की परत सबसे गरम होती है तो दूरस्थ पेड़ से आने वाले प्रकाश का पूर्ण आंतरिक परावर्तन होता है।



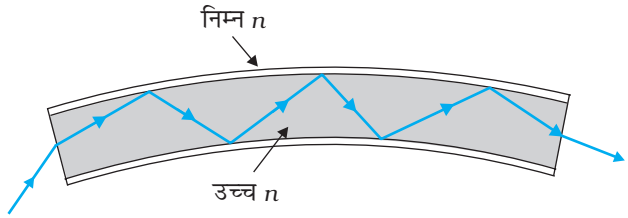
चित्र 9.15 किरणों को $\pi/2$ तथा π पर मोड़ने के लिए या प्रतिबिंब के साइज़ में परिवर्तन किए बगैर उलटने के लिए डिज़ाइन किए गए प्रिज्मों में पूर्ण आंतरिक परावर्तन का उपयोग किया जाता है।

प्रकाश के पूर्ण आंतरिक परावर्तन होने की अत्यधिक संभावनाएँ होती हैं। प्रकृति में पाए जाने वाले विरले हीरे ही अपनी सर्वविदित चमक दर्शाते हैं। हीरे की चमक-दमक हीरा तराशने वाले कारीगरों की तकनीकी दक्षता पर निर्भर होती है। किसी हीरे को उचित प्रकार से काटकर उसके भीतर बहुल आंतरिक परावर्तन कराए जा सकते हैं।

(iii) *प्रिज़्म* : प्रकाश को 90° अथवा 180° पर मोड़ने के लिए डिज़ाइन किए गए प्रिज्मों में पूर्ण आंतरिक परावर्तन का उपयोग किया जाता है [चित्र 9.15 (a) तथा (b)]। ऐसे प्रिज़्म को प्रतिबिंब के साइज़ में बिना कोई परिवर्तन किए उलटने के लिए भी प्रयोग किया जाता है [चित्र 9.15 (c)]। पहली दो स्थितियों के लिए, प्रिज़्म के पदार्थ के क्रांतिक कोण i_c को 45° से कम होना चाहिए। सारणी 9.1 देखने पर हम यह पाते हैं कि दोनों ही प्रकार के काँच क्राउन तथा फ़्लिंट के लिए यह सत्य है।

(iv) *प्रकाशिक तंतु* : आजकल प्रकाशिक तंतुओं का, श्रव्य तथा दृश्य संकेतों को लंबी दूरी तक संचरित करने के लिए व्यापक रूप से उपयोग किया जाता है। प्रकाशिक तंतुओं में भी पूर्ण आंतरिक परावर्तन की परिघटना का उपयोग किया जाता है। प्रकाशिक तंतु उच्च गुणता के संयुक्त काँच/क्वार्ट्ज़ तंतुओं से रचित किया जाता है। प्रत्येक तंतु में एक क्रोड (core) तथा आच्छद (cladding) होता है। क्रोड के पदार्थ का अपवर्तनांक आच्छद के अपवर्तनांक की तुलना में अधिक होता है।

जब प्रकाश के रूप में कोई संकेत उचित कोण पर तंतु के एक सिरे पर दिष्ट होता है तब यह उसकी लंबाई के अनुदिश बार-बार पूर्ण आंतरिक परावर्तित होता है तथा अंततः दूसरे सिरे से बाहर निकल आता है (चित्र 9.16)। क्योंकि प्रत्येक चरण में प्रकाश का पूर्ण आंतरिक परावर्तन होता है इसलिए प्रकाश संकेत की तीव्रता में कोई विशेष हानि नहीं होती। प्रकाश तंतु इस प्रकार बनाए जाते हैं कि एक ओर के आंतरिक पृष्ठ पर परावर्तित होने के पश्चात दूसरे पृष्ठ पर प्रकाश क्रांतिक कोण से अधिक कोण पर आपतित होता है। यहाँ तक कि तंतु में मुड़ाव होने पर भी प्रकाश तंतु के भीतर उसकी लंबाई के अनुदिश सरलतापूर्वक गमन कर सकता है। इस प्रकार एक प्रकाश तंतु प्रकाशित पाइप (लाइट पाइप) के रूप में प्रयोग किया जा सकता है।



चित्र 9.16 जब प्रकाश किसी प्रकाशिक तंतु में चलता है तो इसका क्रमिक पूर्ण आंतरिक परावर्तन होता है।

प्रकाशिक तंतुओं के बंडल (गुच्छ) का कई प्रकार से उपयोग किया जा सकता है। प्रकाशिक तंतुओं का बड़े पैमाने पर वैद्युत संकेतों, जिन्हें उचित ट्रांसड्यूरों द्वारा प्रकाश में परिवर्तित कर लेते हैं, के प्रेषण तथा अभिग्रहण में उपयोग किया जाता है। स्पष्ट है कि प्रकाशिक तंतुओं का उपयोग प्रकाशिक संकेत प्रेषण के लिए भी किया जा सकता है। उदाहरण के लिए, इन्हें आंतरिक अंगों; जैसे– ग्रसिका, आमाशय तथा आंत्रों के दृश्य अवलोकन के लिए 'लाइट पाइप' के रूप में प्रयोग किया जाता है। आपने सामान्य रूप से उपलब्ध महीन प्लास्टिक तंतुओं से बने सजावटी लैंप देखे होंगे। इन प्लास्टिक के तंतुओं के स्वतंत्र सिरे एक फव्वारे जैसी संरचना बनाते हैं। इन तंतुओं का

दूसरा सिरा एक विद्युत लैंप के ऊपर जुड़ा होता है। जब लैंप के स्विच को 'ऑन' करते हैं, तो प्रकाश प्रत्येक तंतु के नीचे से चलता हुआ इसके स्वतंत्र सिरे की नोक पर एक प्रकाश बिंदु के रूप में दिखाई देता है। इस प्रकार के सजावटी लैंपों के तंतु प्रकाशिक तंतु हैं।

प्रकाशिक तंतुओं के निर्माण में प्रमुख आवश्यकता यह है कि इनके भीतर लंबी दूरियाँ तय करते समय प्रकाश का अवशोषण बहुत कम होना चाहिए। इसे क्वार्ट्ज़ जैसे पदार्थों के शोधन तथा विशिष्ट विरचन द्वारा बनाया जाता है। सिलिका काँच तंतुओं में 1 km लंबे तंतु में प्रकाश के 95% से भी अधिक भाग को संचरित करना संभव है। (इसकी तुलना 1 km मोटाई के खिड़की के काँच के ब्लॉक में जितने प्रतिशत प्रकाश के संचरण की आप अपेक्षा करते हैं, से कीजिए।)

9.5 गोलीय पृष्ठों तथा लेंसों द्वारा अपवर्तन

अब तक हमने समतल अंतरापृष्ठों पर अपवर्तन के विषय में विचार किया है। अब हम दो पारदर्शी माध्यमों के गोलीय अंतरापृष्ठों पर अपवर्तन के विषय में विचार करेंगे। किसी गोलीय पृष्ठ के अत्यंत सूक्ष्म भाग को समतलीय माना जा सकता है तथा उसके पृष्ठ के प्रत्येक बिंदु पर समान अपवर्तन के नियमों का अनुप्रयोग किया जा सकता है। गोलीय दर्पण द्वारा परावर्तन की ही भाँति आपतन बिंदु पर अभिलंब पृष्ठ के उस बिंदु पर स्पर्शी तल के लंबवत होता है, तथा वह इसीलिए पृष्ठ के वक्रता केंद्र से गुज़रता है। हम पहले एकल गोलीय पृष्ठ द्वारा अपवर्तन पर विचार करेंगे तथा इसके पश्चात पतले लेंसों की चर्चा करेंगे। कोई पतला लेंस दो गोलीय पृष्ठों से घिरा पारदर्शी माध्यम होता है; जिसका कम से कम एक पृष्ठ अवश्य गोलीय होना चाहिए। एक गोलीय पृष्ठ द्वारा निर्मित प्रतिबिंब के लिए सूत्र का अनुप्रयोग, किसी लेंस के दो पृष्ठों पर, क्रमिक रूप में करके हम पतले लेंसों के लिए लेंस मेकर सूत्र तथा उसके पश्चात लेंस सूत्र प्राप्त करेंगे।

9.5.1 किसी गोलीय पृष्ठ पर अपवर्तन

चित्र 9.17 में वक्रता त्रिज्या R तथा वक्रता केंद्र C के गोलीय पृष्ठ के मुख्य अक्ष पर स्थित किसी वस्तु के बिंदु O के प्रतिबिंब I की रचना की ज्यामिति दर्शायी गई है। प्रकाश किरणें n_1 अपवर्तनांक के किसी माध्यम से आपतित होकर n_2 अपवर्तनांक के किसी अन्य माध्यम में जाती हैं। पहले की भाँति, हम पृष्ठ का द्वारक (अथवा पार्श्व साइज़) अन्य संबद्ध दूरियों की तुलना में काफ़ी छोटा लेते हैं ताकि आवश्यकतानुसार लघु कोण सन्निकटन किया जा सके। विशेष रूप से हम NM को N से मुख्य अक्ष पर लंब की लंबाई के लगभग बराबर लेंगे। यहाँ पर

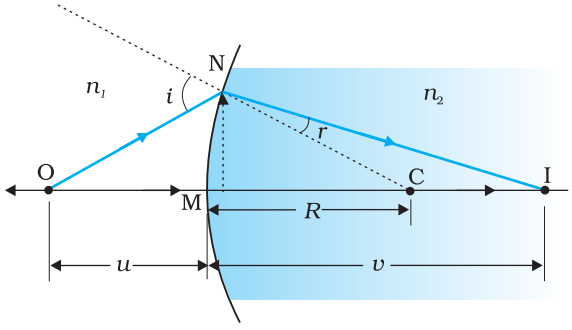
$$\tan\angle\text{NOM} = \frac{\text{MN}}{\text{OM}}$$

$$\tan\angle\text{NCM} = \frac{\text{MN}}{\text{MC}}$$

$$\tan\angle\text{NIM} = \frac{\text{MN}}{\text{MI}}$$

अब ΔNOC के लिए, i बहिर्कोण है। अत:

$$i = \angle\text{NOM} + \angle\text{NCM}$$



चित्र 9.17 दो माध्यमों को पृथक करने वाले किसी गोलीय पृष्ठ पर अपवर्तन।

प्रकाश स्रोत तथा प्रकाशमिति

यह सर्वविदित है कि परमशून्य ताप से ऊपर रखी वस्तुएँ वैद्युत चुंबकीय विकिरण उत्सर्जित कर सकती हैं। जिस तरंगदैर्घ्य परिसर में वस्तुएँ विकिरण उत्सर्जित करेंगी वह इसके परम ताप पर निर्भर करता है। किसी तप्तपिंड द्वारा उत्सर्जित विकिरण, उदाहरण के लिए, कोई टंग्स्टेन तंतु लैंप जिसका ताप 2850 K है, आंशिक रूप से अदृश्य हैं तथा मुख्यत: अवरक्त (अथवा ऊष्मा) भाग में हैं। जैसे-जैसे पिंड का ताप बढ़ता है, इसके द्वारा उत्सर्जित विकिरण दृश्य भाग में आ जाते हैं। सूर्य जिसके पृष्ठ का ताप लगभग 5500 K है, विकिरण उत्सर्जित करता है। इसकी ऊर्जा का तरंगदैर्घ्य के फलन के रूप में खींचा गया ग्राफ़ $\lambda = 550$ nm पर एक शिखर दर्शाता है जो हरे वर्ण के संगत है तथा लगभग दृश्य क्षेत्र के मध्य में है। किसी दिए गए पिंड का ऊर्जा-तरंगदैर्घ्य वितरण ग्राफ़ किसी तरंगदैर्घ्य पर शिखर दर्शाता है जो कि उस पिंड के परम ताप के व्युत्क्रमानुपाती होता है।

मानव नेत्र द्वारा अनुभव किए गए प्रकाश की माप *प्रकाशमिति* कहलाती है। प्रकाशमिति शरीर क्रियात्मक परिघटना की माप है जो मानव नेत्र द्वारा प्रकाश का उद्दीपन और जिसका दृक तंत्रिका (optic nerves) द्वारा संचरण तथा मस्तिष्क द्वारा विश्लेषण होता है। प्रकाशमिति की तीन प्रमुख भौतिक राशियाँ – (i) स्रोत की *ज्योति तीव्रता*, (ii) स्रोत से प्रवाहित प्रकाश अथवा *ज्योति फ्लक्स*, तथा (iii) पृष्ठ का *प्रदीप्त घनत्व* हैं। *ज्योति तीव्रता* (I) का SI मात्रक कैंडेला (cd) है। कैंडेला किसी दिशा में ज्योति की वह तीव्रता है जो 540×10^{12} Hz आवृत्ति के एकवर्णीय विकिरण के स्रोत से उत्सर्जित होती हो तथा उसी दिशा में जिसकी विकिरण तीव्रता (1/683) वाट प्रति स्टेरेडियन हो। यदि कोई प्रकाश स्रोत एक स्टेरेडियन के घन कोण में एक कैंडेला ज्योति तीव्रता का प्रकाश उत्सर्जित करता है तो उस घन कोण में उत्सर्जित कुल ज्योति फ्लक्स एक *ल्यूमेन* (lm) होता है। 100 वाट का मानक ताप दीप्त प्रकाश बल्ब लगभग 1700 ल्यूमेन उत्सर्जित करता है।

प्रकाशमिति में प्रदीप्ति घनत्व ही एकमात्र ऐसा प्राचल है जिसे सीधा मापा जा सकता है। इसे किसी पृष्ठ के इकाई क्षेत्रफल पर आपतित ज्योति फ्लक्स (lm/m^2 अथवा *लक्स*) द्वारा परिभाषित किया जाता है। अधिकांश प्रकाशमापी इस भौतिक राशि को मापते हैं। किसी I ज्योति तीव्रता के स्रोत द्वारा उत्पन्न प्रदीप्ति घनत्व का $E = I/r^2$ द्वारा व्यक्त किया जाता है। यहाँ r पृष्ठ से स्रोत के बीच की लंबवत दूरी है। उत्सर्जी अथवा परावर्ती चपटे पृष्ठों की द्युति (brightness) के अभिलक्षणों को दर्शाने के लिए एक भौतिक राशि जिसे *ज्योतिर्मयता* (L) कहते हैं, का उपयोग करते हैं। इसका मात्रक cd/m^2 है (जिसे उद्योग में 'nit' भी कहते हैं। किसी अच्छे LCD कंप्यूटर मॉनीटर की द्युति लगभग 250 nits होती है।

$$i = \frac{MN}{OM} + \frac{MN}{MC} \qquad (9.13)$$

इसी प्रकार

$$r = \angle NCM - \angle NIM$$

$$\text{अर्थात } r = \frac{MN}{MC} - \frac{MN}{MI} \qquad (9.14)$$

अब स्नेल के नियम के अनुसार

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

अथवा कोणों के छोटे मानों के लिए

$$n_1 i = n_2 r$$

समीकरणों (9.13) तथा (9.14) से i तथा r के मान रखने पर हमें प्राप्त होता है

$$\frac{n_1}{\text{OM}}+\frac{n_2}{\text{MI}} = \frac{n_2-n_1}{\text{MC}} \qquad (9.15)$$

यहाँ OM, MI तथा MC दूरियों के परिमाणों को निरूपित करते हैं। कार्तीय चिह्न परिपाटी का अनुप्रयोग करने पर,

$\text{OM} = -u$, $\text{MI} = +v$, $\text{MC} = +R$

इनका मान समीकरण (9.15) में रखने पर हमें प्राप्त होता है,

$$\frac{n_2}{v}-\frac{n_1}{u} = \frac{n_2-n_1}{R} \qquad (9.16)$$

समीकरण (9.16) से हमें बिंब तथा प्रतिबिंब के बीच में माध्यम के अपवर्तनांक तथा गोलीय वक्रित पृष्ठ की वक्रता त्रिज्या के पदों के रूप में संबंध प्राप्त होता है। समीकरण (9.16) किसी भी प्रकार के वक्रित गोलीय पृष्ठ के लिए मान्य है।

उदाहरण 9.6 वायु में रखे किसी बिंदु स्रोत से प्रकाश काँच के किसी गोलीय पृष्ठ पर पड़ता है। ($n = 1.5$ तथा वक्रता त्रिज्या = 20 cm)। प्रकाश स्रोत की काँच के पृष्ठ से दूरी 100 cm है। प्रतिबिंब कहाँ बनेगा?

हल

यहाँ पर, समीकरण (9.16) में दिए सूत्र में

$u = -100$ cm, $v = ?$, $R = +20$ cm, $n_1 = 1$, तथा $n_2 = 1.5$ रखने पर

हमें प्राप्त होता है

$$\frac{1.5}{v}+\frac{1}{100}=\frac{0.5}{20}$$

अथवा $v = +100$ cm

प्रतिबिंब आपतित प्रकाश की दिशा में काँच के पृष्ठ से 100 cm की दूरी पर बनेगा।

उदाहरण 9.6

9.5.2 किसी लेंस द्वारा अपवर्तन

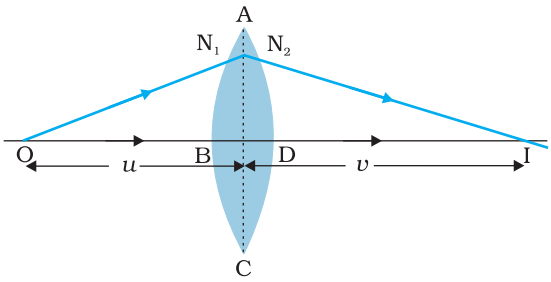
चित्र 9.18 (a) में किसी उभयोत्तल लेंस द्वारा प्रतिबिंब-रचना की ज्यामिति दर्शायी गई है। इस प्रतिबिंब की रचना को दो चरणों में देखा जा सकता है : (i) पहला अपवर्ती पृष्ठ बिंब O का प्रतिबिंब I_1 बनाता है [चित्र 9.18 (b)]। प्रतिबिंब I_1 दूसरे पृष्ठ द्वारा प्रतिबिंब I बनने के लिए आभासी बिंब की भाँति कार्य करता है [चित्र 9.18 (c)]। समीकरण (9.15) का उपयोग पहले अंतरापृष्ठ ABC पर करने पर हमें प्राप्त होता है :

$$\frac{n_1}{\text{OB}}+\frac{n_2}{\text{BI}_1}=\frac{n_2-n_1}{\text{BC}_1} \qquad (9.17)$$

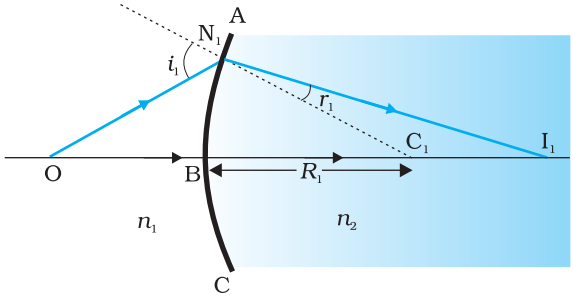
दूसरे अंतरापृष्ठ* ADC के लिए भी समान प्रक्रिया का अनुप्रयोग करने पर हमें प्राप्त होता है :

$$-\frac{n_2}{\text{DI}_1}+\frac{n_1}{\text{DI}}=\frac{n_2-n_1}{\text{DC}_2} \qquad (9.18)$$

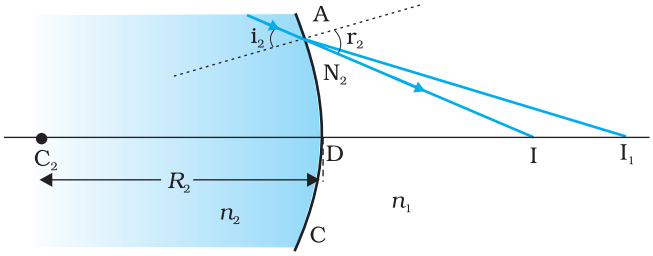
* नोट कीजिए अब ADC के दायीं ओर के माध्यम का अपवर्तनांक n_1 है जबकि इसके बायीं ओर यह n_2 है। इसके अतिरिक्त DI_1 ऋणात्मक है क्योंकि दूरी आपतित प्रकाश की दिशा के विपरीत दिशा में मापी गई है।



(a)



(b)



(c)

चित्र 9.18 (a) बिंब की स्थिति तथा उभयोत्तल लेंस द्वारा निर्मित प्रतिबिंब (b) पहले गोलीय पृष्ठ पर अपवर्तन (c) दूसरे गोलीय पृष्ठ पर अपवर्तन।

किसी पतले लेंस के लिए $BI_1 = DI_1$। समीकरणों (9.17) तथा (9.18) को जोड़ने पर हमें प्राप्त होता है :

$$\frac{n_1}{OB}+\frac{n_1}{DI}=(n_2-n_1)\left(\frac{1}{BC_1}+\frac{1}{DC_2}\right) \qquad (9.19)$$

मान लीजिए बिंब अनंत पर है तो, $OB \to \infty$ तथा $DI = f$, तब समीकरण (9.19) से प्राप्त होगा :

$$\frac{n_1}{f}=(n_2-n_1)\left(\frac{1}{BC_1}+\frac{1}{DC_2}\right) \qquad (9.20)$$

वह बिंदु जहाँ अनंत पर रखे बिंब का प्रतिबिंब बनता है, लेंस का *फ़ोकस* F कहलाता है तथा दूरी f द्वारा इसकी फ़ोकस दूरी प्राप्त होती है। किसी लेंस के इसके दोनों ओर दो फ़ोकस होते हैं F तथा F'। चिह्न परिपाटी द्वारा

$BC_1 = + R_1$ [चित्र 9.18(b)]

$DC_2 = -R_2$ [चित्र 9.18(c)]

इसलिए समीकरण (9.20) को लिखा जा सकता है :

$$\frac{1}{f}=(n_{21}-1)\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right) \quad \left(\because n_{21}=\frac{n_2}{n_1}\right) \qquad (9.21)$$

समीकरण (9.21) को *लेंस-मेकर सूत्र* के रूप में जाना जाता है। स्पष्ट रूप से यह सूत्र उचित वक्रता त्रिज्याओं के पृष्ठों के उपयोग द्वारा वांछित फोकस दूरी के लेंसों की अभिकल्पना (डिज़ाइन) करने में उपयोगी है। ध्यान देने योग्य बात यह है कि यही सूत्र अवतल लेंसों पर भी समान रूप से लागू होता है। उस स्थिति में R_1 ऋणात्मक तथा R_2 धनात्मक होता है, इसलिए f ऋणात्मक होता है।

समीकरण (9.19) तथा (9.20) से हमें प्राप्त होता है :

$$\frac{n_1}{OB}+\frac{n_1}{DI}=\frac{n_1}{f} \qquad (9.22)$$

पुनः पतले लेंस-सन्निकटन में बिंदु B तथा D दोनों ही लेंस के प्रकाशिक केंद्र के बहुत निकट माने जाते हैं। चिह्न परिपाटी का उपयोग करने पर $BO = -u$, $DI = +v$। इन मानों को (9.22) में रखने पर हमें प्राप्त होता है

$$\frac{1}{v}-\frac{1}{u}=\frac{1}{f} \qquad (9.23)$$

समीकरण (9.23) लेंसों के लिए परिचित *पतले लेंस सूत्र* है। यद्यपि यहाँ हमने इसे उत्तल लेंस द्वारा निर्मित वास्तविक प्रतिबिंब के लिए व्युत्पन्न किया है, तथापि यह सूत्र दोनों ही लेंसों अर्थात, उत्तल तथा अवतल तथा दोनों ही प्रकार के प्रतिबिंबों, वास्तविक तथा आभासी के लिए मान्य है।

यह बताना आवश्यक है कि किसी उभयोत्तल अथवा उभयावतल लेंस के दो फ़ोकस F तथा F' लेंस के प्रकाशिक केंद्र से समान दूरी पर हैं। प्रकाश के स्रोत की ओर स्थित फ़ोकस को *प्रथम फ़ोकस बिंदु* कहते हैं जबकि दूसरा *द्वितीय फ़ोकस बिंदु* कहलाता है।

लेंसों द्वारा बने किसी बिंब के प्रतिबिंब की स्थिति ज्ञात करने के लिए सिद्धांत रूप में हम बिंब

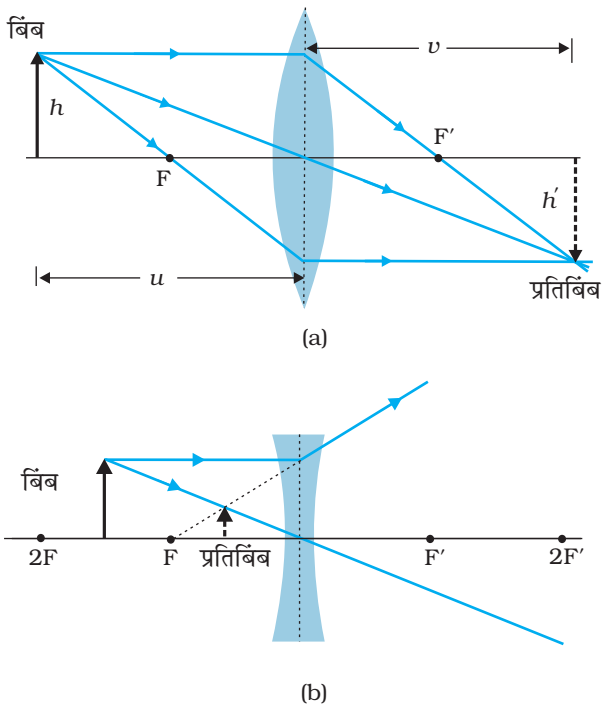
के किसी बिंदु से आने वाली कोई भी दो किरणें लेकर तथा अपवर्तन के नियमों द्वारा उनके पथ अनुरेखित करके उस बिंदु की स्थिति ज्ञात करते हैं, जहाँ अपवर्तित किरणें वास्तव में मिलती हैं (अथवा मिलती प्रतीत होती हैं)। तथापि, व्यवहार में निम्नलिखित में से कोई सी दो किरणों का चयन करना कार्य को सहज बना देता है।

(i) बिंब से निकलने वाली वह किरण जो लेंस के मुख्य अक्ष के समांतर होती है, अपवर्तन के पश्चात (उत्तल लेंस में) लेंस के दूसरे मुख्य फ़ोकस F′ से गुज़रती है, अथवा (अवतल लेंस में) लेंस के प्रथम मुख्य फ़ोकस F से अपसरित प्रतीत होती है।

(ii) लेंस के प्रकाशिक केंद्र से गुज़रने वाली प्रकाश किरण अपवर्तन के पश्चात बिना किसी विचलन के निर्गत होती है।

(iii) लेंस के प्रथम मुख्य फ़ोकस से गुज़रने वाली प्रकाश किरण (उत्तल लेंस में) अथवा इस बिंदु पर आकर मिलती प्रतीत होने वाली प्रकाश किरण (अवतल लेंस में) अपवर्तन के पश्चात मुख्य अक्ष के समांतर निर्गत होती है।

चित्र 9.19 (a) तथा (b) में इन नियमों को क्रमशः उत्तल तथा अवतल लेंसों के लिए दर्शाया गया है। आपको लेंस से विभिन्न दूरियों पर बिंब को रखकर इस प्रकार के किरण आरेख खींचने का अभ्यास करना चाहिए तथा यह भी सत्यापित करना चाहिए कि लेंस सूत्र, समीकरण (9.23), सभी उदाहरणों में समान रूप से लागू होता है।



चित्र 9.19 (a) उत्तल लेंस, (b) अवतल लेंस से गुज़रने वाली प्रकाश किरणों का अनुरेखण।

यहाँ पर यह अवश्य याद रखना चाहिए कि किसी बिंब के प्रत्येक बिंदु से अनंत किरणें उत्सर्जित होती हैं। ये सभी किरणें लेंस से अपवर्तन के पश्चात एक ही प्रतिबिंब बिंदु से गुज़रती हैं।

दर्पण की भाँति लेंसों के लिए भी, किसी लेंस द्वारा उत्पन्न आवर्धन (m) को प्रतिबिंब के साइज़ (h') तथा बिंब के साइज़ (h) के अनुपात के रूप में परिभाषित किया जाता है। गोलीय दर्पणों की भाँति यहाँ भी किसी लेंस के लिए यह सरलता से देखा जा सकता है कि

$$m = \frac{h'}{h} = \frac{v}{u} \qquad (9.24)$$

चिह्न परिपाटी का पालन करने पर हम यह पाते हैं कि उत्तल अथवा अवतल लेंस द्वारा बने सीधे (तथा आभासी) प्रतिबिंब के लिए m धनात्मक होता है, जबकि किसी उलटे (तथा वास्तविक) प्रतिबिंब के लिए m ऋणात्मक होता है।

उदाहरण 9.7 कोई जादूगर खेल दिखाते समय $n = 1.47$ अपवर्तनांक के काँच के लेंस को किसी द्रव से भरी द्रोणिका में डालकर अदृश्य कर देता है। द्रव का अपवर्तनांक क्या है? क्या यह द्रव जल हो सकता है?

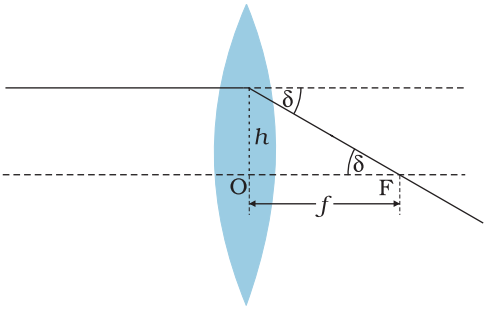
हल

द्रव में लेंस के अदृश्य होने के लिए द्रव का अपवर्तनांक, लेंस के काँच के अपवर्तनांक के बराबर होना चाहिए; $n_1 = n_2$। अर्थात द्रव का अपवर्तनांक 1.47 है। इस प्रकरण में $1/f = 0$ या $f \to \infty$ प्राप्त होगा। द्रव के अंदर लेंस काँच की एक समतल शीट की भाँति कार्य करेगा। द्रोणिका में भरा द्रव जल (अपवर्तनांक = 1.33) नहीं हो सकता। यह द्रव ग्लिसरीन हो सकता है।

उदाहरण 9.7

9.5.3 लेंस की क्षमता

किसी लेंस की क्षमता उस पर पड़ने वाले प्रकाश को अभिसरित अथवा अपसरित करने की कोटि की माप होती है। स्पष्टतः कम फ़ोकस दूरी का कोई लेंस आपतित प्रकाश को अधिक मोड़ता है,



चित्र 9.20 किसी लेंस की क्षमता।

उत्तल लेंस में अपवर्तित किरण अभिसरित होती है तथा अवतल लेंस में अपवर्तित किरण अपसरित होती है। किसी लेंस की *क्षमता* P को उस कोण की स्पर्शज्या से परिभाषित करते हैं, जिससे यह किसी प्रकाश पुंज को जो प्रकाशिक केंद्र से एकांक दूरी पर आकर गिरता है, अभिसरित या अपसरित करता है। (चित्र 9.20)।

$$\tan\delta = \frac{h}{f}; \text{ यदि } h = 1 \quad \tan\delta = \frac{1}{f}$$

अथवा $\delta = \frac{1}{f}$ (δ के लघु मान के लिए)।

अत: $$P = \frac{1}{f} \qquad (9.25)$$

लेंस की क्षमता का SI मात्रक डाइऑप्टर (D) : $1\text{D} = 1\text{m}^{-1}$ है। अत: 1m फोकस दूरी के लेंस की क्षमता एक डाइऑप्टर है। अभिसारी लेंसों की क्षमता धनात्मक तथा अपसारी लेंस की क्षमता ऋणात्मक होती है। इस प्रकार जब कोई नेत्र चिकित्सक + 2.5 D क्षमता का संशोधक लेंस निर्धारित करता है, तब + 40 cm फ़ोकस दूरी के उत्तल लेंस की आवश्यकता होती है। – 4.0 D क्षमता के लेंस से तात्पर्य – 25 cm फ़ोकस दूरी का अवतल लेंस होता है।

उदाहरण 9.8

उदाहरण 9.8 (i) यदि $f = +0.5$ m है तो लेंस की क्षमता क्या है? (ii) किसी उभयोत्तल लेंस के दो फलकों की वक्रता त्रिज्याएँ 10 cm तथा 15 cm हैं। उसकी फ़ोकस दूरी 12 cm है। लेंस के काँच का अपवर्तनांक ज्ञात कीजिए। (iii) किसी उत्तल लेंस की वायु में फ़ोकस दूरी 20 cm है। जल में इसकी फ़ोकस दूरी क्या है? [वायु-जल का अपवर्तनांक 1.33 तथा वायु-काँच का अपवर्तनांक 1.5 है।]

हल

(i) लेंस की क्षमता = +2D

(ii) यहाँ $f = +12$ cm, $R_1 = +10$ cm, $R_2 = -15$ cm

वायु का अपवर्तनांक 1 माना जाता है।

समीकरण (9.22) के लेंस सूत्र का प्रयोग करने के लिए f, R_1 तथा R_2 के लिए चिह्न परिपाटी के अनुसार विभिन्न राशियों के मान रखने पर हमें

$$\frac{1}{12} = (n-1)\left(\frac{1}{10} - \frac{1}{-15}\right)$$

$n = 1.5$ प्राप्त होगा।

(iii) वायु में काँच के लेंस के लिए, $n_2 = 1.5$, $n_1 = 1$, $f = +20$ cm

इस प्रकार लेंस सूत्र से प्राप्त होगा

$$\frac{1}{20} = 0.5\left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right]$$

उसी काँच के लेंस के लिए जल में, $n_2 = 1.5$, $n_1 = 1.33$. इसलिए

$$\frac{1.33}{f} = (1.5 - 1.33)\left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right] \qquad (9.26)$$

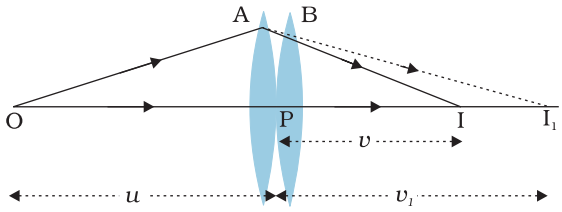
इन दोनों समीकरणों को संयोजित करने पर हमें मिलेगा

$f = +78.2$ cm

9.5.4 संपर्क में रखे पतले लेंसों का संयोजन

एक-दूसरे के संपर्क में रखे f_1 तथा f_2 फ़ोकस दूरियों के दो पतले लेंसों A तथा B पर विचार कीजिए। मान लीजिए कोई बिंब पहले लेंस A के फ़ोकस से दूर किसी बिंदु O पर स्थित है

(चित्र 9.21)। पहला लेंस बिंदु I_1 पर प्रतिबिंब बनाता है। क्योंकि प्रतिबिंब I_1 वास्तविक है, अत: यह दूसरे लेंस B के लिए आभासी बिंब की भाँति कार्य करता है तथा अंतिम प्रतिबिंब I पर बनता है। हमें इस बात को समझ लेना चाहिए कि पहले लेंस से प्रतिबिंब का बनना, केवल अंतिम प्रतिबिंब की स्थिति निर्धारित करने के लिए, माना गया है। वास्तव में पहले लेंस से निकलने वाली किरणों की दिशा, उनके दूसरे लेंस से टकराने वाले कोण के अनुसार परिवर्तित हो जाती है। क्योंकि लेंस पतले हैं, हम दोनों लेंसों के प्रकाशिक केंद्रों को संपाती मान सकते हैं। मान लीजिए यह केंद्रीय बिंदु P द्वारा निर्दिष्ट होता है।



चित्र 9.21 संपर्क में रखे दो पतले लेंसों द्वारा प्रतिबिंब बनना।

पहले लेंस A द्वारा बने प्रतिबिंब के लिए

$$\frac{1}{v_1}-\frac{1}{u}=\frac{1}{f_1} \qquad (9.27)$$

दूसरे लेंस B द्वारा बने प्रतिबिंब के लिए

$$\frac{1}{v}-\frac{1}{v_1}=\frac{1}{f_2} \qquad (9.28)$$

समीकरण (9.27) तथा (9.28) को जोड़ने पर,

$$\frac{1}{v}-\frac{1}{u}=\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2} \qquad (9.29)$$

इन दो लेंसों के तंत्र को f फ़ोकस दूरी के किसी एकल लेंस के तुल्य मानने पर,

$$\frac{1}{v}-\frac{1}{u}=\frac{1}{f}$$

अर्थात

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2} \qquad (9.30)$$

यह व्युत्पत्ति संपर्क में रखे कई पतले लेंसों के निकाय के लिए भी मान्य है। यदि $f_1, f_2, f_3, \ldots$ फ़ोकस दूरियों के बहुत से लेंस एक-दूसरे के संपर्क में रखे हैं, तो इस संयोजन की प्रभावी फ़ोकस दूरी होगी :

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2}+\frac{1}{f_3}+\ldots \qquad (9.31)$$

क्षमता के पदों में समीकरण (9.31) को इस प्रकार भी लिखा जा सकता है

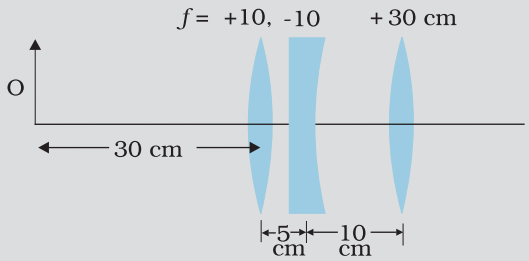
$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \ldots \qquad (9.32)$$

यहाँ P इस लेंस संयोजन की नेट क्षमता है। ध्यान दीजिए, समीकरण (9.32) में अलग-अलग क्षमताओं का बीजगणितीय योग दिया गया है, अर्थात समीकरण के दक्षिण पक्ष में कुछ पद धनात्मक (उत्तल लेंसों के लिए) तथा कुछ पद ऋणात्मक (अवतल लेंसों के लिए) हो सकते हैं। लेंसों के संयोजन हमें व्युत्पन्न आवर्धन क्षमता के अपसारित अथवा अभिसारित लेंस प्राप्त करने में सहायक होते हैं तथा ये प्रतिबिंब की तीक्ष्णता में भी वृद्धि कर देते हैं। क्योंकि पहले लेंस द्वारा बना प्रतिबिंब दूसरे लेंस के लिए बिंब बन जाता है, समीकरण (9.25) में यह अंतर्निहित है कि संयोजन का कुल आवर्धन m, अलग-अलग आवर्धनों ($m_1, m_2, m_3, \ldots$) के गुणनफल के बराबर होता है।

$$m = m_1 m_2 m_3 \ldots \qquad (9.33)$$

इस प्रकार के लेंसों के संयोजन सामान्यत: कैमरों, सूक्ष्मदर्शियों, दूरबीनों तथा अन्य प्रकाशिक यंत्रों के लेंसों के डिज़ाइन में उपयोग किए जाते हैं।

उदाहरण 9.9 चित्र 9.22 में दिए गए लेंसों के संयोजन द्वारा निर्मित प्रतिबिंब की स्थिति ज्ञात कीजिए।



चित्र 9.22

हल पहले लेंस द्वारा निर्मित प्रतिबिंब

$$\frac{1}{v_1}-\frac{1}{u_1}=\frac{1}{f_1}$$

$$\frac{1}{v_1}-\frac{1}{-30}=\frac{1}{10}$$

अथवा $v_1 = 15$ cm

पहले लेंस द्वारा निर्मित प्रतिबिंब दूसरे लेंस के लिए बिंब की भाँति कार्य करता है। यह दूसरे लेंस के दायीं ओर (15 – 5) cm = 10 cm दूरी पर है। यद्यपि प्रतिबिंब वास्तविक है परंतु यह दूसरे लेंस के लिए आभासी बिंब का कार्य करता है। अर्थात इससे दूसरे लेंस के लिए किरणें आती हुई प्रतीत होती हैं।

$$\frac{1}{v_2}-\frac{1}{10}=\frac{1}{-10}$$

या $v_2 = \infty$

यह आभासी प्रतिबिंब दूसरे लेंस के बायीं ओर अनंत दूरी पर बनता है। यह तीसरे लेंस के लिए बिंब की भाँति कार्य करता है।

$$\frac{1}{v_3}-\frac{1}{u_3}=\frac{1}{f_3}$$

अथवा $\frac{1}{v_3}=\frac{1}{\infty}+\frac{1}{30}$

या $v_3 = 30$ cm

अंतिम प्रतिबिंब तीसरे लेंस के दायीं ओर 30 cm दूरी पर बनता है।

उदाहरण 9.9

9.6 प्रिज़्म में अपवर्तन

चित्र 9.23 में किसी प्रिज़्म ABC से प्रकाश किरण को गुज़रते हुए दर्शाया गया है। पहले फलक AB पर आपतन कोण तथा अपवर्तन कोण क्रमश: i तथा r_1 हैं, जबकि दूसरे फलक (काँच से वायु में) AC पर आपतन कोण r_2 तथा अपवर्तन कोण या निर्गत कोण e हैं। निर्गत किरण RS तथा आपतित किरण की दिशा PQ के बीच के कोण को *विचलन कोण* δ कहते हैं।

चतुर्भुज AQNR में दो कोण (Q तथा R शीर्षों पर) समकोण हैं। इसलिए इस भुजा के अन्य दो कोणों का योग 180° है।

$\angle A + \angle QNR = 180^\circ$

त्रिभुज QNR से

$r_1 + r_2 + \angle QNR = 180^\circ$

इन दोनों समीकरणों की तुलना करने पर, हमें प्राप्त होगा

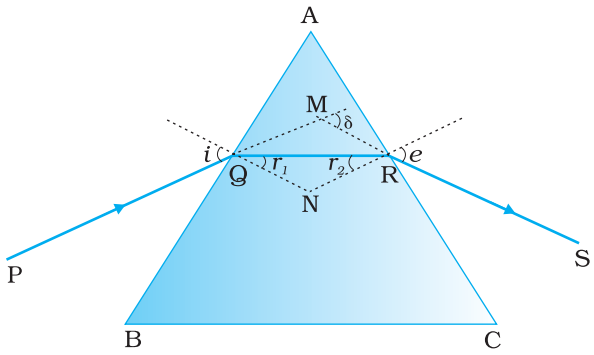
$$r_1 + r_2 = A \qquad (9.34)$$

कुल विचलन δ दोनों फलकों पर विचलनों का योग है:

$\delta = (i - r_1) + (e - r_2)$

अर्थात, $\delta = i + e - A$ (9.35)

इस प्रकार विचलन कोण आपतन कोण पर निर्भर करता है।



चित्र 9.23 काँच के त्रिभुजाकार प्रिज़्म से किसी प्रकाश किरण का गुज़रना।

चित्र 9.24 में आपतन कोण तथा विचलन कोण के बीच ग्राफ़ दर्शाया गया है। आप यह देख सकते हैं कि व्यापक रूप से, केवल $i = e$ को छोड़कर, प्रत्येक विचलन कोण δ के तदनुरूपी i के तथा इस प्रकार e के दो मान हैं। यह तथ्य समीकरण (9.35) में i तथा e की सममिति से अपेक्षित है, अर्थात, यदि i तथा e को आपस में बदल दिया जाए तो δ अपरिवर्तित रहता है। भौतिक रूप में यह इस तथ्य से संबंधित है कि चित्र 9.23 में प्रकाश किरण के पथ को वापस आरेखित करने पर वही विचलन कोण प्राप्त होता है। न्यूनतम विचलन D_m पर, प्रिज़्म के अंदर अपवर्तित किरण इसके आधार के समांतर हो जाती है। हमें प्राप्त होता है

$\delta = D_m$, $i = e$ जिसका तात्पर्य है कि $r_1 = r_2$

समीकरण (9.34) से हमें प्राप्त होता है

$$2r = A \text{ अथवा } r = \frac{A}{2} \qquad (9.36)$$

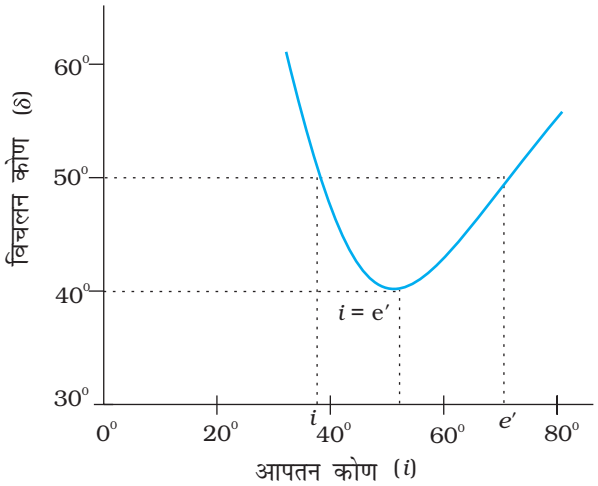
इसी प्रकार समीकरण (9.35) से हमें प्राप्त होता है

$$D_m = 2i - A, \text{ अथवा } i = (A + D_m)/2 \qquad (9.37)$$

यदि प्रिज़्म के पदार्थ का अपवर्तनांक n_{21} है तो

$$n_{21} = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin[(A + D_m)/2]}{\sin[A/2]} \qquad (9.38)$$

कोण A तथा D_m की माप प्रयोग द्वारा की जा सकती है। इस प्रकार समीकरण (9.38) प्रिज़्म के पदार्थ के अपवर्तनांक के मापन की विधि है।



चित्र 9.24 किसी त्रिभुजाकार प्रिज़्म के लिए आपतन कोण (i) तथा विचलन कोण (δ) के बीच एक ग्राफ़।

छोटे कोण के प्रिज़्म अर्थात पहले प्रिज़्म के लिए D_m भी काफ़ी छोटा होता है तथा हमें प्राप्त होगा

$$n_{21} = \frac{\sin[(A + D_m)/2]}{\sin[A/2]} \simeq \frac{(A + D_m)/2}{A/2}$$

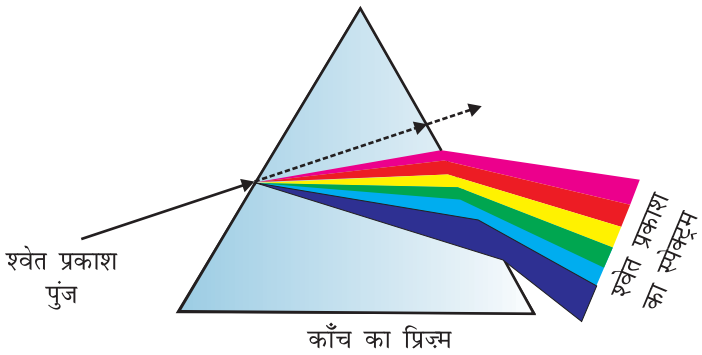
$D_m = (n_{21} - 1)A$

इसका तात्पर्य है कि पतले प्रिज़्म में प्रकाश का विचलन काफ़ी कम होता है।

9.7 प्रिज़्म द्वारा परिक्षेपण

हमें यह बहुत पहले से ही ज्ञात है कि जब सूर्य के प्रकाश का कोई संकीर्ण प्रकाश पुंज जिसे प्राय:

श्वेत प्रकाश कहते हैं, किसी काँच के प्रिज़्म पर आपतित होता है तो निर्गत प्रकाश में कई वर्ण देखे जाते हैं। वास्तव में वर्णों में सतत परिवर्तन होता है, परंतु मोटे तौर पर विभिन्न संघटक वर्ण इस क्रम में होते हैं : बैंगनी, जामुनी, नीला, हरा, पीला, नारंगी और लाल (ये परिवर्णी शब्द VIBGYOR द्वारा व्यक्त होते हैं)। लाल वर्ण का प्रकाश में सबसे कम तथा बैंगनी वर्ण का प्रकाश में सबसे अधिक बंकन होता है (चित्र 9.25)।



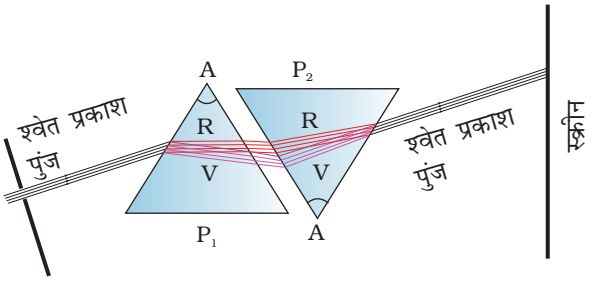
चित्र 9.25 काँच के प्रिज़्म से गुज़रने पर श्वेत प्रकाश अथवा सूर्य के प्रकाश का परिक्षेपण। विभिन्न वर्णों के आपेक्षिक विचलन को बढ़ा-चढ़ा कर दर्शाया गया है।

प्रकाश के अपने संघटक वर्णों में विपाटन (splitting) की परिघटना को *परिक्षेपण* (dispersion) कहते हैं। प्रकाश के संघटक वर्णों के प्रतिरूप को *स्पेक्ट्रम* कहते हैं। आजकल *स्पेक्ट्रम* शब्द का उपयोग अधिक व्यापक रूप में होने लगा है। हमने अध्याय 8 में तरंगदैर्घ्य के बड़े विशाल परिसर में वैद्युतचुंबकीय स्पेक्ट्रम की चर्चा की थी। जिसमें हमने γ-किरणों से रेडियो तरंगों तक की तरंगदैर्घ्यों को सम्मिलित किया है, जिनमें प्रकाश का स्पेक्ट्रम (दृश्य स्पेक्ट्रम) केवल एक छोटा-सा भाग है।

यद्यपि स्पेक्ट्रम का दिखाई देना अब एक सामान्य ज्ञान की बात है, परंतु भौतिकी के इतिहास में यह एक बड़े वाद-विवाद का विषय था। क्या प्रिज़्म किसी प्रकार स्वयं रंग उत्पन्न करता है अथवा यह केवल श्वेत प्रकाश में पहले से ही उपस्थित रंगों को पृथक करता है?

एक सरल तथा अत्यंत महत्वपूर्ण क्लासिकी प्रयोग से आइजक न्यूटन ने इस वाद-विवाद को सदा के लिए हल कर दिया। उन्होंने उसी प्रिज़्म के समान एक अन्य प्रिज़्म लिया और उसे उलटा करके इस प्रकार रखा कि पहले प्रिज़्म का निर्गत किरण-पुंज दूसरे प्रिज़्म पर आपतित हो (चित्र 9.26)। इस प्रकार प्राप्त परिणामी निर्गत किरण-पुंज श्वेत प्रकाश का पाया गया। इसकी व्याख्या स्पष्ट थी – पहले प्रिज़्म ने श्वेत प्रकाश को उसके संघटक वर्णों में पृथक किया जबकि उलटे रखे प्रिज़्म ने इन्हें पुनर्संयोजित करके श्वेत प्रकाश में परिवर्तित कर दिया। इस प्रकार, श्वेत प्रकाश स्वयं विभिन्न वर्णों से मिलकर बनता है, जो प्रिज़्म द्वारा पृथक कर दिए जाते हैं।

यहाँ यह समझ लेना आवश्यक है कि प्रकाश किरण, जैसा कि गणित की भाषा में परिभाषित किया जाता है, का कोई अस्तित्व नहीं है। वास्तविक किरण वस्तुतः प्रकाश के अनेक किरणों का पुंज है। काँच के स्लैब में प्रवेश करने पर प्रत्येक किरण इसके संघटक वर्णों में विभक्त हो जाती है। विभिन्न वर्णों की ये किरणें जब दूसरे फलक से बाहर निकलती हैं, तो वे पुनः श्वेत प्रकाश उत्पन्न करती हैं।



चित्र 9.26 श्वेत प्रकाश के परिक्षेपण पर न्यूटन के क्लासिकी प्रयोग का व्यवस्था आरेख।

अब हम जानते हैं कि प्रकाश का वर्ण प्रकाश की तरंगदैर्घ्य से संबद्ध होता है। दृश्य स्पेक्ट्रम में लाल प्रकाश दीर्घ तरंगदैर्घ्य के सिरे (~750 nm) पर जबकि बैंगनी प्रकाश लघु तरंगदैर्घ्य के सिरे (~ 400 nm) पर होता है। परिक्षेपण का कारण यह है कि किसी माध्यम का अपवर्तनांक विभिन्न तरंगदैर्घ्यों (वर्णों) के लिए भिन्न-भिन्न होता है। उदाहरण के लिए, श्वेत प्रकाश का लाल घटक सबसे कम मुड़ता है जबकि बैंगनी घटक अधिक मुड़ता है। तुल्य रूप में हम कह सकते हैं कि काँच के प्रिज़्म में बैंगनी प्रकाश की तुलना में लाल प्रकाश अपेक्षाकृत अधिक चाल से गमन करता है। सारणी 9.2 में विभिन्न तरंगदैर्घ्यों के लिए क्राउन काँच तथा फ्लिंट काँच के अपवर्तनांक दर्शाए गए हैं। मोटे लेंसों को अनेक प्रिज़्मों से मिलकर बना हुआ माना जा सकता है, इसलिए मोटे लेंस प्रकाश के परिक्षेपण के कारण *वर्ण विपथन* (chromatic abberation) क्लासिकी प्रयोग दर्शाते हैं।

सारणी 9.2 विभिन्न तरंगदैर्घ्यों के अपवर्तनांक

वर्ण	तरंगदैर्घ्य (nm)	क्राउन काँच	फ़्लिंट काँच
बैंगनी	396.9	1.533	1.663
नीला	486.1	1.523	1.639
पीला	589.3	1.517	1.627
लाल	656.3	1.515	1.622

तरंगदैर्घ्य के साथ अपवर्तनांक में परिवर्तन कुछ माध्यमों में अन्य माध्यमों की तुलना में अधिक सुस्पष्ट होता है। वास्तव में निर्वात में प्रकाश की चाल तरंगदैर्घ्य पर निर्भर नहीं करती। अतः निर्वात (अथवा सन्निकटतः वायु) एक अपरिक्षेपी माध्यम है जिसमें सभी वर्ण समान चाल से गमन करते हैं। यह इस तथ्य से भी सिद्ध होता है कि सूर्य का प्रकाश हमारे पास तक श्वेत प्रकाश के रूप में पहुँचता है, इसके विभिन्न संघटकों के रूप में नहीं। इसके विपरीत काँच एक परिक्षेपी माध्यम है।

9.8 सूर्य के प्रकाश के कारण कुछ प्राकृतिक परिघटनाएँ

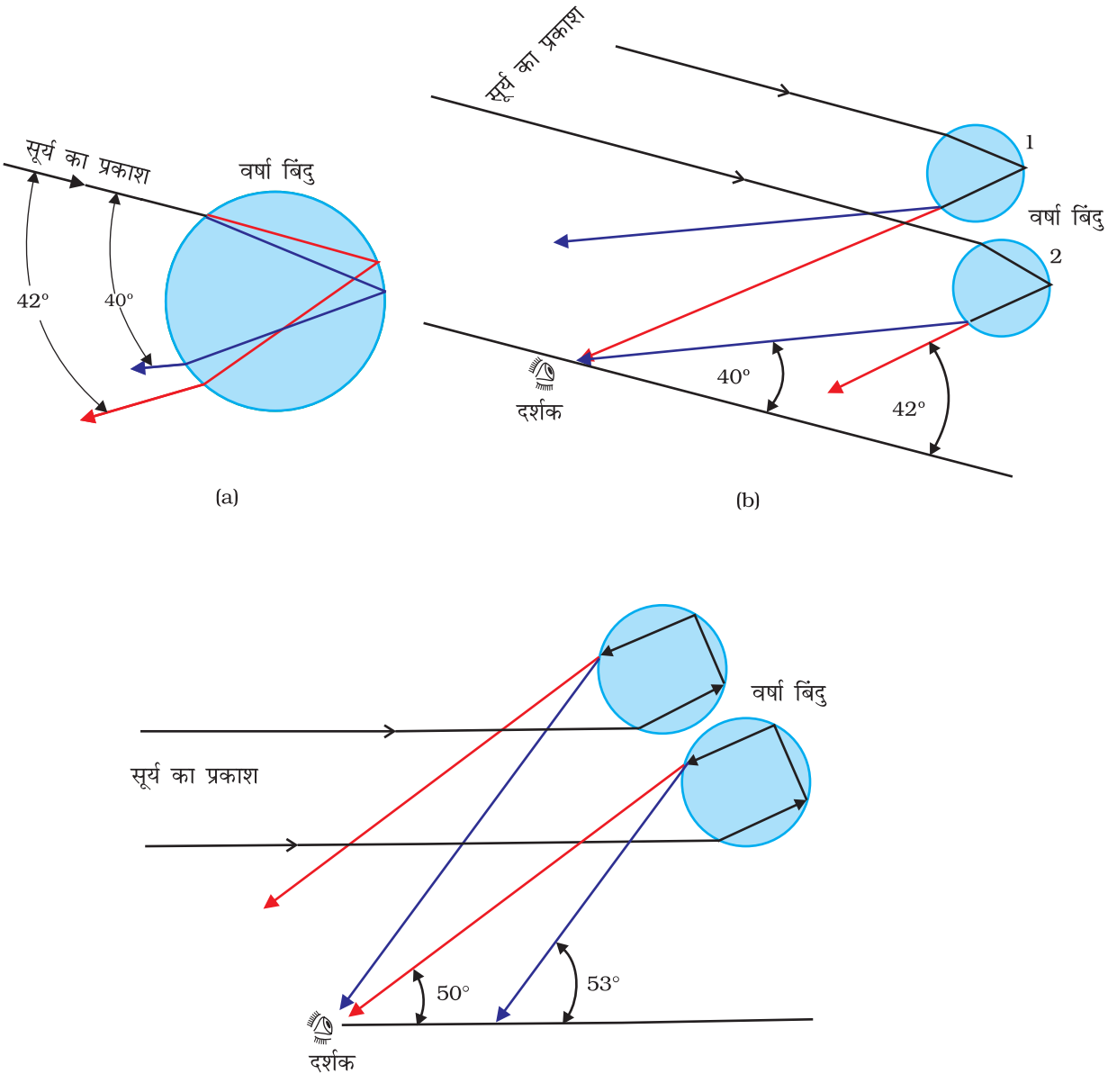
हमारे चारों ओर की वस्तुओं के साथ प्रकाश के खेल हमें बहुत-सी रमणीय परिघटनाएँ देते हैं। हमारे चारों ओर हर समय दिखाई देने वाले भव्य रंग सूर्य के प्रकाश के कारण ही संभव हैं। आकाश का नीला प्रतीत होना, श्वेत बादल, सूर्योदय तथा सूर्यास्त के समय आकाश की लालिमा, इंद्रधनुष, कुछ पक्षियों के पंखों, सीपियों, शंखों एवं मोतियों की रंग-बिरंगी चमक कुछ ऐसे अद्भुत एवं आश्चर्यजनक प्राकृतिक चमत्कार हैं, जिनसे हम भली-भाँति परिचित हैं और उनके अभ्यस्त हो चुके हैं। यहाँ इनमें से कुछ का हम भौतिकी की दृष्टि से वर्णन करेंगे।

9.8.1 इंद्रधनुष

इंद्रधनुष वायुमंडल में उपस्थित जल की बूँदों के द्वारा प्रकाश के परिक्षेपण का एक उदाहरण है। यह सूर्य के प्रकाश का जल की गोलीय सूक्ष्म बूँदों द्वारा परिक्षेपण, अपवर्तन तथा आंतरिक परावर्तन के संयुक्त प्रभाव की परिघटना है। इंद्रधनुष देखने के लिए आवश्यक शर्तें ये हैं कि सूर्य आकाश के किसी एक भाग (मान लीजिए पश्चिमी क्षितिज) में चमक रहा हो जबकि आकाश के विपरीत भाग (मान लीजिए पूर्वी क्षितिज) में वर्षा हो रही हो। इस प्रकार कोई भी प्रेक्षक इंद्रधनुष तभी देख सकता है जब उसकी पीठ सूर्य की ओर हो।

इंद्रधनुषों का बनना समझने के लिए चित्र 9.27(a) पर विचार करते हैं। सूर्य का प्रकाश सर्वप्रथम वर्षा की बूँद में प्रवेश करते समय अपवर्तित होता है, जिसके कारण श्वेत प्रकाश की विभिन्न तरंगदैर्घ्य (वर्ण) पृथक हो जाते हैं। प्रकाश की उच्च तरंगदैर्घ्य (लाल) सबसे कम मुड़ती है जबकि निम्न तरंगदैर्घ्य (बैंगनी) सबसे अधिक मुड़ती है। इसके पश्चात ये संघटक किरणें बूँद के भीतरी पृष्ठ से टकराती हैं और यदि बूँद पृष्ठ पर अभिलंब और अपवर्तित किरण के बीच का कोण क्रांतिक कोण (इस प्रकरण में 48°) से अधिक है तो आंतरिकतः परावर्तित हो जाती है। यह परावर्तित प्रकाश, बूँद से बाहर निकलते समय चित्र में दर्शाए अनुसार पुनः अपवर्तित हो जाता है। यह पाया जाता है कि सूर्य से आने वाले प्रकाश के सापेक्ष बैंगनी प्रकाश 40° के कोण पर तथा लाल प्रकाश 42° के कोण पर निर्गत होता है। अन्य वर्णों के लिए कोणों के मान इन दोनों के मध्य होते हैं।

इंद्रधनुष का बनना
http://www.eo.ucar.edu/rainbows
http://www.atoptics.co.uk/bows.htm



चित्र 9.27 इंद्रधनुष (a) जल की बूँद पर आपतित सूर्य की किरणों का बूँद द्वारा दो बार अपवर्तन तथा एक बार आंतरिक परावर्तन होता है, (b) बूँद के अंदर प्रकाश की किरण के आंतरिक परावर्तन तथा अपवर्तन का विवर्धित दृश्य जिसके कारण प्राथमिक इंद्रधनुष बनता है तथा (c) बूँद के अंदर किरणों के दो बार आंतरिक परावर्तन के कारण द्वितीयक इंद्रधनुष बनता है।

चित्र 9.27(b) में प्राथमिक इंद्रधनुष का बनना समझाया गया है। हम देखते हैं कि बूँद 1 से लाल प्रकाश तथा बूँद 2 से बैंगनी प्रकाश प्रेक्षक की आँखों तक पहुँचता है। बूँद 1 से आने वाला बैंगनी तथा बूँद 2 से आने वाला लाल प्रकाश प्रेक्षक की आँखों से ऊपर अथवा नीचे की ओर दिष्ट होते हैं। इस प्रकार प्रेक्षक इंद्रधनुष के शीर्ष पर लाल वर्ण और पैंदी पर बैंगनी वर्ण देखता है। इस प्रकार प्राथमिक इंद्रधनुष तीन चरणीय प्रक्रम अर्थात अपवर्तन, परावर्तन तथा पुनः अपवर्तन का परिणाम है।

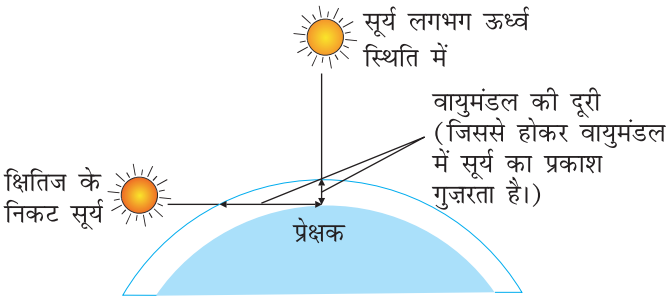
जब प्रकाश किरणें किसी वर्षा की बूँद के भीतर एक बार की बजाय दो बार आंतरिकत: परावर्तित होती हैं तो द्वितीयक इंद्रधनुष बनता है [चित्र 9.27(c)]। यह चार चरणीय प्रक्रम है। द्वितीय परावर्तन के प्रक्रम में प्रकाश की तीव्रता कम हो जाती है। इसलिए द्वितीयक इंद्रधनुष प्राथमिक इंद्रधनुष की तुलना में धुँधला होता है। इसके साथ ही जैसा कि चित्र 9.27(c) से स्पष्ट है इसमें वर्णों का क्रम प्राथमिक इंद्रधनुष की तुलना में उलटा होता है।

9.8.2 प्रकाश का प्रकीर्णन

जब सूर्य का प्रकाश पृथ्वी के परिमंडल में गमन करता है तो यह वायुमंडल के कणों द्वारा *प्रकीर्णित* होता है। छोटी तरंगदैर्घ्य का प्रकाश बड़ी तरंगदैर्घ्यों की तुलना में कहीं अधिक प्रकीर्ण होता है। (प्रकीर्णन की मात्रा तरंगदैर्घ्य की चतुर्थ घात के व्युत्क्रमानुपाती होती है। इसे *रैले प्रकीर्णन* कहते हैं।) यही कारण है कि स्वच्छ आकाश में नीला वर्ण सर्वाधिक प्रमुखता दर्शाता है, क्योंकि लाल वर्ण की अपेक्षा नीले वर्ण की तरंगदैर्घ्य कम होती है तथा इसका प्रकीर्णन अधिक प्रबलता से होता है। वास्तव में बैंगनी वर्ण की तरंगदैर्घ्य और भी कम होने के कारण यह नीले वर्ण से भी अधिक प्रबलता से प्रकीर्ण होता है। लेकिन हमारी आँखें बैंगनी वर्ण की अपेक्षा नीले वर्ण के लिए अधिक सुग्राही हैं, इसलिए हमें आकाश नीला दिखाई देता है।

वायुमंडल में उपस्थित बड़े कण जैसे धूल तथा जल की सूक्ष्म बूँदें भिन्न व्यवहार दर्शाते हैं। यहाँ पर इस संदर्भ में प्रासंगिक राशि, प्रकाश की तरंगदैर्घ्य λ तथा प्रकीर्णक (मान लीजिए इनका प्रारूपी साइज़ a है) के आपेक्षिक साइज़ हैं। $a << \lambda$ के लिए, रैले प्रकीर्णन होता है जो कि $(1/\lambda)^4$ के अनुक्रमानुपाती होता है। $a >> \lambda$ के लिए, अर्थात बड़े साइज़ की प्रकीर्णक वस्तु के लिए (उदाहरण के लिए वर्षा की बूँदों, बड़े आकार के धूल कण अथवा हिम कण)ऐसा प्रकीर्णन नहीं होता; सभी तरंगदैर्घ्य लगभग समान रूप से प्रकीर्णित होती हैं। इसीलिए बादल जिनमें $a >> \lambda$ साइज़ की जल की सूक्ष्म बूँदें होती हैं, सामान्यत: श्वेत प्रतीत होते हैं।

सूर्योदय तथा सूर्यास्त के समय सूर्य की किरणों को वायुमंडल से होकर अपेक्षाकृत अधिक दूरियाँ तय करनी पड़ती हैं (चित्र 9.28)। इस प्रकाश से नीला तथा छोटी तरंगदैर्घ्य का अधिकांश प्रकाश प्रकीर्णन द्वारा पृथक हो जाता है। अत: प्रकाश का सबसे कम प्रकीर्णित भाग जो हमारी आँखों तक पहुँचता है, रक्ताभ प्रतीत होता है। यही कारण है कि क्षितिज के निकट होने पर सूर्य तथा पूर्ण चंद्रमा रक्ताभ प्रतीत होते हैं।



चित्र 9.28 सूर्यास्त तथा सूर्योदय के समय सूर्य का प्रकाश वायुमंडल में अधिक दूरी गमन करता है।

9.9 प्रकाशिक यंत्र

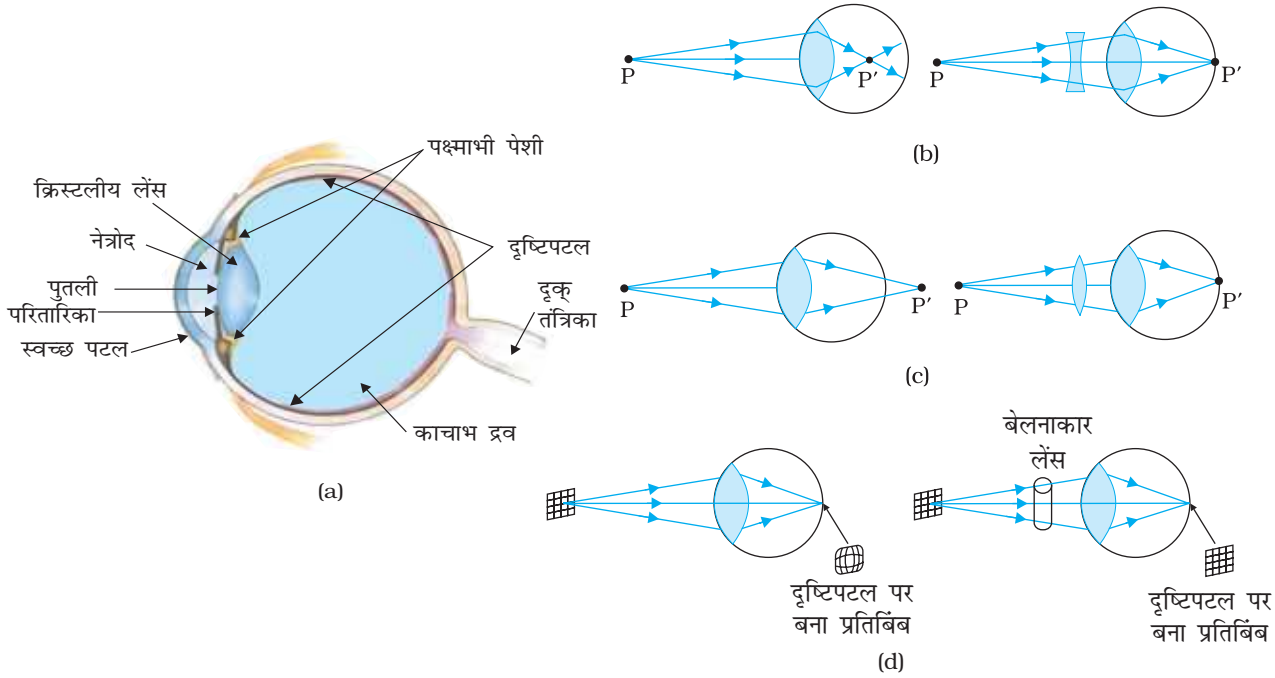
दर्पणों, लेंसों तथा प्रिज़्मों के परावर्ती तथा अपवर्ती गुणों का उपयोग करके अनेक प्रकाशिक युक्तियाँ एवं यंत्र डिज़ाइन किए गए हैं। परिदर्शी, बहुमूर्तिदर्शी, द्विनेत्री, दूरदर्शक, सूक्ष्मदर्शी कुछ ऐसी प्रकाशिक युक्तियों तथा यंत्रों के उदाहरण हैं जिन्हें हम सामान्य रूप से उपयोग में लाते हैं। वास्तव में हमारे नेत्र सबसे महत्वपूर्ण प्रकाशिक युक्तियों में से एक हैं जिनसे प्रकृति ने हमें संपन्न किया है। नेत्र से प्रारंभ करके हम सूक्ष्मदर्शी तथा दूरबीन के कार्य करने के सिद्धांत का वर्णन करेंगे।

9.9.1 नेत्र

चित्र 9.29 (a) में नेत्र दर्शाया गया है। प्रकाश, नेत्र में सामने के वक्रीय पृष्ठ जिसे कॉर्निया या स्वच्छ पटल कहते हैं, से प्रवेश करता है। तत्पश्चात यह पुतली से जो कि परितारिका में केंद्रीय छिद्र होता है, से गुज़रता है। पुतली के आकार को पेशियाँ नियंत्रित करती हैं। नेत्र लेंस इस प्रकाश को और फ़ोकसित करके दृष्टिपटल (रेटिना) पर प्रतिबिंब बना देता है। दृष्टिपटल तंत्रिका तंतुओं की एक पतली झिल्ली होती है जो नेत्र के पीछे के वक्रित पृष्ठ को ढके रखती है। दृष्टिपटल में शलाका और शंकु होते हैं जो क्रमशः प्रकाश की तीव्रता तथा वर्ण के प्रति संवेदनशील होते हैं तथा दृक् तंत्रिकाओं से होकर विद्युतीय सिगनलों को मस्तिष्क तक प्रेषित करते हैं, जो इस सूचना को अंततः संसाधित करता है। पक्ष्माभी पेशियों के द्वारा नेत्र लेंस की आकृति (वक्रता) और इसलिए फ़ोकस दूरी कुछ-कुछ आपरिवर्तित की जा सकती है। उदाहरण के लिए, जब पेशियाँ शिथिल होती हैं तो नेत्र लेंस की फ़ोकस दूरी लगभग 2.5 cm होती है तथा अनंत दूरी के पिंड दृष्टिपटल पर स्पष्ट फ़ोकसित होते हैं। जब वस्तु को नेत्र के निकट लाया जाता है तो, प्रतिबिंब तथा लेंस के बीच की दूरी ($\cong$ 2.5 cm) वही बनाए रखने के लिए पक्ष्माभी पेशियों की क्रिया (सिकुड़ने) द्वारा लेंस की फ़ोकस दूरी कम हो जाती है। नेत्र के इस गुण को *समंजन क्षमता* कहते हैं। यदि वस्तु नेत्र के बहुत निकट है तो लेंस इतना अधिक वक्रित नहीं हो पाता कि उस वस्तु का स्पष्ट प्रतिबिंब दृष्टिपटल पर बना सके, जिसके फलस्वरूप वस्तु का धुँधला प्रतिबिंब बनता है। वह कम से कम दूरी जिस पर रखी वस्तु का सामान्य नेत्र लेंस स्पष्ट प्रतिबिंब दृष्टिपटल पर बना देता है, उसे *स्पष्ट दर्शन की अल्पतम दूरी* अथवा सामान्य नेत्र का *निकट बिंदु* कहते हैं। सामान्य व्यक्ति के लिए इसका मानक मान 25 cm लिया गया है। (प्रायः निकट बिंदु को प्रतीक D द्वारा निर्दिष्ट किया जाता है।) यह दूरी आयु में वृद्धि के साथ बढ़ती जाती है, क्योंकि आयु में वृद्धि के साथ पक्ष्माभी पेशियाँ उतनी प्रभावकारी नहीं रह पातीं तथा साथ ही लेंस का लचीलापन भी घट जाता है। 10 वर्ष के बालक के नेत्र का निकट बिंदु लगभग 7 से 8 cm तक होता है जबकि 60 वर्ष की आयु तक पहुँचने पर यह लगभग 200 cm तक पहुँच सकता है। अतः यदि कोई अधिक आयु का व्यक्ति पुस्तक को नेत्र से 25 cm दूरी पर रखकर पढ़ना चाहे तो उसको प्रतिबिंब धुँधला प्रतीत होता है। यह अवस्था *जरा दूरदर्शिता* (नेत्र का दोष) कहलाती है। पढ़ने के लिए अभिसारी लेंस का उपयोग करके इसे संशोधित किया जाता है।

इस प्रकार, नेत्र हमारे शरीर के अद्भुत अंग हैं, जिनमें कुछ जटिल प्रक्रमों द्वारा आने वाली वैद्युतचुंबकीय तरंगों को प्रतिबिंबों के रूप में समझने की क्षमता होती है। ये हमारी सबसे बड़ी संपत्ति हैं तथा इन्हें सुरक्षित रखने के लिए हमें इनकी उचित देखभाल करनी चाहिए। ज़रा इस संसार की कल्पना बिना क्रियात्मक नेत्रों के युगल के कीजिए। फिर भी हममें से अनेक ऐसे हैं जो बहादुरी के साथ इस चुनौती का सामना करते हैं तथा प्रभावशाली ढंग से अपनी सीमाओं पर नियंत्रण करके सामान्य जीवन व्यतीत करते हैं। वे अपने साहस तथा दृढ़ विश्वास के लिए हमारी प्रशंसा के पात्र हैं।

सभी सावधानियों एवं रक्षात्मक कार्रवाई होने पर भी बहुधा अनेक कारणों से हमारी आँखों में कुछ दोष विकसित हो जाते हैं। हम अपनी चर्चा को नेत्रों के कुछ सामान्य प्रकाशिक दोषों तक ही सीमित रखेंगे। उदाहरण के लिए, किसी दूरस्थ वस्तु से आने वाले प्रकाश को नेत्र लेंस दृष्टिपटल से पहले ही किसी बिंदु पर अभिसरित कर सकता है। इस दोष को *निकट दृष्टिदोष* अथवा *मायोपिया* कहते हैं। इसका अर्थ यह है कि नेत्र आपतित पुंज को अत्यधिक अभिसरित कर रहा है। इसे प्रतिकारित करने के लिए हम नेत्र तथा वस्तु के बीच कोई ऐसा अवतल लेंस सन्निविष्ट करते हैं कि जिसके अपसारी प्रभाव के कारण प्रतिबिंब दृष्टिपटल पर सही फ़ोकसित हो जाए [चित्र 9.29 (b)]।



चित्र 9.29 (a) नेत्र की संरचना; (b) निकट दृष्टि दोषयुक्त नेत्र तथा इसका संशोधन; (c) दीर्घ दृष्टि दोषयुक्त नेत्र तथा इसका संशोधन; तथा (d) अबिंदुक नेत्र तथा इसका संशोधन।

इसी प्रकार, यदि नेत्र लेंस किसी वस्तु के प्रतिबिंब को दृष्टिपटल के पीछे किसी बिंदु पर फ़ोकसित करता है तो इसे प्रतिकारित करने के लिए अभिसारी लेंस की आवश्यकता होती है। इस दोष को *दीर्घ दृष्टिदोष* अथवा *हाइपरमेट्रोपिया* कहते हैं [चित्र 9.29 (c)]।

एक अन्य सामान्य दृष्टिदोष *अबिंदुकता* है। यह दोष तब उत्पन्न होता है जब स्वच्छ पटल की आकृति गोलीय नहीं होती। उदाहरणार्थ, स्वच्छ पटल की वक्रता त्रिज्या क्षैतिज तल की अपेक्षा ऊर्ध्वाधर तल में (अथवा विलोमत:) अधिक हो सकती है। यदि नेत्र लेंस में इस दोष से युक्त कोई व्यक्ति किसी तार की जाली या रेखाओं की जाली को देखेगा तो या तो ऊर्ध्वाधर अथवा क्षैतिज तल में फ़ोकसन दूसरे की अपेक्षा स्पष्ट नहीं होगा। अबिंदुकता के कारण किसी एक दिशा की रेखाएँ तो भली-भाँति फ़ोकसित हो जाती हैं, जबकि इन रेखाओं के लंबवत दिशा की रेखाएँ भली-भाँति फ़ोकसित नहीं हो पातीं [चित्र 9.29 (d)]। अबिंदुकता दोष को संशोधित करने के लिए किसी सिलिंडरी अथवा बेलनाकार लेंस का प्रयोग करते हैं। इस लेंस की वक्रता त्रिज्या तथा अक्ष दिशा का उचित चयन करके इस दोष को संशोधित करते हैं। यह दोष निकट दृष्टि दोष अथवा दीर्घ दृष्टि दोष के साथ-साथ हो सकता है।

उदाहरण 9.10 किसी व्यक्ति जिसके लिए D का मान 50 cm है, के पढ़ने के लिए चश्मे के लेंस की फ़ोकस दूरी क्या होनी चाहिए?

हल सामान्य दृष्टि की दूरी 25 cm है। अत: यदि पुस्तक की नेत्र से दूरी $u = -25$ cm, प्रतिबिंब $v = -50$ cm दूर बनना चाहिए। अत: वांछित फ़ोकस दूरी प्राप्त होगी

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u}$$

या $\frac{1}{f} = \frac{1}{-50} - \frac{1}{-25} = \frac{1}{50}$

अथवा $f = +50$ cm (उत्तल लेंस)

उदाहरण 9.10

उदाहरण 9.11

उदाहरण 9.11

(a) निकट दृष्टि दोषयुक्त किसी व्यक्ति का दूर बिंदु, नेत्र के सामने 80 cm दूर है। उस लेंस की अपेक्षित क्षमता क्या होगी जो इस व्यक्ति को बहुत दूर की वस्तुओं को स्पष्ट देखने योग्य बना देगा?

(b) संशोधक लेंस किस प्रकार उपरोक्त व्यक्ति की सहायता करता है? क्या लेंस बहुत दूर की वस्तुओं को आवर्धित करता है? सावधानीपूर्वक उत्तर दीजिए।

(c) उपरोक्त व्यक्ति पुस्तक पढ़ते समय अपना चश्मा उतारना चाहता है। स्पष्ट कीजिए ऐसा क्यों है?

हल

(a) अवतल लेंस की फ़ोकस दूरी = – 80 cm, क्षमता = – 1.25 डाइऑप्टर

(b) नहीं। वास्तव में अवतल लेंस किसी वस्तु के आकार को घटा देता है, परंतु दूरस्थ वस्तु द्वारा नेत्र पर अंतरित कोण प्रतिबिंब द्वारा (दूर बिंदु पर) नेत्र पर अंतरित कोण के समान होता है। नेत्र दूरस्थ वस्तु को इसलिए देखने योग्य नहीं हो जाता कि संशोधक लेंस ने वस्तु को आवर्धित कर दिया है, वरन इसलिए देखने योग्य हो जाता है कि यह वस्तु (अर्थात वस्तु का आभासी प्रतिबिंब बनाकर) को नेत्र के दूर बिंदु पर ले आता है जिसे नेत्र लेंस दृष्टिपटल पर फ़ोकसित कर देता है।

(c) निकट दृष्टि दोषयुक्त व्यक्ति का सामान्य निकट बिंदु लगभग 25 cm दूर (अथवा इससे भी कम) हो सकता है। अपने चश्मे (दूर की वस्तु को देखने के लिए) के साथ पुस्तक पढ़ने के लिए, उसे पुस्तक को 25 cm से अधिक दूरी पर रखना चाहिए, ताकि पुस्तक का अवतल लेंस द्वारा बना प्रतिबिंब 25 cm से कम दूरी पर न बने। पुस्तक का कोणीय साइज़ (अथवा इसके प्रतिबिंब) जब वे 25 cm से अधिक दूरी पर स्थित होते हैं, स्पष्ट रूप से उस साइज़ से छोटा होता है जब उसे बिना चश्मा लगाए 25 cm की दूरी पर रखकर देखते हैं। अत: वह व्यक्ति चश्मा उतारकर ही पढ़ना पसंद करता है।

उदाहरण 9.12

उदाहरण 9.12 (a) दीर्घ दृष्टि दोषयुक्त किसी व्यक्ति का निकट बिंदु नेत्र से 75 cm दूर है। उस लेंस की आवश्यक क्षमता क्या होगी जो इस व्यक्ति को नेत्र से 25 cm की दूरी पर रखी पुस्तक को स्पष्ट पढ़ने योग्य बना देगा?

(b) संशोधक लेंस किस प्रकार उपरोक्त व्यक्ति की सहायता करता है? क्या लेंस नेत्र के निकट की वस्तुओं को आवर्धित करता है?

(c) उपरोक्त व्यक्ति आकाश देखते समय अपना चश्मा उतारना चाहता है। स्पष्ट कीजिए ऐसा क्यों है?

हल

(a) $u = -25$ cm, $v = -75$ cm

$1/f = 1/25 - 1/75$, अर्थात $f = 37.5$ cm

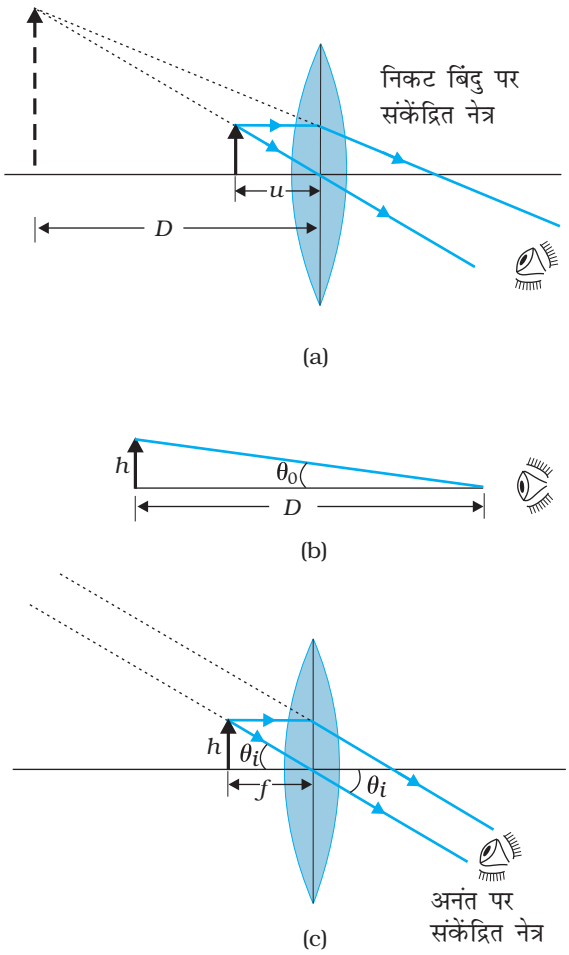
संशोधक लेंस की अभिसारी क्षमता +2.67 डाइऑप्टर है।

(b) संशोधक लेंस 25 cm दूर रखे बिंब का आभासी प्रतिबिंब (75 cm पर) बनाता है। इस प्रतिबिंब का कोणीय साइज़ बिंब (वस्तु) के कोणीय साइज़ के बराबर होता है। इसका यह अर्थ है कि लेंस बिंब का आवर्धन नहीं करता केवल बिंब को निकट ला देता है जिसे नेत्र अपने नेत्र लेंस द्वारा दृष्टिपटल पर फ़ोकसित कर लेता है। तथापि, यह कोणीय साइज़ उस साइज़ से अधिक होता है जब बिना चश्मे के उसी बिंब को निकट बिंदु (75 cm) पर रखकर देखा जाता है।

(c) किसी दीर्घ दृष्टि दोषयुक्त नेत्र का दूरबिंदु सामान्य है, अर्थात इसकी अनंत से आने वाले समांतर प्रकाश-पुंज को फोकसित कर सकने की अभिसरण क्षमता इतनी है कि वह लघुकृत नेत्र गोले के दृष्टिपटल पर इस पुंज को फोकसित कर लेता है। अभिसारी लेंसों का चश्मा पहनने पर (निकट की वस्तुओं के देखने के लिए) उसे समांतर किरणों को फ़ोकसित करने के लिए जितनी अभिसरण क्षमता चाहिए उससे अधिक हो जाएगी। इसलिए वह व्यक्ति दूर की वस्तुओं को देखने के लिए चश्मा लगाना पसंद नहीं करता।

9.9.2 सूक्ष्मदर्शी

सरल आवर्धक अथवा सरल सूक्ष्मदर्शी कम फ़ोकस दूरी का एक अभिसारी लेंस होता है (चित्र 9.30)। इस प्रकार के लेंस को सूक्ष्मदर्शी के रूप में प्रयोग करने के लिए, लेंस को बिंब के निकट उससे एक फ़ोकस दूरी अथवा उससे कम दूरी पर रखा जाता है तथा लेंस के दूसरी ओर नेत्र को लेंस से सटाकर रखा जाता है। ऐसा करने का लक्ष्य है कि बिंब का सीधा, आवर्धित तथा आभासी प्रतिबिंब किसी ऐसी दूरी पर बने कि नेत्र उसे सरलतापूर्वक देख सकें, अर्थात प्रतिबिंब 25 cm अथवा कुछ अधिक दूरी पर बनना चाहिए। यदि बिंब f पर स्थित है तो उसका प्रतिबिंब अनंत पर बनता है। तथापि, यदि बिंब f से कम दूरी पर रखा हो, तो प्रतिबिंब आभासी तथा अनंत की तुलना में कम दूरी पर बनता है। यद्यपि देखने के लिए निकटतम आरामदेह दूरी, निकट बिंदु (दूरी $D \cong 25$ cm) पर होती है, परंतु इससे नेत्रों पर कुछ तनाव पड़ता है। इसीलिए, प्रायः अनंत पर बना प्रतिबिंब शिथिल नेत्रों द्वारा देखने के लिए उचित माना जाता है। यहाँ पर दोनों स्थितियाँ दर्शायी गई हैं, पहली चित्र 9.30 (a), में तथा दूसरी चित्र 9.30 (b) तथा (c) में।



चित्र 9.30 सरल सूक्ष्म दर्शी (a) आवर्धक लेंस इस प्रकार स्थित है कि प्रतिबिंब निकट बिंदु पर बनता है, (b) बिंब द्वारा अंतरित कोण, निकट बिंदु पर अंतरित कोण के समान है तथा (c) बिंब लेंस के फ़ोकस बिंदु पर, प्रतिबिंब बहुत दूर है लेकिन अनंत से पास है।

सरल सूक्ष्मदर्शी द्वारा निकट बिंदु D पर बने प्रतिबिंब के लिए रैखिक आवर्धन m का परिकलन निम्न संबंध द्वारा किया जा सकता है।

$$m = \frac{v}{u} = v\left(\frac{1}{v} - \frac{1}{f}\right) = \left(1 - \frac{v}{f}\right)$$

अब हमारी चिह्न परिपाटी के अनुसार v ऋणात्मक है तथा परिमाण में D के बराबर है। अतः आवर्धन,

$$m = \left(1 + \frac{D}{f}\right) \qquad (9.39)$$

क्योंकि D लगभग 25 cm है। अतः आवर्धन 6 प्राप्त करने के लिए फ़ोकस दूरी $f = 5$ cm के उत्तल लेंस की आवश्यकता होती है।

ध्यान दीजिए, $m = h'/h$, यहाँ h बिंब का साइज़ तथा h' प्रतिबिंब का साइज़ है। यह प्रतिबिंब द्वारा अंतरित कोण तथा बिंब द्वारा अंतरित कोण का भी अनुपात होता है, जबकि उन्हें आराम से देखने के लिए D पर रखा जाता है। (नोट कीजिए कि यह वास्तव में बिंब द्वारा नेत्र पर अंतरित कोण नहीं है, जिसे h/u द्वारा व्यक्त किया गया है।) एकल-लेंस सरल आवर्धक की उपलब्धि यह है कि वस्तु को D की तुलना में काफ़ी निकट रखकर देखना संभव हो जाता है।

अब जब प्रतिबिंब अनंत पर बनता है तो हम आवर्धन ज्ञात करेंगे। इस स्थिति में हमें कोणीय आवर्धन का परिकलन करना होगा। मान लीजिए बिंब की ऊँचाई h है। इस बिंब द्वारा नेत्र पर अंतरित अधिकतम कोण, जबकि बिंब स्पष्ट भी दिखाई देता हो (बिना किसी लेंस के), तब होता है जब हम बिंब को निकट अर्थात दूरी D पर रखते हैं। तब अंतरित कोण प्राप्त होगा

$$\tan \theta_0 = \left(\frac{h}{D}\right) \approx \theta_0 \qquad (9.40)$$

अब हम प्रतिबिंब द्वारा नेत्र पर अंतरित कोण, जबकि बिंब u पर रखा है, ज्ञात करते हैं।

संबंध $\frac{h'}{h} = m = \frac{v}{u}$ से प्रतिबिंब द्वारा नेत्र पर अंतरित कोण

$\tan\theta_i = \frac{h'}{-v} = \frac{h}{-v}\cdot\frac{v}{u} = \frac{h}{-u} \approx \theta$; बिंब द्वारा अंतरित कोण, जबकि बिंब अब $u = -f$ पर है

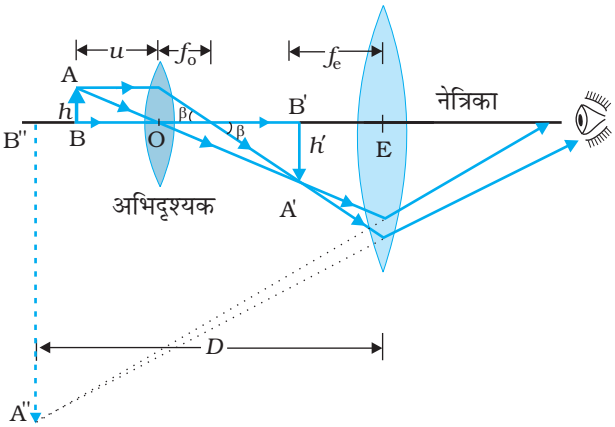
$$\theta_i = \left(\frac{h}{f}\right) \tag{9.41}$$

जैसा कि चित्र 9.29 (c) से स्पष्ट है। अत: कोणीय आवर्धन (आवर्धन क्षमता) है

$$m = \left(\frac{\theta_i}{\theta_0}\right) = \frac{D}{f} \tag{9.42}$$

यह उस स्थिति के आवर्धन की तुलना में एक कम है, जिसमें प्रतिबिंब निकट बिंदु पर बनता है, समीकरण (9.39), परंतु प्रतिबिंब देखना अपेक्षाकृत अधिक आरामदायक होता है तथा आवर्धन में अंतर भी अपेक्षाकृत कम है। प्रकाशिक यंत्रों (सूक्ष्मदर्शी तथा दूरबीन) से संबंधित आगामी चर्चाओं में हम यह मानेंगे कि प्रतिबिंब अनंत पर बने हैं।

वास्तविक फ़ोकस दूरियों के लेंसों के लिए किसी सरल सूक्ष्मदर्शी का अधिकतम आवर्धन (≤ 9) होता है। अधिक आवर्धन के लिए दो लेंसों का उपयोग किया जाता है, जिनमें एक लेंस दूसरे लेंस के प्रभाव को संयुक्त (बढ़ाता) करता है। इसे *संयुक्त सूक्ष्मदर्शी* कहते हैं। चित्र 9.31 में संयुक्त सूक्ष्मदर्शी का व्यवस्था आरेख दर्शाया गया है। बिंब के सबसे निकट के लेंस को *अभिदृश्यक* (objective) कहते हैं जो बिंब का वास्तविक, उलटा, आवर्धित प्रतिबिंब बनाता है। यह प्रतिबिंब दूसरे लेंस के लिए बिंब का कार्य करता है। इस दूसरे लेंस को *नेत्रिका* (eye-piece) कहते हैं, जो वास्तविक रूप से सरल सूक्ष्मदर्शी अथवा आवर्धक के रूप में कार्य करके अंतिम आवर्धित आभासी प्रतिबिंब बनाता है। इस प्रकार पहला उलटा प्रतिबिंब नेत्रिका के फोकस बिंदु के निकट (फ़ोकस पर या इसके अंदर) होता है, यह नेत्रिका से इतनी दूरी पर होता है जो अंतिम प्रतिबिंब को अनंत पर बनाने के लिए उपयुक्त होती है तथा उस स्थिति के भी काफ़ी निकट होती है जिस पर यदि प्रतिबिंब स्थित हो तो अंतिम निकट बिंदु पर बने। स्पष्टत:, अंतिम प्रतिबिंब मूल बिंब के सापेक्ष उलटा बनता है।



चित्र 9.31 संयुक्त सूक्ष्मदर्शी द्वारा प्रतिबिंब बनने का किरण आरेख।

अब हम संयुक्त सूक्ष्मदर्शी के कारण आवर्धन प्राप्त करेंगे। चित्र 9.31 का किरण आरेख यह दर्शाता है कि अभिदृश्यक के कारण (रैखिक) आवर्धन, अर्थात h'/h, बराबर है

$$m_0 = \frac{h'}{h} = \frac{L}{f_0} \tag{9.43}$$

यहाँ हमने इस परिमाण का उपयोग किया है

$$\tan\beta = \left(\frac{h}{f_0}\right) = \left(\frac{h'}{L}\right)$$

यहाँ h' पहले प्रतिबिंब का साइज़ है तथा बिंब का साइज़ h एवं अभिदृश्यक की फ़ोकस दूरी f_0 है। पहला प्रतिबिंब नेत्रिका के फ़ोकस बिंदु के निकट बनता है। दूरी L, अर्थात, अभिदृश्यक के द्वितीय फ़ोकस बिंदु तथा नेत्रिका (फ़ोकस दूरी f_e) के पहले फ़ोकस बिंदु के बीच की दूरी को संयुक्त सूक्ष्मदर्शी की ट्यूब लंबाई कहते हैं।

क्योंकि पहला उलटा प्रतिबिंब नेत्रिका के फ़ोकस बिंदु के निकट बनता है, उपरोक्त चर्चा से प्राप्त परिणाम का उपयोग हम सरल सूक्ष्मदर्शी के लिए करके इसके कारण (कोणीय) आवर्धन m_e प्राप्त करते हैं [समीकरण 9.39], जबकि अंतिम प्रतिबिंब किसी निकट बिंदु पर बनता है। यह है

$$m_e = \left(1 + \frac{D}{f_e}\right) \qquad [9.44(a)]$$

जब प्रतिबिंब अनंत पर बनता है तो नेत्रिका के कारण कोणीय आवर्धन [समीकरण (9.42)] है

$$m_e = (D/f_e) \qquad [9.44(b)]$$

अत: कुल आवर्धन [समीकरण (9.33) के अनुसार], जबकि प्रतिबिंब अनंत पर बनता है, है

$$m = m_0 m_e = \left(\frac{L}{f_0}\right) \quad \left(\frac{D}{f_e}\right) \qquad (9.45)$$

स्पष्ट है कि किसी *छोटी* वस्तु का बड़ा आवर्धन प्राप्त करने के लिए (इसीलिए सूक्ष्मदर्शी नाम रखा गया है) अभिदृश्यक तथा नेत्रिका की फ़ोकस दूरी कम होनी चाहिए। व्यवहार में,1 cm से कम फ़ोकस दूरी का लेंस बनाना अत्यंत कठिन कार्य है। इसी के साथ L को बड़ा करने के लिए बड़े लेंसों की आवश्यकता होती है।

उदाहरण के लिए, किसी f_o = 1.0 cm के अभिदृश्यक f_e = 2.0 cm की नेत्रिका तथा ट्यूब लंबाई (L) = 20 cm के लिए संयुक्त सूक्ष्मदर्शी का आवर्धन

$$m = m_0 m_e = \left(\frac{L}{f_0}\right) \quad \left(\frac{D}{f_e}\right)$$

$$= \frac{20}{1} \times \frac{25}{2} = 250$$

अन्य विभिन्न कारक जैसे वस्तु की प्रदीप्ति भी प्रतिबिंब की दृश्यता एवं गुणता में महत्वपूर्ण योगदान देते हैं। आधुनिक सूक्ष्मदर्शियों में, अभिदृश्यक तथा नेत्रिका बहुअवयवी लेंसों द्वारा बनाए जाते हैं, जिनके कारण लेंसों के प्रकाशिक विपथनों (दोष) को कम करके प्रतिबिंबों की गुणता में सुधार किया जाता है।

9.9.3 दूरदर्शक

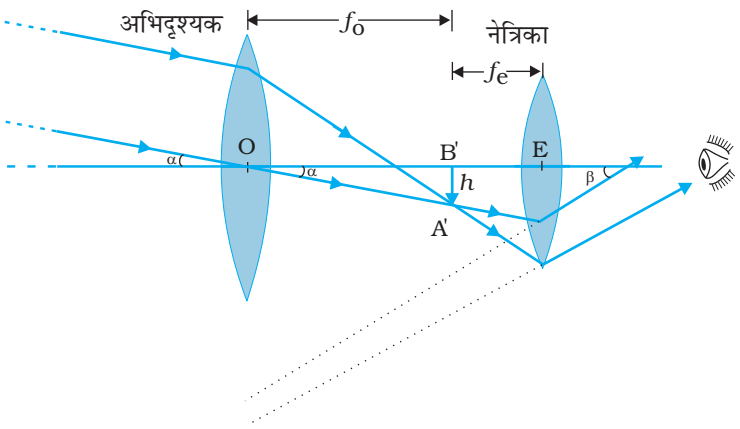
दूरदर्शक अथवा दूरबीन (चित्र 9.32) का उपयोग दूर की वस्तुओं को कोणीय आवर्धन प्रदान करने के लिए किया जाता है। इसमें भी एक अभिदृश्यक तथा एक नेत्रिका होती है। परंतु यहाँ पर, नेत्रिका की अपेक्षा अभिदृश्यक की फ़ोकस दूरी अधिक तथा इसका द्वारक भी काफ़ी अधिक होता है। किसी दूरस्थ बिंब से चलकर प्रकाश अभिदृश्यक में प्रवेश करता है तथा ट्यूब के अंदर इसके द्वितीय फ़ोकस पर वास्तविक प्रतिबिंब बनता है। नेत्रिका इस प्रतिबिंब को आवर्धित करके अंतिम उलटा प्रतिबिंब बनाती है। आवर्धन क्षमता m, प्रतिबिंब द्वारा नेत्र पर अंतरित कोण β तथा बिंब द्वारा नेत्र पर अथवा लेंस पर अंतरित कोण α के अनुपात द्वारा परिभाषित किया जाता है। अत:

$$m \approx \frac{\beta}{\alpha} \approx \frac{h}{f_e} \cdot \frac{f_0}{h} = \frac{f_0}{f_e} \qquad (9.46)$$

इस स्थिति में, दूरदर्शक की ट्यूब की लंबाई है $f_o + f_e$

पार्थिव दूरदर्शकों में, इन लेंसों के अतिरिक्त, प्रतिलोमी लेंसों का एक युगल होता है जो अंतिम प्रतिबिंब को सीधा बना देता है। अपवर्ती दूरदर्शक का उपयोग पार्थिव एवं खगोलीय दोनों प्रकार के

संसार की सबसे बड़ी प्रकाशिक दूरबीन
http://astro.nineplanets.org/bigeyes.html



चित्र 9.32 परावर्ती दूरदर्शक (कैसेग्रेन) का व्यवस्था आरेख

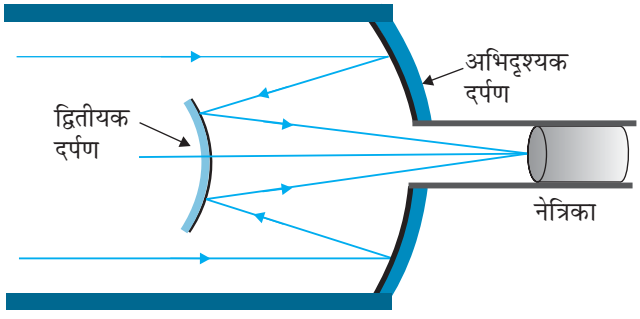
प्रेक्षणों के लिए किया जा सकता है। उदाहरण के लिए, किसी ऐसे दूरदर्शक पर विचार कीजिए जिसके अभिदृश्यक की फ़ोकस दूरी 100 cm तथा नेत्रिका की फ़ोकस दूरी 1 cm है। इस दूरबीन की आवर्धन क्षमता

$$m = 100/1 = 100$$

अब किन्हीं दो तारों के युगल पर विचार कीजिए जिनका वास्तविक पृथकन 1′ (1 मिनट का चाप) है। ये तारे उपरोक्त दूरदर्शक से देखने पर इस प्रकार प्रतीत होते हैं जैसे कि इनके बीच के पृथकन-कोण $100 \times 1' = 100' = 1.67^\circ$ है।

किसी खगोलीय दूरदर्शक के बारे में ध्यान देने योग्य मुख्य बातें उसकी प्रकाश संग्रहण क्षमता तथा इसकी विभेदन क्षमता अथवा विभेदन है। प्रकाश संग्रहण क्षमता स्पष्ट रूप से दूरदर्शक के अभिदृश्यक के क्षेत्रफल पर निर्भर करती है। यदि अभिदृश्यक का व्यास बड़ा है तो धुँधले पिंडों का भी प्रेक्षण किया जा सकता है। विभेदन क्षमता अथवा एक ही दिशा में दो अत्यधिक निकट की वस्तुओं को सुस्पष्टत: भिन्न प्रेक्षित करने की योग्यता भी अभिदृश्यक के व्यास पर निर्भर करती है। अत: प्रकाशिक दूरदर्शक में वांछित उद्देश्य यह होता है। कि अभिदृश्यक का व्यास अधिकतम हो। आजकल उपयोग होने वाले अभिदृश्यक लेंस का अधिकतम व्यास 40 इंच (~1.02 m) है। यह दूरदर्शक यर्केज वेधशाला, विस्कॉनसिन, संयुक्त राज्य अमेरिका में है। इतने बड़े लेंस अत्यधिक भारी होते हैं, अत: इन्हें बनाना तथा किनारों के सहारे टिकाकर रखना कठिन कार्य है। इसके अतिरिक्त इतने बड़े साइज़ के लेंसों को इस प्रकार बनाना कि प्रतिबिंबों में वर्ण विपथन तथा अन्य विरूपण न आएँ, बहुत कठिन तथा मँहगा कार्य है।

यही कारण है कि आधुनिक दूरदर्शकों में अभिदृश्यक के रूप में लेंस के स्थान पर अवतल दर्पण का उपयोग किया जाता है। ऐसे दूरदर्शकों को जिनमें अभिदृश्यक दर्पण होता है, *परावर्ती* दूरदर्शक (दूरबीन) कहते हैं। इनके अनेक लाभ हैं। पहला, दर्पण में कोई वर्ण विपथन नहीं होता। दूसरा, यदि किसी परवलीय परावर्ती पृष्ठ का चयन किया जाए तो गोलीय विपथन का दोष भी समाप्त हो जाता है। यांत्रिक सहारा देने की समस्या भी काफ़ी कम होती है क्योंकि लेंस की तुलना में, तुल्य प्रकाशिक गुणता का दर्पण अपेक्षाकृत कम भारी होता है तथा दर्पण को केवल रिम पर ही सहारा देने की बजाय उसके समस्त पीछे के पृष्ठ को सहारा प्रदान किया जा सकता है। परावर्ती दूरबीन की एक सुस्पष्ट समस्या यह होती है कि अभिदृश्यक दर्पण दूरदर्शक की नली के भीतर प्रकाश को फ़ोकसित करता है। अत: नेत्रिका तथा प्रेक्षक को उसी स्थान पर होना चाहिए जिससे प्रकाश के मार्ग में अवरोध के कारण कुछ प्रकाश कम हो जाता है (यह अवरोध प्रेक्षक के बैठने के लिए बनाए गए पिंजरेनुमा कमरे के साइज़ पर निर्भर करता है)। ऐसा ही प्रयोग अति विशाल 200 इंच (~5.08 m) व्यास के माउंट पेलोमर दूरदर्शक, कैलिफ़ोर्निया में किया गया है। प्रेक्षक एक छोटे पिंजरे में दर्पण के फ़ोकस बिंदु के निकट बैठता है। इस समस्या का एक अन्य समाधान यह है कि फोकसित होने वाले प्रकाश को किसी अन्य दर्पण द्वारा विक्षेपित कर दिया जाए। ऐसी ही एक व्यवस्था चित्र 9.33 में दर्शायी गई है, जिसमें आपतित प्रकाश को फ़ोकसित करने के लिए किसी उत्तल द्वितीयक दर्पण का उपयोग किया जाता है जो अब अभिदृश्यक (प्राथमिक दर्पण) के



चित्र 9.33 परावर्ती दूरदर्शक (कैसेग्रेन) का व्यवस्था आरेख।

छिद्र से गुज़रता है। इस दूरदर्शक को इसके आविष्कारक के नाम पर *कैसेग्रेन दूरदर्शक* (Cassegrain telescope) कहते हैं। इसका एक लाभ यह है कि छोटे दूरदर्शक में बड़ी फ़ोकस दूरी होती है। भारतवर्ष में सबसे बड़ा दूरदर्शक कवलूर, तमिलनाडु में है। यह 2.34 m व्यास की कैसेग्रेन परावर्ती दूरदर्शक है। इसे घर्षित किया गया, फिर पॉलिश की गई और व्यवस्थित किया गया तथा अब इसे भारतीय खगोल भौतिकी संस्थान, बंगलुरू द्वारा प्रयोग किया जा रहा है। संसार का सबसे बड़ा परावर्ती दूरदर्शक हवाई, संयुक्त राज्य अमेरिका में कैक दूरदर्शकों का युगल है जिसके परावर्तक का व्यास 10 मीटर है।

सारांश

1. परावर्तन समीकरण $\angle i = \angle r'$ द्वारा तथा अपवर्तन स्नेल के नियम $\sin i/\sin r = n$ द्वारा अभिनियंत्रित होता है, जहाँ आपतित किरण, परावर्तित किरण, अपवर्तित किरण तथा अभिलंब एक ही समतल में होते हैं। यहाँ पर कोण i, r' तथा r, क्रमशः आपतन कोण, परावर्तन कोण तथा अपवर्तन कोण हैं।
2. सघन माध्यम से विरल माध्यम में आपतित किरण के लिए *क्रांतिक आपतन कोण* i_c वह कोण है जिसके लिए अपवर्तन कोण 90° है। $i > i_c$ होने पर पूर्ण आंतरिक परावर्तन होता है। हीरे में बहुगुणित आंतरिक परावर्तन ($i_c \cong 24.4°$), पूर्ण परावर्तक प्रिज़्म तथा मरीचिका, पूर्ण आंतरिक परावर्तन के कुछ उदाहरण हैं। प्रकाशिक तंतु, काँच के तंतुओं के बने होते हैं जिन पर अपेक्षाकृत *कम* अपवर्तनांक के पदार्थ की पतली परत का लेपन होता है। प्रकाशिक तंतु के किसी एक सिरे पर आपतित प्रकाश, बहुगुणित आंतरिक परावर्तन द्वारा दूसरे सिरे से निकलता है, प्रकाशिक तंतु के मुड़ा होने पर भी ऐसा होता है।
3. *कार्तीय चिह्न परिपाटी*– आपतित प्रकाश की दिशा में मापी गई दूरियाँ धनात्मक तथा इसके विपरीत दिशा में मापी गई दूरियाँ ऋणात्मक ली जाती हैं। सभी दूरियाँ मुख्य अक्ष पर दर्पण के ध्रुव/लेंस के प्रकाशिक केंद्र से मापी जाती हैं। x-अक्ष के उपरिमुखी तथा दर्पण/लेंस के मुख्य अक्ष के अभिलंबवत मापी गई ऊँचाइयाँ धनात्मक ली जाती हैं। अधोमुखी दिशा में मापी गई ऊँचाइयाँ ऋणात्मक ली जाती हैं।
4. दर्पण समीकरण

$$\frac{1}{v}+\frac{1}{u}=\frac{1}{f}$$

यहाँ u तथा v क्रमशः बिंब दूरी तथा प्रतिबिंब दूरी हैं तथा f दर्पण की फ़ोकस दूरी है। f (सन्निकटतः) वक्रता त्रिज्या R की आधी होती है। अवतल दर्पण के लिए f ऋणात्मक तथा उत्तल दर्पण के लिए f धनात्मक होता है।
5. प्रिज़्म कोण A, अपवर्तनांक n_2 के किसी प्रिज़्म के लिए जो n_1 अपवर्तनांक के किसी माध्यम में रखा है।

$$n_{21}=\frac{n_2}{n_1}=\frac{\sin\left[(A+D_m)/2\right]}{\sin(A/2)}$$

यहाँ D_m न्यूनतम विचलन कोण है।
6. *किसी गोलीय अंतरापृष्ठ से अपवर्तन* [माध्यम 1 (अपवर्तनांक n_1) से माध्यम 2 (अपवर्तनांक n_2) की ओर]

$$\frac{n_2}{v}-\frac{n_1}{u}=\frac{n_2-n_1}{R}$$

पतले लेंस के लिए सूत्र

$$\frac{1}{v}-\frac{1}{u}=\frac{1}{f}$$

लेंस-मेकर सूत्र

$$\frac{1}{f} = \frac{(n_2 - n_1)}{n_1}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$$

R_1 तथा R_2 लेंस के पृष्ठों की वक्रता त्रिज्याएँ हैं। अभिसारी लेंस के लिए f धनात्मक है; अपसारी लेंस के लिए f ऋणात्मक है। लेंस की क्षमता $P = 1/f$।
लेंस की क्षमता का SI मात्रक डाइऑप्टर (D) है; 1 D = 1 m^{-1}।
यदि $f_1, f_2, f_3, \ldots$ फ़ोकस दूरी के कई पतले लेंस संपर्क में रखे हों तो इस संयोजन की प्रभावी फ़ोकस दूरी होगी

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} + \ldots$$

अनेक लेंसों के संयोजन की कुल क्षमता
$P = P_1 + P_2 + P_3 + \ldots$

7. *प्रकाश का परिक्षेपण*, प्रकाश का अपने संघटक वर्णों में विपाटन (विघटन) होता है।
8. *नेत्र* : नेत्र में लगभग 2.5 cm फोकस दूरी का एक उत्तल लेंस होता है। इस फोकस दूरी में परिवर्तन किया जा सकता है जिसके कारण प्रतिबिंब सदैव दृष्टिपटल पर बनता है। नेत्र की इस क्षमता को *समंजन* कहते हैं। दोषयुक्त नेत्र में, यदि प्रतिबिंब दृष्टिपटल से पहले फोकसित होता है (निकट दृष्टिदोष) तो किसी अपसारी संशोधक लेंस की आवश्यकता होती है; यदि प्रतिबिंब दृष्टिपटल से पीछे बनता है (दीर्घ दृष्टिदोष) तो अभिसारी संशोधक लेंस की आवश्यकता होती है। अबिंदुकता का संशोधन बेलनाकार लेंस द्वारा करते हैं।
9. किसी *सरल सूक्ष्मदर्शी की आवर्धन क्षमता* के परिमाण m को $m = 1 + (D/f)$ द्वारा व्यक्त किया जाता है, यहाँ $D = 25$ cm, स्पष्ट दर्शन की अल्पतम दूरी है तथा f उत्तल लेंस की फोकस दूरी है। यदि प्रतिबिंब अनंत पर बने तब $m = D/f$ होगा। किसी संयुक्त सूक्ष्मदर्शी के लिए आवर्धन क्षमता m को $m = m_e \times m_0$ के द्वारा व्यक्त किया जाता है, यहाँ $m_e = 1 + (D/f_e)$ नेत्रिका का आवर्धन तथा m_0 अभिदृश्यक द्वारा उत्पन्न आवर्धन है। सन्निकटतः

$$m = \frac{L}{f_0} \times \frac{D}{f_e}$$

यहाँ f_o तथा f_e क्रमशः अभिदृश्यक तथा नेत्रिका की फ़ोकस दूरियाँ हैं तथा L इन दोनों के फ़ोकस बिंदुओं के बीच की दूरी है।
10. *किसी दूरबीन की आवर्धन क्षमता*, प्रतिबिंब द्वारा नेत्र पर अंतरित कोण β तथा बिंब द्वारा नेत्र पर अंतरित कोण α का अनुपात होती है।

$$m = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{f_0}{f_e},$$

यहाँ f_0 तथा f_e क्रमशः अभिदृश्यक तथा नेत्रिका की फ़ोकस दूरियाँ हैं।

विचारणीय विषय

1. आपतन बिंदु पर परावर्तन तथा अपवर्तन के नियम सभी पृष्ठों तथा माध्यमों के युगलों के लिए मान्य हैं।
2. किसी उत्तल लेंस से f तथा $2f$ के बीच रखे किसी बिंब के वास्तविक प्रतिबिंब को प्रतिबिंब-स्थिति पर रखे पर्दे पर देखा जा सकता है। यदि पर्दे को हटा दें तो क्या फिर भी प्रतिबिंब वहाँ रहता है? यह प्रश्न बहुतों को दुविधा में डालता है, क्योंकि हमें स्वयं को भी यह समझा पाना कठिन होता है कि कोई प्रतिबिंब बिना किसी पर्दे के वायु में निलंबित कैसे

रह सकता है। परंतु प्रतिबिंब तो वहाँ रहता ही है। बिंब के किसी बिंदु से निर्गत प्रकाश किरणें दिक्स्थान में किसी प्रतिबिंब बिंदु पर अभिसरित होकर अपसरित हो जाती हैं। परदा केवल इन किरणों को विसरित करता है जिनमें से कुछ किरणें हमारे नेत्रों तक पहुँचती हैं और हम प्रतिबिंब देख पाते हैं। किसी लेज़र प्रदर्शन के समय बने प्रतिबिंबों द्वारा इसे देखा जा सकता है।

3. प्रतिबिंब बनने के लिए नियमित परावर्तन/अपवर्तन की आवश्यकता होती है। सिद्धांत रूप में, किसी बिंदु से निर्गत सभी किरणें एक ही प्रतिबिंब बिंदु पर पहुँचनी चाहिए। यही कारण है कि आप किसी अनियमित परावर्ती पृष्ठ, जैसे किसी पुस्तक के पृष्ठ में अपना प्रतिबिंब नहीं देखते।
4. मोटे लेंस परिक्षेपण के कारण रंगीन प्रतिबिंब बनाते हैं। हमारे चारों ओर की वस्तुओं के रंगों में विविधता उन पर आपतित प्रकाश के रंगों के संघटकों के कारण होती है। किसी वस्तु को एकवर्णी प्रकाश में देखने पर तथा श्वेत प्रकाश में देखने पर उस वस्तु के विषय में बिलकुल ही अलग बोध होता है।
5. किसी सरल सूक्ष्मदर्शी के लिए बिंब का कोणीय साइज़, प्रतिबिंब के कोणीय साइज़ के बराबर होता है। फिर भी वह आवर्धन प्रदान करता है क्योंकि आप सूक्ष्मदर्शी का उपयोग करते समय किसी छोटी वस्तु को अपने नेत्रों के बहुत निकट (25 cm से भी कम दूरी पर) रख सकते हैं, जिसके फलस्वरूप वह नेत्र पर बड़ा कोण अंतरित करता है। प्रतिबिंब, जिसे हम देख सकते हैं, 25 cm दूरी पर है। बिना सूक्ष्मदर्शी के आपको उस छोटी वस्तु को स्पष्ट देख पाने के लिए 25 cm दूरी पर रखना होगा और तब वह आपके नेत्र पर बहुत छोटा कोण अंतरित करेगा।

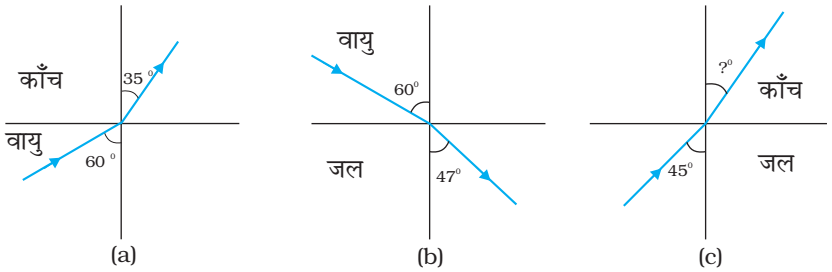
अभ्यास

9.1 2.5 cm साइज़ की कोई छोटी मोमबत्ती 36 cm वक्रता त्रिज्या के किसी अवतल दर्पण से 27 cm दूरी पर रखी है। दर्पण से किसी परदे को कितनी दूरी पर रखा जाए कि उसका सुस्पष्ट प्रतिबिंब परदे पर बने। प्रतिबिंब की प्रकृति और साइज़ का वर्णन कीजिए। यदि मोमबत्ती को दर्पण की ओर ले जाएँ, तो परदे को किस ओर हटाना पड़ेगा?

9.2 4.5 cm साइज़ की कोई सुई 15 cm फोकस दूरी के किसी उत्तल दर्पण से 12 cm दूर रखी है। प्रतिबिंब की स्थिति तथा आवर्धन लिखिए। क्या होता है जब सुई को दर्पण से दूर ले जाते हैं? वर्णन कीजिए।

9.3 कोई टैंक 12.5 cm ऊँचाई तक जल से भरा है। किसी सूक्ष्मदर्शी द्वारा बीकर की तली पर पड़ी किसी सुई की आभासी गहराई 9.4 cm मापी जाती है। जल का अपवर्तनांक क्या है? बीकर में उसी ऊँचाई तक जल के स्थान पर किसी 1.63 अपवर्तनांक के अन्य द्रव से प्रतिस्थापन करने पर सुई को पुनः फ़ोकसित करने के लिए सूक्ष्मदर्शी को कितना ऊपर/नीचे ले जाना होगा?

9.4 चित्र 9.34 (a) तथा (b) में किसी आपतित किरण का अपवर्तन दर्शाया गया है जो वायु में क्रमशः काँच-वायु तथा जल-वायु अंतरापृष्ठ के अभिलंब से 60° का कोण बनाती है। उस



चित्र 9.34

आपतित किरण का अपवर्तन कोण ज्ञात कीजिए, जो जल में जल-काँच अंतरापृष्ठ के अभिलंब से 45° का कोण बनाती है [चित्र 9.34 (c)]।

9.5 जल से भरे 80 cm गहराई के किसी टैंक की तली पर कोई छोटा बल्ब रखा गया है। जल के पृष्ठ का वह क्षेत्र ज्ञात कीजिए जिससे बल्ब का प्रकाश निर्गत हो सकता है। जल का अपवर्तनांक 1.33 है। (बल्ब को बिंदु प्रकाश स्रोत मानिए।)

9.6 कोई प्रिज़्म अज्ञात अपवर्तनांक के काँच का बना है। कोई समांतर प्रकाश-पुंज इस प्रिज़्म के किसी फलक पर आपतित होता है। प्रिज़्म का न्यूनतम विचलन कोण 40° मापा गया। प्रिज़्म के पदार्थ का अपवर्तनांक क्या है? प्रिज़्म का अपवर्तन कोण 60° है। यदि प्रिज़्म को जल (अपवर्तनांक 1.33) में रख दिया जाए तो प्रकाश के समांतर पुंज के लिए नए न्यूनतम विचलन कोण का परिकलन कीजिए।

9.7 अपवर्तनांक 1.55 के काँच से दोनों फलकों की समान वक्रता त्रिज्या के उभयोत्तल लेंस निर्मित करने हैं। यदि 20 cm फ़ोकस दूरी के लेंस निर्मित करने हैं तो अपेक्षित वक्रता त्रिज्या क्या होगी?

9.8 कोई प्रकाश-पुंज किसी बिंदु P पर अभिसरित होता है। कोई लेंस इस अभिसारी पुंज के पथ में बिंदु P से 12 cm दूर रखा जाता है। यदि यह (a) 20 cm फ़ोकस दूरी का उत्तल लेंस है, (b) 16 cm फ़ोकस दूरी का अवतल लेंस है, तो प्रकाश-पुंज किस बिंदु पर अभिसरित होगा?

9.9 3.0 cm ऊँची कोई बिंब 21 cm फ़ोकस दूरी के अवतल लेंस के सामने 14 cm दूरी पर रखी है। लेंस द्वारा निर्मित प्रतिबिंब का वर्णन कीजिए। क्या होता है जब बिंब लेंस से दूर हटती जाती है?

9.10 किसी 30 cm फ़ोकस दूरी के उत्तल लेंस के संपर्क में रखे 20 cm फ़ोकस दूरी के अवतल लेंस के संयोजन से बने संयुक्त लेंस (निकाय) की फ़ोकस दूरी क्या है? यह तंत्र अभिसारी लेंस है अथवा अपसारी? लेंसों की मोटाई की उपेक्षा कीजिए।

9.11 किसी संयुक्त सूक्ष्मदर्शी में 2.0 cm फ़ोकस दूरी का अभिदृश्यक लेंस तथा 6.25 cm फ़ोकस दूरी का नेत्रिका लेंस एक-दूसरे से 15 cm दूरी पर लगे हैं। किसी बिंब को अभिदृश्यक से कितनी दूरी पर रखा जाए कि अंतिम प्रतिबिंब (a) स्पष्ट दर्शन की अल्पतम दूरी (25 cm) तथा (b) अनंत पर बने? दोनों स्थितियों में सूक्ष्मदर्शी की आवर्धन क्षमता ज्ञात कीजिए।

9.12 25 cm के सामान्य निकट बिंदु का कोई व्यक्ति ऐसे संयुक्त सूक्ष्मदर्शी जिसका अभिदृश्यक 8.0 mm फ़ोकस दूरी तथा नेत्रिका 2.5 cm फ़ोकस दूरी की है, का उपयोग करके अभिदृश्यक से 9.0 mm दूरी पर रखे बिंब को सुस्पष्ट फ़ोकसित कर लेता है। दोनों लेंसों के बीच पृथकन दूरी क्या है? सूक्ष्मदर्शी की आवर्धन क्षमता क्या है?

9.13 किसी छोटी दूरबीन के अभिदृश्यक की फ़ोकस दूरी 144 cm तथा नेत्रिका की फ़ोकस दूरी 6.0 cm है। दूरबीन की आवर्धन क्षमता कितनी है? अभिदृश्यक तथा नेत्रिका के बीच पृथकन दूरी क्या है?

9.14 (a) किसी वेधशाला की विशाल दूरबीन के अभिदृश्यक की फ़ोकस दूरी 15 m है। यदि 1.0 cm फ़ोकस दूरी की नेत्रिका प्रयुक्त की गयी है, तो दूरबीन का कोणीय आवर्धन क्या है?

(b) यदि इस दूरबीन का उपयोग चंद्रमा का अवलोकन करने में किया जाए तो अभिदृश्यक लेंस द्वारा निर्मित चंद्रमा के प्रतिबिंब का व्यास क्या है? चंद्रमा का व्यास 3.48×10^6 m तथा चंद्रमा की कक्षा की त्रिज्या 3.8×10^8 m है।

9.15 दर्पण-सूत्र का उपयोग यह व्युत्पन्न करने के लिए कीजिए कि

(a) किसी अवतल दर्पण के f तथा $2f$ के बीच रखे बिंब का वास्तविक प्रतिबिंब $2f$ से दूर बनता है।

(b) उत्तल दर्पण द्वारा सदैव आभासी प्रतिबिंब बनता है जो बिंब की स्थिति पर निर्भर नहीं करता।

(c) उत्तल दर्पण द्वारा सदैव आकार में छोटा प्रतिबिंब, दर्पण के ध्रुव व फ़ोकस के बीच बनता है।

(d) अवतल दर्पण के ध्रुव तथा फ़ोकस के बीच रखे बिंब का आभासी तथा बड़ा प्रतिबिंब बनता है।

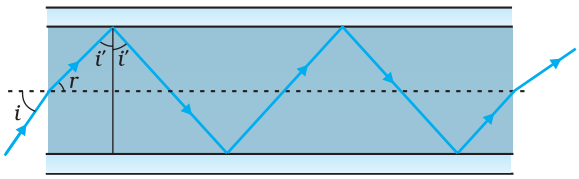
(**नोट** : यह अभ्यास आपकी बीजगणितीय विधि द्वारा उन प्रतिबिंबों के गुण व्युत्पन्न करने में सहायता करेगा जिन्हें हम किरण आरेखों द्वारा प्राप्त करते हैं।)

9.16 किसी मेज के ऊपरी पृष्ठ पर जड़ी एक छोटी पिन को 50 cm ऊँचाई से देखा जाता है। 15 cm मोटे आयताकार काँच के गुटके को मेज़ के पृष्ठ के समांतर पिन व नेत्र के बीच रखकर उसी बिंदु से देखने पर पिन नेत्र से कितनी दूर दिखाई देगी? काँच का अपवर्तनांक 1.5 है। क्या उत्तर गुटके की अवस्थिति पर निर्भर करता है?

9.17 निम्नलिखित प्रश्नों के उत्तर लिखिए :

(a) चित्र 9.35 में अपवर्तनांक 1.68 के तंतु काँच से बनी किसी 'प्रकाश नलिका' (लाइट पाइप) का अनुप्रस्थ परिच्छेद दर्शाया गया है। नलिका का बाह्य आवरण 1.44 अपवर्तनांक के पदार्थ का बना है। नलिका के अक्ष से आपतित किरणों के कोणों का परिसर, जिनके लिए चित्र में दर्शाए अनुसार नलिका के भीतर पूर्ण परावर्तन होते हैं, ज्ञात कीजिए।

(b) यदि पाइप पर बाह्य आवरण न हो तो क्या उत्तर होगा?



चित्र 9.35

9.18 निम्नलिखित प्रश्नों के उत्तर लिखिए :

(a) आपने सीखा है कि समतल तथा उत्तल दर्पण सदैव आभासी प्रतिबिंब बनाते हैं। क्या ये दर्पण किन्हीं परिस्थितियों में वास्तविक प्रतिबिंब बना सकते हैं? स्पष्ट कीजिए।

(b) हम सदैव कहते हैं कि आभासी प्रतिबिंब को परदे पर केंद्रित नहीं किया जा सकता। यद्यपि जब हम किसी आभासी प्रतिबिंब को देखते हैं तो हम इसे स्वाभाविक रूप में अपनी आँख की स्क्रीन (अर्थात रेटिना) पर लाते हैं। क्या इसमें कोई विरोधाभास है?

(c) किसी झील के तट पर खड़ा मछुआरा झील के भीतर किसी गोताखोर द्वारा तिरछा देखने पर अपनी वास्तविक लंबाई की तुलना में कैसा प्रतीत होगा – छोटा अथवा लंबा?

(d) क्या तिरछा देखने पर किसी जल के टैंक की आभासी गहराई परिवर्तित हो जाती है? यदि हाँ, तो आभासी गहराई घटती है अथवा बढ़ जाती है?

(e) सामान्य काँच की तुलना में हीरे का अपवर्तनांक काफ़ी अधिक होता है? क्या हीरे को तराशने वालों के लिए इस तथ्य का कोई उपयोग होता है?

9.19 किसी कमरे की एक दीवार पर लगे विद्युत बल्ब का किसी बड़े आकार के उत्तल लेंस द्वारा 3 m दूरी पर स्थित सामने की दीवार पर प्रतिबिंब प्राप्त करना है। इसके लिए उत्तल लेंस की अधिकतम फ़ोकस दूरी क्या होनी चाहिए?

9.20 किसी परदे को बिंब से 90 cm दूर रखा गया है। परदे पर किसी उत्तल लेंस द्वारा उसे एक-दूसरे से 20 cm दूर स्थितियों पर रखकर, दो प्रतिबिंब बनाए जाते हैं। लेंस की फ़ोकस दूरी ज्ञात कीजिए।

9.21 (a) प्रश्न 9.10 के दो लेंसों के संयोजन की प्रभावी फ़ोकस दूरी उस स्थिति में ज्ञात कीजिए जब उनके मुख्य अक्ष संपाती हैं, तथा ये एक-दूसरे से 8 cm दूरी पर रखे हैं। क्या उत्तर आपतित समांतर प्रकाश पुंज की दिशा पर निर्भर करेगा? क्या इस तंत्र के लिए प्रभावी फ़ोकस दूरी किसी भी रूप में उपयोगी है?

(b) उपरोक्त व्यवस्था (a) में 1.5 cm ऊँचा कोई बिंब उत्तल लेंस की ओर रखा है। बिंब की उत्तल लेंस से दूरी 40 cm है। दो लेंसों के तंत्र द्वारा उत्पन्न आवर्धन तथा प्रतिबिंब का आकार ज्ञात कीजिए।

9.22 60° अपवर्तन कोण के प्रिज़्म के फलक पर किसी प्रकाश किरण को किस कोण पर आपतित कराया जाए कि इसका दूसरे फलक से केवल पूर्ण आंतरिक परावर्तन ही हो? प्रिज़्म के पदार्थ का अपवर्तनांक 1.524 है।

9.23 आपको विविध कोणों के क्राउन काँच व फ़्लिंट कांच के प्रिज़्म दिए गए हैं। प्रिज़्मों का कोई ऐसा संयोजन सुझाइए जो–

(a) श्वेत प्रकाश के संकीर्ण पुंज को बिना अधिक परिक्षेपित किए विचलित कर दे।

(b) श्वेत प्रकाश के संकीर्ण पुंज को अधिक विचलित किए बिना परिक्षेपित (तथा विस्थापित) कर दे।

9.24 सामान्य नेत्र के लिए दूर बिंदु अनंत पर तथा स्पष्ट दर्शन का निकट बिंदु, नेत्र के सामने लगभग 25 cm पर होता है। नेत्र का स्वच्छ मंडल (कॉर्निया) लगभग 40 डाइऑप्टर की अभिसारण क्षमता प्रदान करता है तथा स्वच्छ मंडल के पीछे नेत्र लेंस की अल्पतम अभिसारण क्षमता लगभग 20 डाइऑप्टर होती है। इस स्थूल आँकड़े से सामान्य नेत्र के परास (अर्थात नेत्र लेंस की अभिसरण क्षमता का परिसर) का अनुमान लगाइए।

9.25 क्या निकट दृष्टिदोष अथवा दीर्घ दृष्टिदोष द्वारा आवश्यक रूप से यह ध्वनित होता है कि नेत्र ने अपनी समंजन क्षमता आंशिक रूप से खो दी है? यदि नहीं, तो इन दृष्टिदोषों का क्या कारण हो सकता है?

9.26 निकट दृष्टिदोष का कोई व्यक्ति दूर दृष्टि के लिए –1.0 D क्षमता का चश्मा उपयोग कर रहा है। अधिक आयु होने पर उसे पुस्तक पढ़ने के लिए अलग से +2.0 D क्षमता के चश्मे की आवश्यकता होती है। स्पष्ट कीजिए ऐसा क्यों हुआ?

9.27 कोई व्यक्ति ऊर्ध्वाधर तथा क्षैतिज धारियों की कमीज़ पहने किसी दूसरे व्यक्ति को देखता है। वह क्षैतिज धारियों की तुलना में ऊर्ध्वाधर धारियों को अधिक स्पष्ट देख पाता है। ऐसा किस दृष्टिकोण के कारण होता है? इस दृष्टिदोष का संशोधन कैसे किया जाता है?

9.28 कोई सामान्य निकट बिंदु (25 cm) का व्यक्ति छोटे अक्षरों में छपी वस्तु को 5 cm फ़ोकस दूरी के पतले उत्तल लेंस के आवर्धक लेंस का उपयोग करके पढ़ता है।

(a) वह निकटतम तथा अधिकतम दूरियाँ ज्ञात कीजिए जहाँ वह उस पुस्तक को आवर्धक लेंस द्वारा पढ़ सकता है।

(b) उपरोक्त सरल सूक्ष्मदर्शी के उपयोग द्वारा संभावित अधिकतम तथा न्यूनतम कोणीय आवर्धन (आवर्धन क्षमता) क्या है?

9.29 कोई कार्ड शीट जिसे 1 mm^2 साइज़ के वर्गों में विभाजित किया गया है, को 9 cm दूरी पर रखकर किसी आवर्धक लेंस (9 cm फ़ोकस दूरी का अभिसारी लेंस) द्वारा उसे नेत्र के निकट रखकर देखा जाता है।

(a) लेंस द्वारा उत्पन्न आवर्धन (प्रतिबिंब-साइज़/वस्तु-साइज़) क्या है? आभासी प्रतिबिंब में प्रत्येक वर्ग का क्षेत्रफल क्या है?

(b) लेंस का कोणीय आवर्धन (आवर्धन क्षमता) क्या है?

(c) क्या (a) में आवर्धन क्षमता (b) में आवर्धन के बराबर है? स्पष्ट कीजिए।

9.30 (a) अभ्यास 9.29 में लेंस को चित्र से कितनी दूरी पर रखा जाए ताकि वर्गों को अधिकतम संभव आवर्धन क्षमता के साथ सुस्पष्ट देखा जा सके?

(b) इस उदाहरण में आवर्धन (प्रतिबिंब-साइज़/वस्तु-साइज़) क्या है?

(c) क्या इस प्रक्रम में आवर्धन, आवर्धन क्षमता के बराबर है? स्पष्ट कीजिए।

9.31 अभ्यास 9.30 में वस्तु तथा आवर्धक लेंस के बीच कितनी दूरी होनी चाहिए ताकि आभासी प्रतिबिंब में प्रत्येक वर्ग 6.25 mm^2 क्षेत्रफल का प्रतीत हो? क्या आप आवर्धक लेंस को नेत्र के अत्यधिक निकट रखकर इन वर्गों को सुस्पष्ट देख सकेंगे?

[**नोट** – अभ्यास 9.29 से 9.31 आपको निरपेक्ष साइज़ में आवर्धन तथा किसी यंत्र की आवर्धन क्षमता (कोणीय आवर्धन) के बीच अंतर को स्पष्टत: समझने में सहायता करेंगे।]

9.32 निम्नलिखित प्रश्नों के उत्तर दीजिए–

(a) किसी वस्तु द्वारा नेत्र पर अंतरित कोण आवर्धक लेंस द्वारा उत्पन्न आभासी प्रतिबिंब द्वारा नेत्र पर अंतरित कोण के बराबर होता है। तब फिर किन अर्थों में कोई आवर्धक लेंस कोणीय आवर्धन प्रदान करता है?

(b) किसी आवर्धक लेंस से देखते समय प्रेक्षक अपने नेत्र को लेंस से अत्यधिक सटाकर रखता है। यदि प्रेक्षक अपने नेत्र को पीछे ले जाए तो क्या कोणीय आवर्धन परिवर्तित हो जाएगा?

(c) किसी सरल सूक्ष्मदर्शी की आवर्धन क्षमता उसकी फ़ोकस दूरी के व्युत्क्रमानुपाती होती है। तब हमें अधिकाधिक आवर्धन क्षमता प्राप्त करने के लिए कम से कम फ़ोकस दूरी के उत्तल लेंस का उपयोग करने से कौन रोकता है?

(d) किसी संयुक्त सूक्ष्मदर्शी के अभिदृश्यक लेंस तथा नेत्रिका लेंस दोनों ही की फ़ोकस दूरी कम क्यों होनी चाहिए?

(e) संयुक्त सूक्ष्मदर्शी द्वारा देखते समय सर्वोत्तम दर्शन के लिए हमारे नेत्र, नेत्रिका पर स्थित न होकर उससे कुछ दूरी पर होने चाहिए। क्यों? नेत्र तथा नेत्रिका के बीच की यह अल्प दूरी कितनी होनी चाहिए?

9.33 1.25 cm फोकस दूरी का अभिदृश्यक तथा 5 cm फ़ोकस दूरी की नेत्रिका का उपयोग करके वांछित कोणीय आवर्धन (आवर्धन क्षमता) 30 X होता है। आप संयुक्त सूक्ष्मदर्शी का समायोजन कैसे करेंगे?

9.34 किसी दूरबीन के अभिदृश्यक की फोकस दूरी 140 cm तथा नेत्रिका की फोकस दूरी 5.0 cm है। दूर की वस्तुओं को देखने के लिए दूरबीन की आवर्धन क्षमता क्या होगी जब–

(a) दूरबीन का समायोजन सामान्य है (अर्थात अंतिम प्रतिबिंब अनंत पर बनता है)।

(b) अंतिम प्रतिबिंब स्पष्ट दर्शन की अल्पतम दूरी (25 cm) पर बनता है।

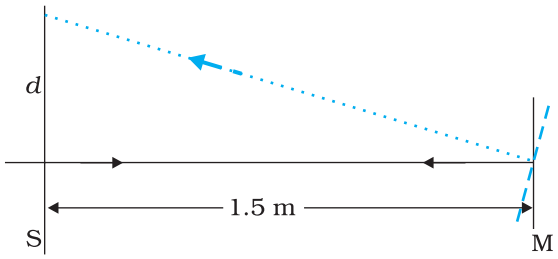
9.35 (a) अभ्यास 9.34(a) में वर्णित दूरबीन के लिए अभिदृश्यक लेंस तथा नेत्रिका के बीच पृथकन दूरी क्या है?

(b) यदि इस दूरबीन का उपयोग 3 km दूर स्थित 100 m ऊँची मीनार को देखने के लिए किया जाता है तो अभिदृश्यक द्वारा बने मीनार के प्रतिबिंब की ऊँचाई क्या है?

(c) यदि अंतिम प्रतिबिंब 25 cm दूर बनता है तो अंतिम प्रतिबिंब में मीनार की ऊँचाई क्या है?

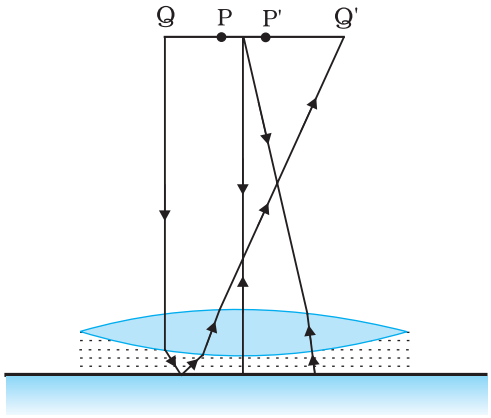
9.36 किसी कैसेग्रेन दूरबीन में चित्र 9.33 में दर्शाए अनुसार दो दर्पणों का प्रयोग किया गया है। इस दूरबीन में दोनों दर्पण एक-दूसरे से 20 mm दूर रखे गए हैं। यदि बड़े दर्पण की वक्रता त्रिज्या 220 mm हो तथा छोटे दर्पण की वक्रता त्रिज्या 140 mm हो तो अनंत पर रखे किसी बिंब का अंतिम प्रतिबिंब कहाँ बनेगा?

9.37 किसी गैल्वेनोमीटर की कुंडली से जुड़े समतल दर्पण पर लंबवत आपतित प्रकाश (चित्र 9.36), दर्पण से टकराकर अपना पथ पुन: अनुरेखित करता है। गैल्वेनोमीटर की कुंडली में प्रवाहित कोई धारा दर्पण में 3.5° का परिक्षेपण उत्पन्न करती हैं। दर्पण के सामने 1.5 m दूरी पर रखे परदे पर प्रकाश के परावर्ती चिह्न में कितना विस्थापन होगा?



चित्र 9.36

9.38 चित्र 9.37 में कोई समोत्तल लेंस (अपवर्तनांक 1.50) किसी समतल दर्पण के फलक पर किसी द्रव की परत के संपर्क में दर्शाया गया है। कोई छोटी सुई जिसकी नोंक मुख्य अक्ष पर है, अक्ष के अनुदिश ऊपर-नीचे गति कराकर इस प्रकार समायोजित की जाती है कि सुई की नोंक का उलटा प्रतिबिंब सुई की स्थिति पर ही बने। इस स्थिति में सुई की लेंस से दूरी 45.0 cm है। द्रव को हटाकर प्रयोग को दोहराया जाता है। नयी दूरी 30.0 cm मापी जाती है। द्रव का अपवर्तनांक क्या है?



चित्र 9.37

अध्याय 10

तरंग–प्रकाशिकी

10.1 भूमिका

सन् 1637 में दकार्ते ने प्रकाश के कणिका मॉडल को प्रस्तुत किया तथा स्नेल के नियम को व्युत्पन्न किया। इस मॉडल से किसी अंतरापृष्ठ पर प्रकाश के परावर्तन तथा अपवर्तन के नियमों की व्याख्या की गई है। कणिका मॉडल ने प्रागुक्त किया कि यदि प्रकाश की किरण (अपवर्तन के समय) अभिलंब की ओर मुड़ती है, तब दूसरे माध्यम में प्रकाश की चाल अधिक होगी। आइज़क न्यूटन ने प्रकाश के कणिका सिद्धांत को अपनी प्रसिद्ध पुस्तक *ऑपटिक्स* (Opticks) में और अधिक विकसित किया। इस पुस्तक की भारी लोकप्रियता के कारण कणिका मॉडल का श्रेय प्रायः न्यूटन को दिया जाता है।

सन् 1678 में डच भौतिकविद क्रिस्टिआन हाइगेंस ने प्रकाश के तरंग सिद्धांत को प्रस्तुत किया– इस अध्याय में हम प्रकाश के इसी तरंग सिद्धांत पर विचार करेंगे। हम देखेंगे कि तरंग मॉडल परावर्तन तथा अपवर्तन की घटनाओं की संतोषप्रद रूप से व्याख्या कर सकता है; तथापि, यह प्रागुक्त करता है कि अपवर्तन के समय यदि तरंग अभिलंब की ओर मुड़ती है तो दूसरे माध्यम में प्रकाश की चाल कम होगी। यह प्रकाश के कणिका मॉडल को उपयोग करते समय की गई प्रागुक्ति के विपरीत है। सन् 1850 में फूको द्वारा किए गए प्रयोग द्वारा दर्शाया गया कि जल में प्रकाश की चाल वायु में प्रकाश की चाल से कम है। इस प्रकार तरंग मॉडल की प्रागुक्ति की पुष्टि की गई।

मुख्यत: न्यूटन के प्रभाव के कारण तरंग सिद्धांत को सहज ही स्वीकार नहीं किया गया। इसका एक कारण यह भी था कि प्रकाश निर्वात में गमन कर सकता है और यह महसूस किया गया कि तरंगों के एक बिंदु से दूसरे बिंदु तक संचरण के लिए सदैव माध्यम की आवश्यकता होती है। तथापि, जब टॉमस यंग ने सन् 1801 में अपना व्यतिकरण संबंधी प्रसिद्ध प्रयोग किया तब यह निश्चित रूप से प्रमाणित हो गया कि वास्तव में प्रकाश की प्रकृति तरंगवत है। दृश्य प्रकाश की तरंगदैर्घ्य को मापा गया और यह पाया गया कि यह अत्यंत छोटी है; उदाहरण के लिए पीले प्रकाश की तरंगदैर्घ्य लगभग 0.5μm है। दृश्य प्रकाश की तरंगदैर्घ्य छोटी होने के कारण (सामान्य दर्पणों तथा लेंसों के आकार की तुलना में), प्रकाश को लगभग सरल रेखाओं में गमन करता हुआ माना जा सकता है। यह ज्यामितीय प्रकाशिकी का अध्ययन क्षेत्र है, जिसके विषय में हम अध्याय 9 में चर्चा कर चुके हैं। वास्तव में प्रकाशिकी की वह शाखा जिसमें तरंगदैर्घ्य की परिमितता को पूर्ण रूप से नगण्य मानते हैं *ज्यामितीय प्रकाशिकी* कहलाती है तथा किरण को ऊर्जा संचरण के उस पथ की भाँति परिभाषित करते हैं जिसमें तरंगदैर्घ्य का मान शून्य की ओर प्रवृत्त होता है।

सन् 1801 में टॉमस यंग द्वारा किए गए व्यतिकरण प्रयोग के पश्चात, आगामी लगभग 40 वर्ष तक प्रकाश तरंगों के व्यतिकरण तथा विवर्तन संबंधी अनेक प्रयोग किए गए। इन प्रयोगों का स्पष्टीकरण केवल प्रकाश के तरंग मॉडल के आधार पर संतोषजनक रूप से किया जा सका है। इस प्रकार उन्नीसवीं शताब्दी के लगभग मध्य तक तरंग सिद्धांत भली-भाँति स्थापित हो गया प्रतीत होता था। सबसे बड़ी कठिनाई उस मान्यता के कारण थी, जिसके अनुसार यह समझा जाता था कि तरंग संचरण के लिए किसी माध्यम की आवश्यकता होती है, तो फिर, प्रकाश तरंगें निर्वात में कैसे संचरित हो सकती हैं। इसकी व्याख्या मैक्सवेल द्वारा प्रकाश संबंधी प्रसिद्ध वैद्युतचुंबकीय सिद्धांत प्रस्तुत करने पर हो पाई। मैक्सवेल ने विद्युत तथा चुंबकत्व के नियमों का वर्णन करने वाले समीकरणों का एक सेट विकसित किया और इन समीकरणों का उपयोग करके उन्होंने तरंग समीकरण व्युत्पन्न किया, जिससे उन्होंने वैद्युतचुंबकीय तरंगों* के अस्तित्व की *भविष्यवाणी* की। मैक्सवेल तरंग समीकरणों का उपयोग कर मुक्त आकाश में, वैद्युतचुंबकीय तरंगों के वेग की गणना कर पाए और उन्होंने पाया कि तरंग वेग का यह सैद्धांतिक मान, प्रकाश की चाल के मापे गए मान के अत्यंत निकट है। इससे उन्होंने यह निष्कर्ष निकाला कि *प्रकाश अवश्य ही वैद्युतचुंबकीय तरंग है*, इस प्रकार मैक्सवेल के अनुसार प्रकाश तरंगें परिवर्तनशील विद्युत तथा चुंबकीय क्षेत्रों से संबद्ध हैं। परिवर्तनशील विद्युत क्षेत्र समय तथा दिक्स्थान (आकाश) में परिवर्तनशील चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करता है तथा परिवर्तनशील चुंबकीय क्षेत्र समय तथा दिक्स्थान में परिवर्तनशील विद्युत क्षेत्र उत्पन्न करता है। परिवर्तनशील विद्युत तथा चुंबकीय क्षेत्र निर्वात में भी वैद्युतचुंबकीय तरंगों (या प्रकाश तरंगों) का संचरण कर सकते हैं।

इस अध्याय में हम सर्वप्रथम *हाइगेंस के सिद्धांत* के मूल प्रतिपादन पर विचार-विमर्श करेंगे एवं परावर्तन तथा अपवर्तन के नियमों को व्युत्पन्न करेंगे। अनुच्छेद 10.4 तथा 10.5 में हम व्यतिकरण की परिघटना का वर्णन करेंगे जो अध्यारोपण के सिद्धांत पर आधारित है। अनुच्छेद 10.6 में हम विवर्तन की परिघटना पर विचार करेंगे जो हाइगेंस-फ्रेनेल सिद्धांत पर आधारित है। अंत में अनुच्छेद 10.7 में हम ध्रुवण के बारे में विचार-विमर्श करेंगे जो इस तथ्य पर आधारित है कि प्रकाश तरंगें *अनुप्रस्थ वैद्युतचुंबकीय* तरंगें हैं।

---

* लगभग सन् 1864 में मैक्सवेल ने वैद्युतचुंबकीय तरंगों के अस्तित्व की भविष्यवाणी की; इसके काफ़ी समय पश्चात (लगभग 1890 में) हेनरी हर्ट्ज़ ने प्रयोगशाला में रेडियो तरंगें उत्पन्न कीं। जगदीश चंद्र बोस तथा मारकोनी ने हर्ट्ज़ की तरंगों का प्रायोगिक उपयोग किया।

क्या प्रकाश सीधी रेखा में चलता है?

कक्षा 6 में प्रकाश सीधी रेखा में चलता है; कक्षा 12 और इससे आगे यह ऐसा नहीं करता! क्या आपको आश्चर्य नहीं होता?

विद्यालय में आपको एक प्रयोग दिखलाया गया होगा जिसमें आप बारीक छेद किए हुए तीन गत्ते लेते हैं, एक ओर मोमबत्ती रखकर दूसरी ओर से देखते हैं। यदि मोमबत्ती की ज्वाला तथा तीनों छिद्र एक सीधी रेखा में हैं तो आप मोमबत्ती की ज्वाला देख सकते हैं। इनमें से यदि किसी एक को भी थोड़ा-सा विस्थापित कर दिया जाए तो आप मोमबत्ती की ज्वाला नहीं देख पाते। इसीलिए आपके अध्यापक कहते हैं, *यह सिद्ध करता है कि प्रकाश सीधी रेखा में चलता है।*

इस पुस्तक में लगातार दो अध्याय (9 तथा 10) हैं, एक *किरण प्रकाशिकी* पर और दूसरा *तरंग प्रकाशिकी* पर। किरण प्रकाशिकी प्रकाश के सरल रेखीय संचरण पर आधारित है तथा यह दर्पणों, लेंसों, परावर्तन, अपवर्तन आदि से संबंध रखती है। फिर आप तरंग प्रकाशिकी के अध्याय पर आते हैं और आपको बताया जाता है कि प्रकाश तरंगों के रूप में चलता है, यह वस्तुओं के किनारों पर मुड़ सकता है, इसमें विवर्तन तथा व्यतिकरण जैसी परिघटनाएँ हो सकती हैं।

प्रकाशिक क्षेत्र में, प्रकाश की तरंगदैर्घ्य लगभग आधा माइक्रोमीटर होती है। यदि इसके रास्ते में लगभग इसी आकार का कोई अवरोध आता है तो यह इसके इधर-उधर मुड़ सकता है और दूसरी ओर दिखलाई दे सकता है। इस प्रकार माइक्रोमीटर आकार का कोई अवरोध प्रकाश किरण को नहीं रोक पाएगा। यदि अवरोध बहुत बड़ा है, तब प्रकाश इसके इधर-उधर इस प्रकार नहीं मुड़ पाएगा और दूसरी ओर दिखलाई नहीं देगा।

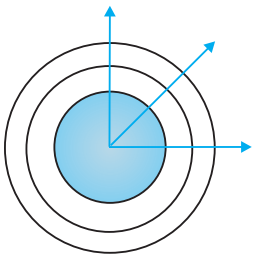
यह तरंगों का एक सामान्य गुण है और ध्वनि तरंगों में भी देखा जा सकता है। हमारी वाणी की ध्वनि तरंग की तरंगदैर्घ्य लगभग 50 से.मी. से 1 मी. तक होती है। यदि इसके मार्ग में कुछ मीटर आकार का कोई अवरोध आता है तो यह इसके इधर-उधर मुड़ जाती है तथा अवरोध के पीछे पहुँच जाती है। लेकिन यदि इसके रास्ते में कोई बड़ा अवरोध (लगभग 100 मीटर से अधिक) जैसे कोई पहाड़ी आदि, आती है तो इसका अधिकांश भाग परावर्तित हो जाता है और प्रतिध्वनि के रूप में सुनाई देता है।

तब प्राथमिक विद्यालय में किए गए प्रयोग का क्या हुआ? जब हम वहाँ पर किसी भी गत्ते को खिसकाते हैं तो इसका विस्थापन कुछ मिलीमीटर की कोटि का होता है, जो प्रकाश की तरंगदैर्घ्य से बहुत अधिक है। अतः मोमबत्ती की ज्वाला दिखलाई नहीं देगी। यदि हम किसी भी गत्ते को एक माइक्रोमीटर या इससे भी कम दूरी तक विस्थापित कर सकें तो प्रकाश का विवर्तन हो पाएगा तथा मोमबत्ती की ज्वाला दिखलाई देती रहेगी।

इस बॉक्स के पहले वाक्य में आप जोड़ सकते हैं : *बड़े होने पर यह सीखता है कि मुड़ा कैसे जाए!*

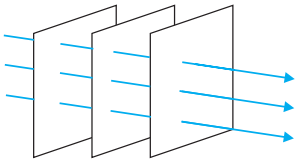
10.2 हाइगेंस का सिद्धांत

सर्वप्रथम हम तरंगाग्र को परिभाषित करेंगे। जब हम किसी शांत जल के तालाब में एक छोटा पत्थर फेंकते हैं तब प्रतिघात बिंदु से चारों ओर तरंगें फैलती हैं। पृष्ठ का प्रत्येक बिंदु समय के साथ दोलन करना प्रारंभ कर देता है। किसी एक क्षण पर पृष्ठ का फ़ोटोग्राफ़ उन वृत्ताकार वलयों को दर्शाएगा जिनके ऊपर विक्षोभ अधिकतम हैं। स्पष्टतः इस प्रकार के वृत्त के सभी बिंदु समान कला में दोलन करते हैं क्योंकि वे स्रोत से समान दूरी पर हैं। समान कला में दोलन करते ऐसे सभी बिंदुओं का बिंदु पथ *तरंगाग्र* कहलाता है। अतः एक तरंगाग्र को एक समान कला के पृष्ठ के रूप में परिभाषित किया जाता है। जिस गति के साथ तरंगाग्र स्रोत से बाहर की ओर बढ़ता है, वह तरंग की चाल कहलाती है। तरंग की ऊर्जा तरंगाग्र के लंबवत चलती है।



चित्र 10.1 (a) एक बिंदु-स्रोत से निर्गमन होती एक अपसरित गोलीय तरंग। तरंगाग्र गोलीय है।

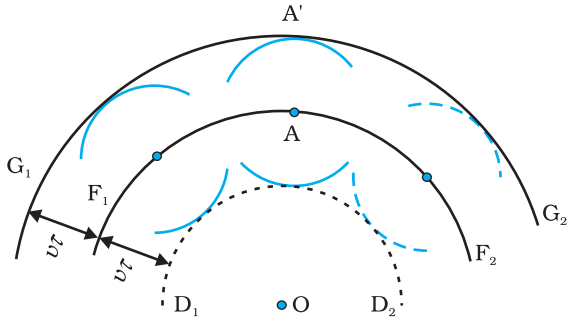
यदि एक बिंदु-स्रोत प्रत्येक दिशा में एक समान तरंगें उत्सर्जित करता है तो उन बिंदुओं का बिंदुपथ, जिनका आयाम समान है और जो एक समान कला में कंपन करते हैं, गोला होता है तथा हमें चित्र 10.1 (a) की भाँति एक गोलीय तरंग प्राप्त होती है। स्रोत से बहुत अधिक दूरी पर,



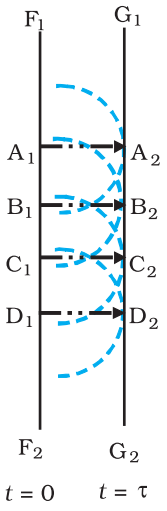
चित्र 10.1 (b) स्रोत से बहुत अधिक दूरी पर, गोलीय तरंग का एक छोटा भाग समतल तरंग माना जा सकता है।

गोले का एक छोटा भाग समतल माना जा सकता है और हमें एक समतल तरंग प्राप्त होती है [चित्र 10.1 (b)]।

अब यदि हमें $t = 0$ पर किसी तरंगाग्र की आकृति ज्ञात है तो हाइगेंस के सिद्धांत द्वारा हम किसी बाद के समय τ पर तरंगाग्र की आकृति ज्ञात कर सकते हैं। अत: हाइगेंस का सिद्धांत वास्तव में एक ज्यामितीय रचना है जो किसी समय यदि तरंगाग्र की आकृति दी हुई हो तो किसी बाद के समय पर हम तरंगाग्र की आकृति ज्ञात कर सकते हैं। आइए, एक अपसरित तरंग के बारे में विचार करें और मान लीजिए F_1F_2, $t = 0$ समय पर एक गोलीय तरंगाग्र के एक भाग को प्रदर्शित करता है (चित्र 10.2)। अब हाइगेंस के सिद्धांत के अनुसार, तरंगाग्र का प्रत्येक बिंदु एक द्वितीयक विक्षोभ का स्रोत है और इन बिंदुओं से होने वाली तरंगिकाएँ तरंग की गति से सभी दिशाओं में फैलती हैं। तरंगाग्र से निर्गमन होने वाली इन तरंगिकाओं को प्राय: द्वितीयक तरंगिकाओं के नाम से जाना जाता है और यदि हम इन सभी गोलों पर एक उभयनिष्ठ स्पर्शक पृष्ठ खींचें तो हमें किसी बाद के समय पर तरंगाग्र की नयी स्थिति प्राप्त हो जाती है।



चित्र 10.2 F_1F_2 गोलीय तरंगाग्र को t = 0 समय पर निरूपित करता है (O केंद्र के साथ)। F_1F_2 से निर्गमन होने वाली द्वितीयक तरंगिकाओं का आवरण आगे बढ़ते हुए तरंगाग्र G_1G_2 को उत्पन्न करता है। पश्च तरंग D_1D_2 विद्यमान नहीं होती।



चित्र 10.3 दाईं ओर संचरित होने वाली एक समतल तरंग के लिए हाइगेंस का ज्यामितीय निर्माण। F_1 F_2, t = 0 पर एक समतल तरंगाग्र है तथा G_1G_2 τ समय बाद का एक तरंगाग्र है। रेखाएँ A_1A_2, B_1B_2 ... आदि F_1F_2 तथा G_1G_2 दोनों के लंबवत हैं तथा किरणों को निरूपित करती हैं।

अत: यदि हम $t = \tau$ समय पर तरंगाग्र की आकृति ज्ञात करना चाहते हैं तो हम गोलीय तरंगाग्र के प्रत्येक बिंदु से $v\tau$ त्रिज्या के गोले खींचेंगे, जहाँ पर v माध्यम में तरंग की चाल को निरूपित करता है। यदि हम इन सभी गोलों पर एक उभयनिष्ठ स्पर्श रेखा खींचें, तो हमें $t = \tau$ समय पर तरंगाग्र की नयी स्थिति प्राप्त होगी। चित्र 10.2 में G_1 G_2 द्वारा प्रदर्शित नया तरंगाग्र पुन: गोलीय है जिसका केंद्र O है।

उपरोक्त मॉडल में एक दोष है। हमें एक पश्च तरंग भी प्राप्त होती है जिसे चित्र 10.2 में D_1D_2 द्वारा दर्शाया गया है। हाइगेंस ने तर्क प्रस्तुत किया कि आगे की दिशा में द्वितीयक तरंगिकाओं का आयाम अधिकतम होता है तथा पीछे की दिशा में यह शून्य होता है। इस तदर्थ कल्पना से हाइगेंस पश्च तरंगों की अनुपस्थिति को समझा पाए। तथापि यह तदर्थ कल्पना संतोषजनक नहीं है तथा पश्चतरंगों की अनुपस्थिति का औचित्य वास्तव में एक अधिक परिशुद्ध तरंग सिद्धांत द्वारा बताया जा सकता है।

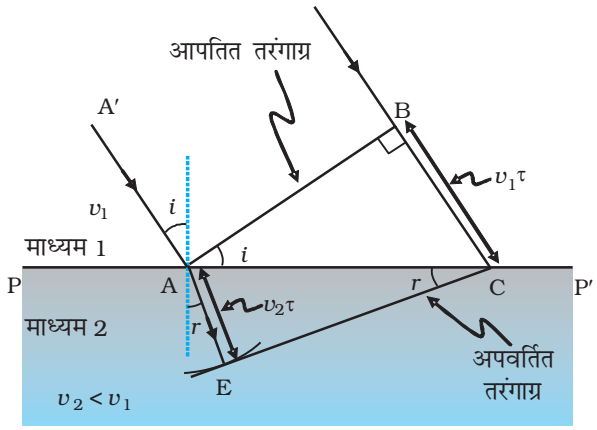
इसी विधि द्वारा हम हाइगेंस के सिद्धांत का उपयोग किसी माध्यम में संचरित होने वाली समतल तरंग के तरंगाग्र की आकृति ज्ञात करने के लिए कर सकते हैं (चित्र 10.3)।

10.3 हाइगेंस सिद्धांत का उपयोग करते हुए समतल तरंगों का अपवर्तन तथा परावर्तन

10.3.1 समतल तरंगों का अपवर्तन

अब हम हाइगेंस के सिद्धांत का उपयोग अपवर्तन के नियमों को व्युत्पन्न करने के लिए करेंगे। मान लीजिए PP′ माध्यम 1 तथा माध्यम 2 को पृथक करने वाले पृष्ठ को निरूपित करता है (चित्र 10.4)। मान लीजिए v_1 तथा v_2 क्रमशः माध्यम 1 तथा माध्यम 2 में प्रकाश की चाल को निरूपित करते हैं। हम मान लेते हैं कि एक समतल तरंगाग्र AB, A′A दिशा में संचरित होता हुआ चित्र में दर्शाए अनुसार अंतरापृष्ठ पर कोण i बनाते हुए आपतित होता है। मान लीजिए BC दूरी चलने के लिए तरंगाग्र द्वारा लिया गया समय τ है। अतः

$BC = v_1 \tau$



चित्र 10.4 एक समतल तरंगाग्र AB माध्यम 1 तथा माध्यम 2 को पृथक करने वाले पृष्ठ PP′ पर कोण i बनाते हुए आपतित होता है। समतल तरंगाग्र अपवर्तित होता है तथा CE अपवर्तित तरंगाग्र को निरूपित करता है। चित्र $v_2 < v_1$ के तदनुरूप है, अतः अपवर्तित तरंगें अभिलंब की ओर मुड़ती हैं।



क्रिस्टिआन हाइगेंस (1629-1695) डच भौतिकविद खगोल-शास्त्री, गणितज्ञ एवं प्रकाश के तरंग सिद्धांत के प्रणेता। उनकी पुस्तक *ट्रीटीज ऑन लाइट* (Treatise on light), आज भी पढ़ने में अच्छी लगती है। इस पुस्तक में परावर्तन और अपवर्तन के अतिरिक्त, खनिज कैलसाइट द्वारा प्रदर्शित दोहरे-अपवर्तन की प्रक्रिया को भी बहुत सुंदर ढंग से समझाया गया है। वही पहले व्यक्ति थे जिन्होंने वृत्तीय गति एवं सरल-आवर्त गति का विश्लेषण प्रस्तुत किया और सुधरी हुई घड़ियाँ एवं टेलिस्कोप बनाए। उन्होंने शनि-वलयों की सही ज्यामिति प्रस्तुत की।

क्रिस्टिआन हाइगेंस (1629-1695)

अपवर्तित तरंगाग्र की आकृति ज्ञात करने के लिए हम बिंदु A से $v_2\tau$ त्रिज्या का एक गोला दूसरे माध्यम में खींचते हैं (दूसरे माध्यम में तरंग की चाल v_2 है)। मान लीजिए CE बिंदु C से गोले पर खींचे गए स्पर्शी तल को निरूपित करता है। तब, $AE = v_2\tau$ तथा CE अपवर्तित तरंगाग्र को निरूपित करेगी। अब यदि हम त्रिभुज ABC तथा AEC पर विचार करें तो हमें प्राप्त होगा

$$\sin i = \frac{BC}{AC} = \frac{v_1\tau}{AC} \qquad (10.1)$$

और

$$\sin r = \frac{AE}{AC} = \frac{v_2\tau}{AC} \qquad (10.2)$$

यहाँ i और r क्रमशः आपतन कोण तथा अपवर्तन कोण हैं। अतः हमें प्राप्त होगा

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} \qquad (10.3)$$

उपरोक्त समीकरण से हमें एक महत्वपूर्ण परिणाम प्राप्त होता है। यदि $r < i$ (अर्थात, यदि किरण अभिलंब की ओर मुड़ती है), तो दूसरे माध्यम में प्रकाश तरंग की चाल (v_2) पहले माध्यम में प्रकाश तरंग की चाल (v_1) से कम होगी। यह प्रागुक्ति प्रकाश के कणिका मॉडल की प्रागुक्ति के विपरीत है और जैसा कि बाद के प्रयोगों ने दर्शाया, तरंग सिद्धांत की प्रागुक्ति सही है। अब यदि c निर्वात में प्रकाश की चाल को निरूपित करती है, तब,

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \qquad (10.4)$$

तथा

$$n_2 = \frac{c}{v_2} \qquad (10.5)$$

n_1 तथा n_2, क्रमशः माध्यम 1 तथा माध्यम 2 के अपवर्तनांक हैं। अपवर्तनांकों के रूप में समीकरण (10.3) को निम्न प्रकार से लिख सकते हैं

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r \qquad (10.6)$$

यह *स्नैल का अपवर्तन संबंधी नियम* है। यदि λ_1 तथा λ_2 क्रमशः माध्यम 1 तथा माध्यम 2 में प्रकाश की तरंगदैर्घ्य को निरूपित करते हैं और यदि दूरी BC, λ_1 के बराबर है तब दूरी AE, λ_2 के बराबर होगी (क्योंकि यदि कोई शृंग B से C तक τ समय में पहुँचता है तो वह शृंग A से E तक भी τ समय में ही पहुँचेगा); अतः

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{\text{BC}}{\text{AE}} = \frac{v_1}{v_2}$$

अथवा

$$\frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2} \qquad (10.7)$$

उपरोक्त समीकरण में अंतर्निहित है कि जब तरंग सघन माध्यम में अपवर्तित होती है ($v_1 > v_2$), तो तरंगदैर्घ्य तथा संचरण की चाल कम हो जाती है, लेकिन *आवृत्ति* $\nu (= v/\lambda)$ *उतनी ही रहती है।*

10.3.2 विरल माध्यम पर अपवर्तन

आइए, एक समतल तरंग के विरल माध्यम में होने वाले अपवर्तन पर विचार करें, अर्थात $v_2 > v_1$। पहले की भाँति ही कार्यवाही करते हुए हम चित्र 10.5 में दर्शाए अनुसार अपवर्तित तरंगाग्र का निर्माण कर सकते हैं। अब अपवर्तन कोण आपतन कोण से बड़ा होगा; तथापि इस बार भी $n_1 \sin i = n_2 \sin r$। हम एक कोण i_c को निम्न समीकरण द्वारा परिभाषित कर सकते हैं

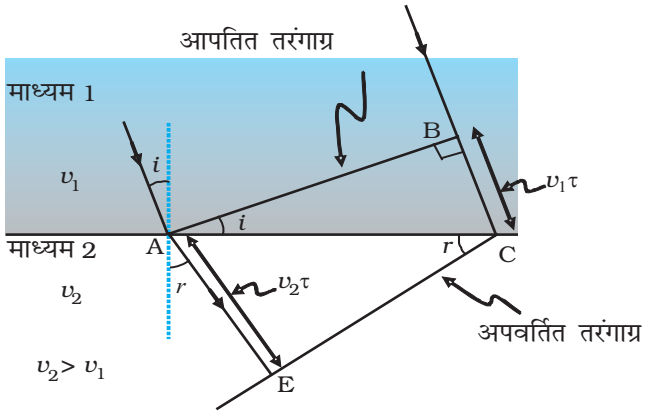
$$\sin i_c = \frac{n_2}{n_1} \qquad (10.8)$$

अतः, यदि $i = i_c$ तब $\sin r = 1$ तथा $r = 90°$। स्पष्टतया, $i > i_c$ के लिए कोई भी अपवर्तित तरंग प्राप्त नहीं होगी। कोण i_c को *क्रांतिक कोण* कहते हैं तथा क्रांतिक कोण से अधिक सभी आपतन कोणों के लिए हमें कोई भी अपवर्तित तरंग प्राप्त नहीं होगी तथा तरंग का *पूर्ण आंतरिक परावर्तन* हो जाएगा। पूर्ण आंतरिक परावर्तन की परिघटना तथा इसके अनुप्रयोगों की परिचर्चा अनुच्छेद 9.4 में की गई थी।

व्यतिकरण, विवर्तन, अपवर्तन, अनुनाद तथा डॉप्लर प्रभाव का प्रदर्शन
http://www.falstad.com/ripple
भौतिकी

10.3.3 समतल पृष्ठ से एक समतल तरंग का परावर्तन

अब हम एक परावर्तक पृष्ठ MN पर किसी कोण i से आपतित एक समतल तरंग AB पर विचार



चित्र 10.5 विरल माध्यम जिसके लिए $v_2 > v_1$ पर आपतित एक समतल तरंग का अपवर्तन। समतल तरंग अभिलंब से दूर मुड़ जाती है।

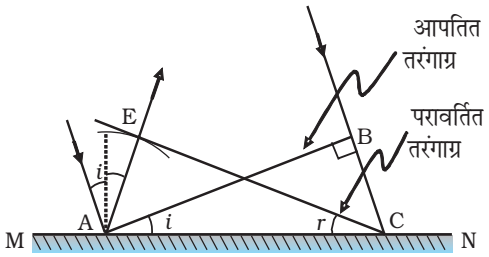
करते हैं। यदि v माध्यम में तरंग की चाल को निरूपित करता है तथा यदि τ तरंगाग्र द्वारा बिंदु B से C तक आगे बढ़ने में लिए गए समय को निरूपित करता है, तब दूरी

$$BC = v\tau$$

परावर्तित तरंगाग्र का निर्माण करने के लिए हम बिंदु A से त्रिज्या $v\,\tau$ का गोला खींचते हैं (चित्र 10.6)। मान लीजिए CE इस गोले पर बिंदु C से खींची गई स्पर्शी समतल को निरूपित करती है। स्पष्टतया

$$AE = BC = v\tau$$

अब यदि हम त्रिभुजों EAC तथा BAC पर विचार करें तो हम पाएँगे कि ये सर्वांगसम हैं और इसीलिए, कोण i तथा r बराबर होंगे (चित्र 10.6)। यह परावर्तन का नियम है।

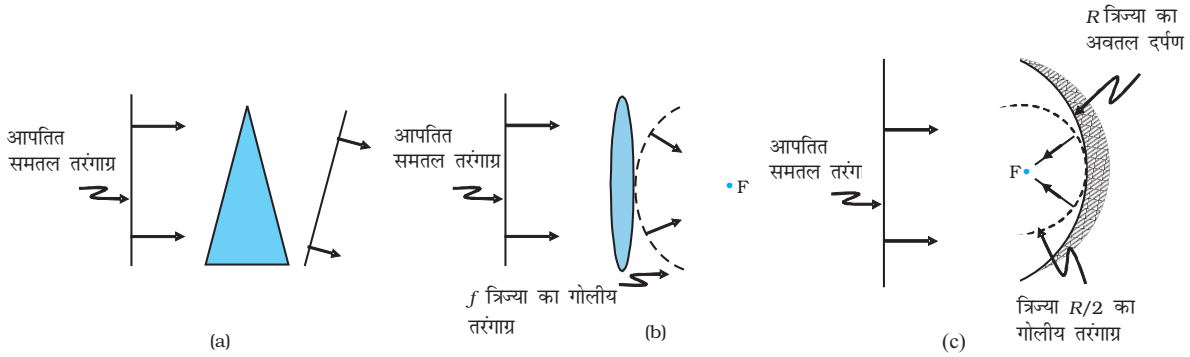


चित्र 10.6 परावर्तक पृष्ठ MN द्वारा समतल तरंग AB का परावर्तन। AB तथा CE क्रमशः आपतित तथा परावर्तित तरंगाग्र को निरूपित करती हैं।

एक बार परावर्तन तथा अपवर्तन के नियमों को जान लेने के पश्चात प्रिज़्मों, लेंसों तथा दर्पणों के व्यवहार को समझा जा सकता है। इस परिघटना की प्रकाश के सरल रेखीय पथ पर गमन करने के आधार पर अध्याय 9 में विस्तार से चर्चा की गई थी। यहाँ हम केवल परावर्तन तथा अपवर्तन के समय तरंगाग्रों के व्यवहार का वर्णन करेंगे। चित्र 10.7(a) में हम एक पतले प्रिज़्म से गुज़रने

वाली समतल तरंग पर विचार करते हैं। स्पष्टतया, क्योंकि काँच में प्रकाश तरंगों की चाल कम है, अंदर आते हुए तरंगाग्र का निचला भाग (जो काँच की अधिकतम मोटाई को पार करता है) सबसे अधिक विलंबित होगा। इसके परिणामस्वरूप प्रिज़्म से बाहर निकलने वाली तरंगाग्र चित्र में दर्शाए अनुसार झुक जाएगा। चित्र 10.7(b) में हम एक पतले उत्तल लेंस पर आपतित होने वाली समतल तरंग पर विचार करते हैं। आपतित समतल तरंग का मध्य भाग लेंस के सबसे मोटे भाग से होकर जाता है तथा सर्वाधिक विलंबित होता है। लेंस से बाहर निकलने वाले तरंगाग्र में केंद्र पर अवनमन होता है और इसीलिए तरंगाग्र गोलीय हो जाता है तथा एक बिंदु F पर अभिसरित होता है जिसे *फ़ोकस* कहते हैं। चित्र 10.7(c) में एक अवतल दर्पण पर एक समतल तरंग आपतित होती है तथा परावर्तन पर हमें एक गोलीय तरंग प्राप्त होती है जो फ़ोकस बिंदु F पर अभिसरित होती है। इसी प्रकार हम अवतल लेंसों तथा उत्तल दर्पणों द्वारा अपवर्तन तथा परावर्तन को समझ सकते हैं।

उपरोक्त विवेचन से यह ज्ञात होता है कि वस्तु पर किसी बिंदु से प्रतिबिंब के संगत बिंदु तक लगा कुल समय एक ही होता है, चाहे जिस भी किरण के अनुदिश मापा जाए। उदाहरण के लिए,



चित्र 10.7 एक समतल तरंगाग्र का अपवर्तन (a) एक पतले प्रिज़्म द्वारा, (b) एक उत्तल लेंस द्वारा, (c) एक समतल तरंगाग्र का अवतल दर्पण द्वारा परावर्तन।

जब कोई उत्तल लेंस, प्रकाश को एक वास्तविक प्रतिबिंब बनाने के लिए फ़ोकस करता है तो यद्यपि केंद्र से होकर जाने वाली किरणें छोटा पथ तय करती हैं, लेकिन काँच में धीमी चाल के कारण लगने वाला समय उतना ही होता है जितना कि लेंस के किनारे के निकट से होकर चलने वाली किरणों के लिए होता है।

10.3.4 डॉप्लर प्रभाव

हम यहाँ कहना चाहेंगे कि तरंगाग्रों का निर्माण करते समय यदि स्रोत (अथवा प्रेक्षक) गतिमान हों तो हमें सावधानी बरतनी चाहिए। उदाहरण के लिए, यदि कोई माध्यम न हो तथा स्रोत प्रेक्षक से दूर रहा हो तब बाद के तरंगाग्रों को प्रेक्षक तक पहुँचने में अधिक दूर चलना पड़ता है और इसलिए वे अधिक समय लेते हैं। इस प्रकार दो उत्तरोत्तर तरंगाग्रों के प्रेक्षक तक पहुँचने में लगने वाला समय स्रोत तक उनके पहुँचने में लगने वाले समय की अपेक्षा अधिक होता है। अतः जब स्रोत प्रेक्षक से दूर जाता है तो प्रेक्षक द्वारा मापी जाने वाली आवृत्ति में कमी होगी। यह *डॉप्लर प्रभाव* कहलाता है। खगोलज्ञ, तरंगदैर्घ्य में डॉप्लर प्रभाव के कारण होने वाली इस वृद्धि को *अभिरक्त विस्थापन* (red shift) कहते हैं, क्योंकि, स्पेक्ट्रम के दृश्य क्षेत्र की मध्यवर्ती तरंगदैर्घ्य लाल छोर की ओर खिसक जाती है। जब स्रोत प्रेक्षक की ओर चलता है तो उससे प्राप्त की जाने वाली तरंगों की तरंगदैर्घ्य में आभासी कमी हो जाती है, तरंगदैर्घ्य की इस कमी को *नीला विस्थापन* (blue shift) कहते हैं।

आपने पहले ही कक्षा 11 की पाठ्यपुस्तक के अध्याय 15 में ध्वनि तरंगों में डॉप्लर प्रभाव का

अध्ययन किया है। प्रकाश की चाल की तुलना में कम वेगों के लिए हम उन्हीं सूत्रों का प्रयोग कर सकते हैं, जिनका प्रयोग ध्वनि तरंगों के लिए किया जाता है। आवृत्ति में भिन्नात्मक परिवर्तन $\Delta\nu/\nu$ को $-v_{\text{त्रिज्य}}/c$ के द्वारा दिया जाता है, जहाँ $v_{\text{त्रिज्य}}$ प्रेक्षक के सापेक्ष स्रोत-वेग का प्रेक्षक को स्रोत से जोड़ने वाली रेखा की दिशा में घटक है। जब स्रोत प्रेक्षक से दूर जाता है, $v_{\text{त्रिज्य}}$ को धनात्मक मानते हैं। इस प्रकार डॉप्लर विस्थापन को व्यक्त कर सकते हैं –

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = -\frac{v_{\text{त्रिज्य}}}{c} \qquad (10.9)$$

उपरोक्त सूत्र तभी मान्य है जब स्रोत का वेग प्रकाश के वेग की तुलना में कम होता है। डॉप्लर प्रभाव का अधिक यथार्थ सूत्र प्राप्त करने के लिए, जो उन चालों के लिए भी मान्य है जो प्रकाश की चाल के निकट होती हैं, आइंसटाइन के सापेक्षिकता के विशिष्ट सिद्धांत की आवश्यकता होती है। प्रकाश के लिए डॉप्लर प्रभाव खगोलशास्त्र में बहुत महत्वपूर्ण है। यह दूरस्थ गैलेक्सियों के त्रिज्य-वेगों के मापन का आधार है।

उदाहरण 10.1 हमारे सापेक्ष किसी गैलेक्सी को किस गति से चलना चाहिए जिससे कि 589.0 nm की सोडियम लाइन 589.6 nm पर प्रेक्षित हो?

हल क्योंकि $\nu\lambda = c$, $\frac{\Delta\nu}{\nu} = -\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ (ν तथा λ में कम परिवर्तनों के लिए)

$\Delta\lambda = 589.6 - 589.0 = +0.6$ nm

समीकरण (10.9) के उपयोग से हम पाते हैं,

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = -\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = -\frac{v_{\text{त्रिज्य}}}{c}$$

अथवा $v_{\text{त्रिज्य}} \cong +c\left(\frac{0.6}{589.0}\right) = +3.06\times10^{5}\,\text{m s}^{-1}$

$= 306$ km/s

अत: गैलेक्सी इस गति से हमसे दूर जा रही है।

उदाहरण 10.1

उदाहरण 10.2

(a) जब एकवर्णीय प्रकाश दो माध्यमों को पृथक करने वाली सतह पर आपतित होता है, तब परावर्तित एवं अपवर्तित दोनों प्रकाश की आवृत्तियाँ समान होती हैं। स्पष्ट कीजिए क्यों?

(b) जब प्रकाश विरल से सघन माध्यम में गति करता है तो उसकी चाल में कमी आती है। क्या चाल में आई कमी प्रकाश तरंगों द्वारा संचारित ऊर्जा की कमी को दर्शाती है?

(c) प्रकाश की तरंग अवधारणा में, प्रकाश की तीव्रता का आकलन तरंग के आयाम के वर्ग से किया जाता है। वह क्या है जो प्रकाश की फ़ोटॉन अवधारणा में प्रकाश की तीव्रता का निर्धारण करता है?

हल

(a) परावर्तन तथा अपवर्तन, आपतित प्रकाश की पदार्थ के परमाणवीय अवयवों के साथ अन्योन्य क्रिया के द्वारा हो पाता है। परमाणुओं को दोलित्र के रूप में देखा जा सकता है जो बाह्य साधन

उदाहरण 10.2

उदाहरण 10.2

(प्रकाश) की आवृत्ति को लेकर प्रणोदित दोलन कर सकते हैं। एक आवेशित दोलक द्वारा उत्सर्जित प्रकाश की आवृत्ति उसके दोलन की आवृत्ति के बराबर होती है। अत: विकिरित प्रकाश की आवृत्ति आपतित प्रकाश की आवृत्ति के बराबर होती है।

(b) नहीं। तरंग द्वारा ले जाने वाली ऊर्जा तरंग के आयाम पर निर्भर करती है, यह तरंग संचरण की चाल पर निर्भर नहीं करती।

(c) फ़ोटॉन चित्रण में किसी दी हुई आवृत्ति के लिए प्रकाश की तीव्रता एकांक क्षेत्रफल से एकांक समय में गमन करने वाले फ़ोटॉन की संख्या द्वारा निर्धारित होती है।

10.4 तरंगों का कला-संबद्ध तथा कला-असंबद्ध योग

इस अनुच्छेद में हम दो तरंगों के अध्यारोपण द्वारा उत्पन्न व्यतिकरण के चित्राम (पैटर्न) पर विचार-विमर्श करेंगे। आपको याद होगा, हमने कक्षा 11 की पाठ्यपुस्तक के अध्याय 15 में अध्यारोपण के सिद्धांत का विवेचन किया था। वास्तव में व्यतिकरण का समस्त क्षेत्र अध्यारोपण के सिद्धांत पर आधारित है, जिसके अनुसार *किसी माध्यम में एक विशिष्ट बिंदु पर अनेक तरंगों द्वारा उत्पन्न परिणामी विस्थापन इनमें से प्रत्येक तरंग के विस्थापनों का सदिश योग होता है।*

दो सुइयों S_1 तथा S_2 की कल्पना करें जो जल की एक द्रोणिका में ऊपर और नीचे समान आवर्ती गति कर रही हैं [चित्र 10.8 (a)]। वे जल की दो तरंगें उत्पन्न करती हैं तथा किसी विशिष्ट बिंदु पर, प्रत्येक तरंग द्वारा उत्पन्न विस्थापनों के बीच कलांतर समय के साथ नहीं बदलता। जब ऐसा होता है तो इन दो स्रोतों को *कला-संबद्ध* कहा जाता है। चित्र 10.8 (b) में किसी दिए हुए समय पर शृंग (सतत वृत्त) तथा गर्त (बिंदुकित वृत्त) दर्शाए गए हैं। एक बिंदु P पर विचार करें जिसके लिए

$$S_1 P = S_2 P$$

क्योंकि दूरियाँ $S_1 P$ तथा $S_2 P$ बराबर हैं, इसलिए S_1 तथा S_2 से तरंगें P बिंदु तक चलने में समान समय लेंगी तथा जो तरंगें S_1 तथा S_2 से समान कला में निर्गम होती हैं, वे P बिंदु पर भी समान कला में पहुँचेंगी।

इस प्रकार, यदि स्रोत S_1 द्वारा किसी बिंदु P पर उत्पन्न विस्थापन

$$y_1 = a \cos \omega t$$

द्वारा दिया गया है तो स्रोत S_2 द्वारा उत्पन्न विस्थापन (बिंदु P पर) भी

$$y_2 = a \cos \omega t$$

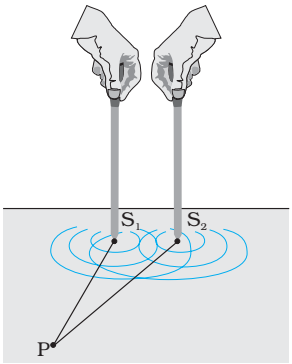
द्वारा प्रदर्शित होगा। अत: परिणामी विस्थापन होगा

$$y = y_1 + y_2 = 2\ a \cos \omega t$$

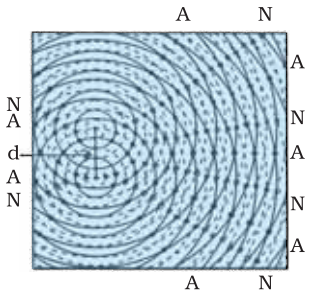
क्योंकि तीव्रता विस्थापन के वर्ग के समानुपातिक है, इसलिए परिणामी तीव्रता होगी

$$I = 4\ I_0$$

जहाँ I_0 प्रत्येक स्रोत की पृथक तीव्रता को निरूपित करती है। हम देख रहे हैं कि I_0, a^2 के समानुपाती है। वास्तव में $S_1 S_2$ के लंबअर्धक के किसी भी बिंदु पर तीव्रता $4I_0$ होगी। दोनों स्रोतों को रचनात्मक रूप से व्यतिकरण करते हुए कहा जाता है और इसे हम *संपोषी व्यतिकरण* कहते हैं। अब हम बिंदु Q पर विचार करते हैं [चित्र 10.9(a)], जिसके लिए



(a)



(b)

चित्र 10.8 (a) जल में समान कला में कंपन करती दो सुइयाँ दो संबद्ध स्रोतों को निरूपित करती हैं।
(b) जल के पृष्ठ पर किसी समय पर जल के अणुओं के विस्थापन का पैटर्न जिसमें निस्पंदी (शून्य विस्थापन) तथा प्रस्पंदी (अधिकतम विस्थापन) रेखाएँ दर्शायी गई हैं।

$S_2Q - S_1Q = 2\lambda$

S_1 से निर्गमित तरंगें S_2 से आने वाली तरंगों की अपेक्षा ठीक दो चक्र पहले पहुँचती हैं तथा फिर से समान कला में होंगी [चित्र 10.9 (a)]। यदि S_1 द्वारा उत्पन्न विस्थापन

$y_1 = a\cos\omega t$

हो तो S_2 द्वारा उत्पन्न विस्थापन

$y_2 = a\cos(\omega t - 4\pi) = a\cos\omega t$ होगा।

यहाँ हमने इस तथ्य का उपयोग किया है कि 2λ का पथांतर 4π के कलांतर के संगत है। दोनों विस्थापन फिर से समान कला में हैं तथा तीव्रता फिर $4\,I_0$ होगी और इससे संपोषी व्यतिकरण होगा। उपरोक्त विश्लेषण में हमने यह मान लिया है कि दूरियाँ S_1Q तथा S_2Q, d (जो S_1 तथा S_2 के बीच दूरी निरूपित करता है) की अपेक्षा बहुत अधिक हैं, अतएव यद्यपि S_1Q तथा S_2Q समान नहीं हैं, प्रत्येक तरंग द्वारा उत्पन्न विस्थापन का आयाम लगभग समान है।

अब हम एक बिंदु R पर विचार करते हैं [चित्र 10.9(b)] जिसके लिए

$S_2R - S_1R = -2.5\lambda$

S_1 से निर्गमित तरंगें स्रोत S_2 से आने वाली तरंगों की अपेक्षा 2.5 चक्र बाद पहुँचती हैं [चित्र 10.10(b)]। अत: यदि स्रोत S_1 द्वारा उत्पन्न विस्थापन का मान है

$y_1 = a\cos\omega t$

तब स्रोत S_2 द्वारा उत्पन्न विस्थापन

$y_2 = a\cos(\omega t + 5\pi) = -a\cos\omega t$ होगा।

यहाँ हमने इस तथ्य का उपयोग किया है कि 2.5λ का पथांतर 5π के कलांतर के संगत है। दोनों विस्थापन अब विपरीत कलाओं में हैं तथा दोनों विस्थापन एक-दूसरे को रद्द कर देते हैं तथा शून्य तीव्रता प्राप्त होती है। इसे *विनाशी व्यतिकरण* कहते हैं।

सारांशत: यदि दो संबद्ध स्रोत S_1 तथा S_2 समान कला में कंपन कर रहे हैं तब किसी यथेच्छ बिंदु P के लिए जबकि पथांतर

$$S_1P \sim S_2P = n\lambda \quad (n = 0, 1, 2, 3,\ldots) \qquad (10.10)$$

हमें संपोषी व्यतिकरण प्राप्त होगा तथा परिणामी तीव्रता $4I_0$ होगी। S_1P तथा S_2P के बीच चिह्न (~) S_1P तथा S_2P के बीच अंतर को निरूपित करता है। दूसरी ओर यदि बिंदु P इस प्रकार है कि पथांतर,

$$S_1P \sim S_2P = (n+\frac{1}{2})\lambda \quad (n = 0, 1, 2, 3, \ldots) \qquad (10.11)$$

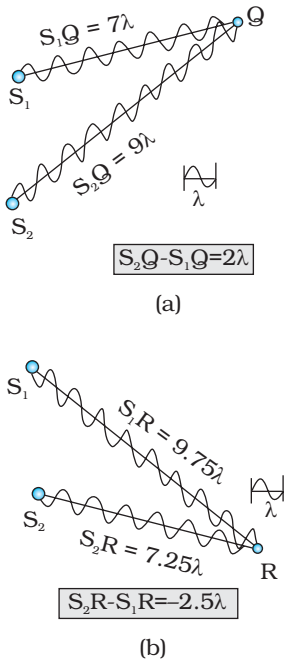
तो हमें विनाशी व्यतिकरण प्राप्त होगा तथा परिणामी तीव्रता शून्य होगी। अब, किसी दूसरे यथेच्छ बिंदु G (चित्र 10.10) के लिए मान लीजिए दो विस्थापनों के बीच कलांतर ϕ है; तब यदि स्रोत S_1 द्वारा उत्पन्न विस्थापन

$y_1 = a\cos\omega t$

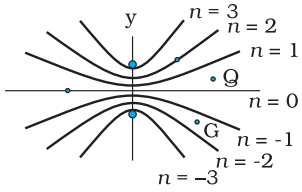
हो तो स्रोत S_2 द्वारा उत्पन्न विस्थापन

$y_2 = a\cos(\omega t + \phi)$ होगा

तथा परिणामी विस्थापन होगा



चित्र 10.9
(a) बिंदु Q पर संपोषी व्यतिकरण जिसके लिए पथांतर 2λ है। (b) बिंदु R पर विनाशी व्यतिकरण जिसके लिए पथांतर $2.5\,\lambda$ है ।



चित्र 10.10 उन बिंदुओं का बिंदुपथ जिनके लिए $S_1P - S_2P$ शून्य, $\pm\lambda$, $\pm 2\lambda$, $\pm 3\lambda$ हैं।

$$y = y_1 + y_2$$

$$= a\,[\cos \omega t + \cos (\omega t + \phi)]$$

$$= 2\,a \cos (\phi/2) \cos (\omega t + \phi/2)$$

परिणामी विस्थापन का आयाम $2a \cos (\phi/2)$ है इसलिए उस बिंदु पर तीव्रता होगी

$$I = 4\, I_0 \cos^2 (\phi/2) \qquad (10.12)$$

यदि $\phi = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi, \ldots$ जो समीकरण (10.10) की शर्त के संगत है, हमें संपोषी व्यतिकरण प्राप्त होगा तथा तीव्रता अधिकतम होगी। दूसरी ओर यदि $\phi = \pm\pi, \pm 3\pi, \pm 5\pi \ldots$ [जो समीकरण (10.11) की शर्त के संगत है] हमें विनाशी व्यतिकरण प्राप्त होगा तथा तीव्रता शून्य होगी।

अब यदि दो स्रोत कला-संबद्ध हैं (अर्थात इस प्रयोग में यदि दोनों सुइयाँ नियमित रूप से ऊपर नीचे आ-जा रही हैं) तो किसी भी बिंदु पर कलांतर ϕ समय के साथ नहीं बदलेगा तथा हमें स्थिर व्यतिकरण पैटर्न प्राप्त होगा, अर्थात् समय के साथ उच्चिष्ठ (maxima) तथा निम्निष्ठ (minima) की स्थितियाँ नहीं बदलेंगी। तथापि, यदि दोनों सुइयाँ निश्चित कलांतर नहीं रख पाती हैं, तो समय के साथ व्यतिकरण पैटर्न भी बदलेगा तथा यदि कलांतर समय के साथ बहुत तेज़ी से बदलता है, तो उच्चिष्ठ तथा निम्निष्ठ की स्थितियाँ भी समय के साथ तेज़ी से बदलेंगी तथा हम 'काल औसत' तीव्रता वितरण देखेंगे। जब ऐसा होता है तो हमें औसत तीव्रता प्राप्त होगी, जिसका मान होगा

$$< I > = 4 I_0 < \cos^2 \phi/2 > \qquad (10.13)$$

जहाँ कोणीय कोष्ठक काल औसत निरूपित करते हैं। वास्तव में अनुच्छेद 7.2 में दर्शाया गया है कि यदि $\phi(t)$ समय के साथ यादृच्छिक रूप से बदलता है तो काल औसत राशि $< \cos^2 (\phi/2) >$ का मान 1/2 होगा। यह भी सहजानुभूति से स्पष्ट है, क्योंकि फलन $\cos^2 (\phi/2)$ यादृच्छिक रूप से 0 तथा 1 के बीच बदलेगा तथा औसत मान 1/2 होगा। सभी बिंदुओं पर परिणामी तीव्रता निम्न से प्राप्त होगी

$$I = 2\, I_0 \qquad (10.14)$$

जब समय के साथ दो कंपित स्रोतों का कलांतर तेज़ी से बदलता है, हम कहते हैं कि ये स्रोत कला-असंबद्ध हैं और जब ऐसा होता है तो तीव्रताएँ केवल जुड़ जाती हैं। वास्तव में ऐसा तब होता है जब दो अलग-अलग प्रकाश स्रोत किसी दीवार को प्रकाशित करते हैं।

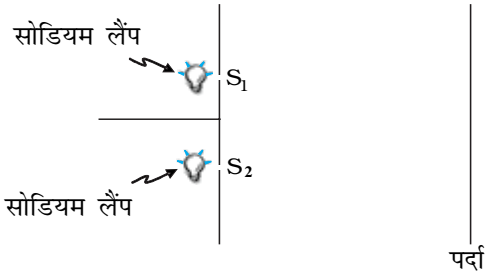
10.5 प्रकाश तरंगों का व्यतिकरण तथा यंग का प्रयोग

अब हम प्रकाश तरंगों का उपयोग करके व्यतिकरण पर विचार करेंगे। यदि हम दो सूचिछिद्रों को प्रदीप्त करने के लिए दो सोडियम लैंपों का उपयोग करें (चित्र 10.11), तो हमें कोई व्यतिकरण फ्रिंज दिखाई नहीं देंगी। ऐसा इस तथ्य के कारण है कि एक सामान्य स्रोत (जैसे सोडियम लैंप) से उत्सर्जित होने वाली प्रकाश तरंगों में, 10^{-10} s की कोटि के समय अंतरालों पर, आकस्मिक कला-परिवर्तन होता है। अतः दो स्वतंत्र प्रकाश स्रोतों से आने वाली प्रकाश तरंगों में कोई निश्चित कला संबंध नहीं होता तथा ये कला-असंबद्ध होते हैं। जैसी कि पहले अनुच्छेद में विवेचना की जा चुकी है, ऐसा होने पर परदे पर तीव्रताएँ जुड़ जाती हैं।

इंग्लैंड के भौतिकशास्त्री टॉमस यंग ने स्रोतों S_1 तथा S_2 से उत्सर्जित होने वाली तरंगों की कलाओं को नियंत्रित करने के लिए एक उत्तम तकनीक उपयोग की। उन्होंने एक अपारदर्शी परदे

तरंग व्यतिकरण के लिए उर्मिका टैंक प्रयोग
http://www.colorado.edu/physics/2000/applets/fourier.html
भौतिकी

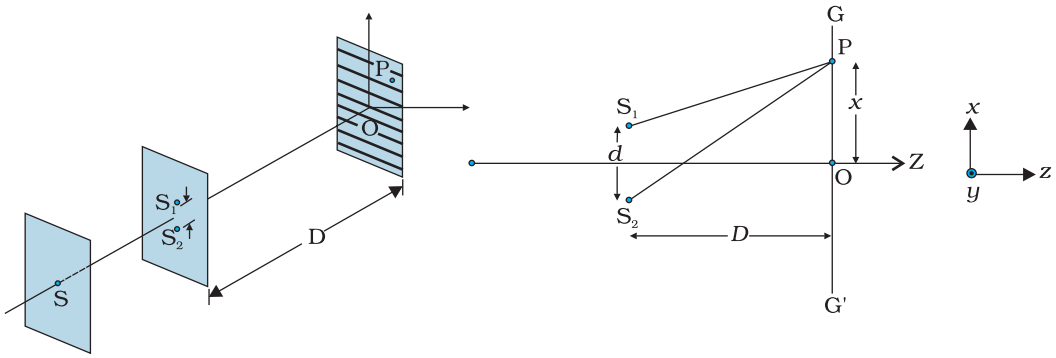
पर दो सूचिछिद्र S_1 तथा S_2 (एक-दूसरे को बहुत निकट) बनाए [चित्र 10.12(a)]। इन्हें एक अन्य सूचिछिद्र से प्रदीप्त किया गया जिसे एक दीप्त स्रोत से प्रकाशित किया गया था। प्रकाश तरंगें S से निकलकर S_1 तथा S_2 पर गिरती हैं। S_1 तथा S_2 दो कला-संबद्ध स्रोतों की भाँति कार्य करते हैं क्योंकि S_1 तथा S_2 से निकलने वाली प्रकाश तरंगें एक ही मूल स्रोत से व्युत्पन्न होती हैं तथा स्रोत S में अचानक कोई भी कला परिवर्तन S_1 तथा S_2 से आने वाले प्रकाश में ठीक उसी प्रकार का कला परिवर्तन करेगा। इस प्रकार दोनों स्रोत S_1 तथा S_2 समान कला में बँध जाएँगे अर्थात वे हमारे जल तरंगों के उदाहरण में [चित्र 10.8(a)] दो कंपित सुइयों की भाँति कला-संबद्ध होंगे।



चित्र 10.11 यदि दो सोडियम लैंप दो सूचिछिद्रों को प्रदीप्त करते हैं, तीव्रताएँ जुड़ जाती हैं तथा परदे पर व्यतिकरण फ्रिंजें दिखलाई नहीं देतीं।

इस प्रकार S_1 तथा S_2 से उत्सर्जित होने वाली गोलीय तरंगें चित्र 10.12(b) की भाँति परदे GG′ पर व्यतिकरण फ्रिंजें उत्पन्न करेंगी। अधिकतम तथा न्यूनतम तीव्रता की स्थितियों की गणना अनुच्छेद 10.4 में दिए गए विश्लेषण का उपयोग करके की जा सकती है, जहाँ पर हमने रेखा GG′ [चित्र 10.12(b)] पर एक यथेच्छ बिंदु P लिया जो अधिकतम तीव्रता के संगत है। इस अवस्था में

$$S_2P - S_1P = n\lambda; \quad n = 0, 1, 2 \ldots \qquad (10.15)$$



(a) (b)

चित्र 10.12 व्यतिकरण पैटर्न उत्पन्न करने के लिए टॉमस यंग की व्यवस्था।

अब

$$(S_2P)^2 - (S_1P)^2 = \left[D^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2\right] - \left[D^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2\right] = 2xd$$

जहाँ पर $S_1S_2 = d$ तथा $OP = x$। अतः,

$$S_2P - S_1P = \frac{2xd}{S_2P + S_1P} \qquad (10.16)$$

यदि x, $d << D$ तो यदि $S_2P + S_1P$ (जो हर में है) को $2D$ से प्रतिस्थापित कर दें तो केवल नगण्य त्रुटि ही सन्निविष्ट होगी। उदाहरण के लिए $d = 0.1$ cm, $D = 100$ cm, OP = 1 cm



टॉमस यंग (1773-1829)

टॉमस यंग (1773-1829)
अंग्रेज़ भौतिकविद, कायचिकित्सक एवं मिस्र विशेषज्ञ। यंग ने बहुत तरह की वैज्ञानिक समस्याओं पर कार्य किया, जिनमें एक ओर आँख की संरचना और दृष्टि प्रक्रिया तो दूसरी ओर रोसेटा मणि का रहस्य भेदन शामिल है। उन्होंने प्रकाश के तरंग सिद्धांत को पुनर्जीवित किया और समझाया कि व्यतिकरण, प्रकाश के तरंग गुण का प्रमाण प्रस्तुत करता है।

के लिए (जो प्रकाश तरंगों का उपयोग करके व्यतिकरण प्रयोग के लिए विशिष्ट मानों के संगत हैं) हमें प्राप्त होगा

$$S_2P + S_1P = [(100)^2 + (1.05)^2]^{1/2} + [(100)^2 + (0.95)^2]^{1/2}$$

$$\approx 200.01 \text{ cm}$$

इस प्रकार यदि हम $S_2P + S_1P$ को $2D$ से प्रतिस्थापित कर दें तो लगभग 0.005% त्रुटि आवेष्टित होगी। इस सन्निकटन से समीकरण (10.16) होगी,

$$S_2P - S_1P \approx \qquad (10.17)$$

इस प्रकार समीकरण 10.10 के अनुसार हमें संपोषी व्यतिकरण द्वारा दीप्त क्षेत्र प्राप्त होंगे जब

$$x = x_n = \frac{n\lambda D}{d}; \; n = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots \qquad (10.18)$$

होगा। दूसरी ओर हमें

$$x = x_n = (n+\quad)\frac{\lambda D}{d}; \quad n = 0, \pm 1, \pm 2 \qquad (10.19)$$

के निकट अदीप्त क्षेत्र प्राप्त होंगे।

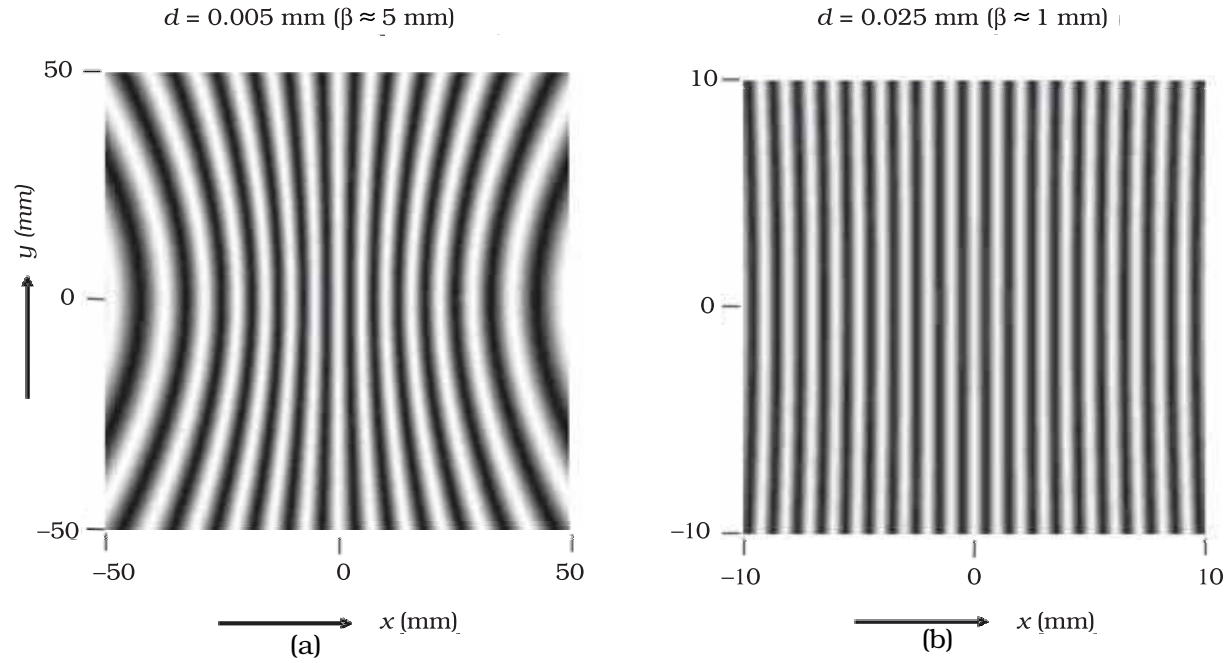
इस प्रकार चित्र 10.13 की भाँति परदे पर अदीप्त तथा दीप्त बैंड दिखलाई देंगे। ऐसे बैंडों को *फ्रिंज* कहते हैं। समीकरण (10.18) तथा (10.19) दर्शाती है कि काले तथा दीप्त फ्रिंज समान दूरी पर हैं तथा दो क्रमागत अदीप्त तथा दीप्त फ्रिंजों के बीच की दूरी होगी

$$\beta = x_{n+1} - x_n$$

अथवा $$\beta = \frac{\lambda D}{d} \qquad (10.20)$$

यह *फ्रिंज-चौड़ाई* का व्यंजक है। स्पष्टतया मध्य बिंदु O (चित्र 10.12) दीप्त होगा क्योंकि $S_1O = S_2O$ तथा यह $n = 0$ के संगत होगा। यदि हम कागज़ के तल के लंबवत तथा O से गुजरने वाली रेखा पर विचार करें (अर्थात, y-अक्ष के अनुदिश) तो इस रेखा पर सभी बिंदु S_1 तथा S_2 से समान दूरी पर होंगे और हमें दीप्त मध्य फ्रिंज मिलेगा, जो चित्र 10.13 में दर्शाए अनुसार एक सरल रेखा है। परदे पर व्यतिकरण पैटर्न की आकृति ज्ञात करने के लिए हम देखेंगे कि एक विशेष फ्रिंज $S_2P - S_1P$ के नियत मान के बिंदु पथ के संगत है। जब भी यह नियतांक λ का समाकल गुणक है, फ्रिंज दीप्त होगा तथा जब यह $\lambda/2$ का विषम समाकल गुणक है, फ्रिंज अदीप्त होगा। अब x-y तल में स्थित बिंदु P का बिंदु पथ इस प्रकार होगा कि $S_2P - S_1P$ (= Δ) एक नियतांक होने के कारण एक अति परवलयकार होगा। इस प्रकार फ्रिंज पैटर्न सुनिश्चित रूप से अतिपरवलय है; तथापि यदि दूरी D फ्रिंज चौड़ाई की अपेक्षा बहुत अधिक है, तो फ्रिंजें काफ़ी हद तक सीधी रेखाएँ होंगी, जैसा कि चित्र 10.13(b) में दर्शाया गया है।

चित्र 10.12 में दर्शाए द्वि-झिरी प्रयोग में हमने स्रोत छिद्र S को दोनों झिरियों के लंबअर्धक पर रखा है, जिसे SO रेखा से प्रदर्शित किया गया है। यदि स्रोत S लंबअर्धक से थोड़ा दूर हो तो क्या



चित्र 10.13 दो स्रोतों S_1 तथा S_2 द्वारा GG′ परदे पर (देखिए चित्र 10.12) उत्पन्न हुआ कंप्यूटर द्वारा बनाया गया फ्रिंज पैटर्न; (a) तथा (b) संगत हैं क्रमशः d = 0.005 mm तथा 0.025 mm के लिए (दोनों चित्रों में D = 5 cm तथा $\lambda = 5 \times 10^{-5}$ cm) ('ऑपटिक्स' ए. घटक, टाटा मैक्ग्रा हिल पब्लिशिंग कं. लि., नयी दिल्ली, 2000 से लिया गया।)

होगा? मान लीजिए स्रोत S को किसी नयी स्थिति S′ तक खिसका दिया गया है और Q, S_1 तथा S_2 का मध्यबिंदु है। यदि कोण S′QS का मान ϕ है तब केंद्रीय दीप्त फ्रिंज दूसरी दिशा में $-\phi$ कोण पर मिलेगा। इस प्रकार यदि स्रोत S लंब अर्धक पर है, तब केंद्रीय फ्रिंज बिंदु O पर होगा जो कि लंबअर्धक पर होगा। यदि स्रोत S किसी नए बिंदु S′ पर कोण ϕ से खिसका दिया गया है, तब केंद्रीय फ्रिंज कोण $-\phi$ पर स्थित O′ बिंदु पर दिखलाई देगा, जिसका अर्थ है कि यह लंब अर्धक से दूसरी ओर इतने ही कोण से खिसक जाएगा। इसका अर्थ यह भी है कि स्रोत S′ मध्य बिंदु Q तथा केंद्रीय फ्रिंज का बिंदु O′ एक सरल रेखा में हैं।

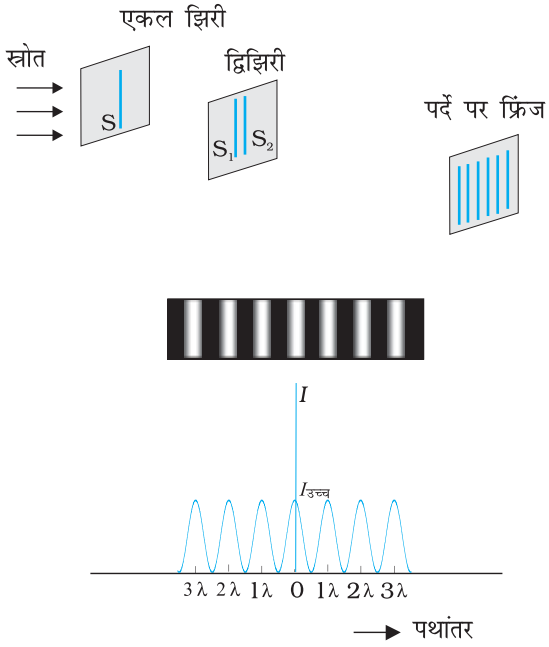
इस अनुच्छेद को हम डेनिस गेबर* के नोबेल भाषण के उद्धरण से समाप्त करेंगे।

प्रकाश की तरंग प्रकृति को टॉमस यंग ने सन् 1801 में पहली बार एक सरल तथा आश्चर्यजनक प्रयोग द्वारा युक्तियुक्त तरीके से प्रदर्शित किया। उन्होंने सूर्य के प्रकाश की एक किरण को अँधेरे कमरे में आने दिया, उसके सामने दो बारीक सूचिछिद्र बनाकर एक काला परदा रखा तथा उसके आगे कुछ दूरी पर एक सफ़ेद परदा रखा। उन्होंने एक दीप्त रेखा के दोनों ओर दो काली-सी रेखाएँ देखीं जिसने उन्हें इस प्रयोग को दोहराने के लिए पर्याप्त प्रोत्साहन दिया। लेकिन इस बार उन्होंने दीप्त पीला सोडियम प्रकाश उत्पन्न करने के लिए प्रकाश स्रोत की तरह एक स्प्रिट लैंप का उपयोग किया, जिसमें थोड़ा-सा नमक डाल रखा था। इस बार उन्हें समान दूरी पर स्थित अनेक काली रेखाएँ दिखलाई दीं। यह पहला स्पष्ट प्रमाण था कि प्रकाश से प्रकाश को मिलाने पर अँधेरा पैदा हो सकता है। इस

* डेनिस गेबर ने सन् 1971 में होलोग्राफ़ी के आविष्कार के लिए भौतिकी का नोबेल पुरस्कार प्राप्त किया।

परिघटना को व्यतिकरण कहा जाता है। टॉमस यंग की ऐसी ही अपेक्षा थी क्योंकि वह प्रकाश के तरंग सिद्धांत में विश्वास करते थे।

यहाँ यह उल्लेख करना आवश्यक है कि यद्यपि S_1 तथा S_2 बिंदु स्रोत हैं फिर भी फ्रिंज सीधी रेखाएँ हैं। यदि बिंदु स्रोतों के स्थान पर हमारे पास झिरियाँ होंगी (चित्र 10.14), तो बिंदुओं का प्रत्येक युग्म सीधी रेखा फ्रिंज उत्पन्न करेगा, जिसके परिणामस्वरूप बढ़ी हुई तीव्रता के सीधी रेखा फ्रिंज प्राप्त होंगे।



चित्र 10.14 यंग के द्विझिरी प्रयोग में तीव्रता वितरण का फ़ोटोग्राफ़ तथा ग्राफ़

टॉमस यंग के प्रयोग का सुंदर सजीव चित्रण
http://vsg.quasihome.com/interfer.html
भौतिकी

उदाहरण 10.3

उदाहरण 10.3 दो झिरियाँ 1 मिलीमीटर दूर बनाई गई हैं और परदे को एक मीटर दूर रखा गया है। फ्रिंज अंतराल कितना होगा जब 500 nm तरंगदैर्घ्य का नीला-हरा प्रकाश प्रयोग में लाया जाता है?

हल फ्रिंज अंतराल $\frac{D\lambda}{d} = \frac{1 \times 5 \times 10^{-7}}{1 \times 10^{-3}}$ m

$= 5 \times 10^{-4}$ m $= 0.5$ mm

उदाहरण 10.4

उदाहरण 10.4 निम्नलिखित प्रचालनों में प्रत्येक के कारण यंग के द्विझिरी प्रयोग के व्यतिकरण पर क्या प्रभाव पड़ेगा?

(a) झिरियों के समतल से परदे को दूर कर देने पर;

(b) (एकवर्णी) स्रोत को दूसरे कम तरंगदैर्घ्य वाले (एकवर्णी) स्रोत से प्रतिस्थापन करने पर;

(c) दो झिरियों के बीच पार्थक्य (दूरी) बढ़ाने पर;

(d) स्रोत झिरी को द्विझिरी के समतल के समीप लाने पर;

(e) स्रोत झिरी की चौड़ाई बढ़ने पर;

(f) एकवर्णी प्रकाश स्रोत को श्वेत प्रकाश स्रोत से प्रतिस्थापित करने पर;

(प्रत्येक प्रचालन में उल्लेखित प्राचल (पैरामीटर) के अतिरिक्त सभी प्राचल अपरिवर्तनीय हैं।)

हल

(a) फ्रिंजों का कोणीय पार्थक्य अचर रहता है ($= \lambda/d$)। फ्रिंजों का वास्तविक पार्थक्य दोनों झिरियों के समतल से परदे की दूरी के समानुपात में बढ़ता है।

(b) फ्रिंजों का पार्थक्य (तथा कोणीय पार्थक्य भी) घटता है। तथापि निम्न (d) खंड में उल्लेखित शर्त देखें।

(c) फ्रिंजों का पार्थक्य (तथा कोणीय पार्थक्य भी) घटता है। तथापि निम्न खंड (d) में उल्लेखित शर्त देखें।

(d) मान लीजिए s स्रोत का साइज़ है तथा S दोनों झिरियों के समतल से इसकी दूरी है। व्यतिकरण फ्रिंजों को देखने के लिए, निम्न शर्त पूरी होनी चाहिए; $s/S < \lambda/d$ अन्यथा, स्रोत के विभिन्न भागों द्वारा उत्पन्न व्यतिकरण पैटर्न अतिव्याप्त (overlap) करेंगे तथा फ्रिंजें दिखलाई नहीं देंगी। इस प्रकार जब S घटता है (अर्थात स्रोत झिरी पास लाई जाती है), व्यतिकरण पैटर्न कम और कम स्पष्ट होता जाता है तथा जब स्रोत अत्यंत निकट आ जाता है, इस शर्त के पूरा होने के लिए, फ्रिंजें गायब हो जाती हैं। जब तक ऐसा होता है, फ्रिंज अंतराल स्थिर रहता है।

(e) (d) की भाँति। जैसे-जैसे स्रोत झिरी की चौड़ाई बढ़ती है, फ्रिंज पैटर्न कम तथा कम स्पष्ट होता जाता है। जब स्रोत झिरी इतनी चौड़ी हो जाती है कि शर्त $s/S \leq \lambda/d$ पूरी नहीं होती, व्यतिकरण पैटर्न गायब हो जाता है।

(f) श्वेत प्रकाश के विभिन्न घटक रंगों के कारण व्यतिकरण पैटर्न का अतिव्यापन होता है (कला-असंबद्ध रूप से)। विभिन्न रंगों के लिए केंद्रीय दीप्ति फ्रिंजें एक ही स्थिति में होते हैं। अत: केंद्रीय फ्रिंज श्वेत होता है। बिंदु P के लिए $S_2P - S_1P = \lambda_b/2$, [जहाँ λ_b (~4000Å) नीले वर्ग के लिए तरंगदैर्घ्य है, नीला रंग अनुपस्थित होगा तथा फ्रिंज का रंग लाल प्रतीत होगा। इससे थोड़ा दूर, $S_2Q - S_1Q = \lambda_b = \lambda r/2$ [जहाँ λr (8000Å) लालवर्ण का तरंगदैर्घ्य है], फ्रिंज मुख्यत: नीली प्रतीत होगी। केंद्रीय श्वेत फ्रिंज के किसी भी ओर का सबसे समीप का फ्रिंजें लाल प्रतीत होती हैं तथा सबसे दूर का फ्रिंजें नीली प्रतीत होती हैं। कुछ फ्रिंजों के पश्चात कोई स्पष्ट फ्रिंज पैटर्न दिखलाई नहीं देता।

उदाहरण 10.4

10.6 विवर्तन

यदि हम किसी अपारदर्शी वस्तु के द्वारा बनने वाली छाया को ध्यानपूर्वक देखें तो हम पाएँगे कि ज्यामितीय छाया के क्षेत्र के समीप व्यतिकरण के समान बारी-बारी से उदीप्त तथा दीप्त क्षेत्र आते हैं। ऐसा विवर्तन की परिघटना के कारण होता है। विवर्तन एक

सामान्य अभिलक्षण है जो सभी प्रकार की तरंगों द्वारा प्रदर्शित किया जाता है, चाहे ये ध्वनि तरंगें हों, प्रकाश तरंगें हों, जल तरंगें हों अथवा द्रव्य तरंगें हों। क्योंकि अधिकांश अवरोधकों के विस्तार से प्रकाश की तरंगदैर्घ्य अत्यंत छोटी है इसीलिए हमें दैनिक जीवन के प्रेक्षणों में विवर्तन के प्रभावों का सामना नहीं करना पड़ता। तथापि, हमारी आँख या प्रकाशिक यंत्रों जैसे दूरदर्शकों अथवा सूक्ष्मदर्शियों का निश्चित वियोजन विवर्तन की परिघटना के कारण सीमित रहता है। वास्तव में जब हम किसी CD को देखते हैं तो उसमें रंग विवर्तन प्रभाव के कारण ही दिखलाई देते हैं। अब हम विवर्तन की परिघटना पर चर्चा करेंगे।

10.6.1 एकल झिरी

यंग के प्रयोग के विवेचन में, हमने कहा है कि एक संकीर्ण एकल झिरी नए स्रोत की तरह कार्य करती है, जहाँ से प्रकाश विस्तारित होता है। यंग के पहले भी, प्रारंभिक प्रयोगकर्ताओं जिनमें न्यूटन भी शामिल थे, के ध्यान में यह आ चुका था कि प्रकाश संकीर्ण छिद्रों तथा झिरियों से विस्तारित होता है। यह कोने से मुड़कर उस क्षेत्र में प्रवेश करता हुआ प्रतीत होता है जहाँ हम छाया की अपेक्षा करते हैं। इन प्रभावों को जिन्हें *विवर्तन* कहते हैं, केवल तरंग धारणा के उपयोग से ही उचित रूप से समझ सकते हैं। आखिर, आपको कोने के पीछे से किसी को बात करते हुए उसकी ध्वनि तरंगों को सुनकर शायद ही आश्चर्य होता है।

जब यंग के प्रयोग की एकवर्णी स्रोत से प्रकाशित द्विझिरी को एक संकीर्ण एकल झिरी द्वारा प्रतिस्थापित किया जाता है तो एक ब्रॉड (चौड़ा) पैटर्न दिखाई पड़ता है जिसके मध्य में दीप्त क्षेत्र होता है। इसके दोनों ओर क्रमागत दीप्त एवं अदीप्त क्षेत्र होते हैं जिनकी तीव्रता केंद्र से दूर होने पर कम होती जाती है (चित्र 10.16)। इसको समझने के लिए चित्र 10.15 देखिए, जिसमें a चौड़ाई की एकल झिरी LN पर अभिलंबवत पड़ने वाले समांतर किरण पुंज को दर्शाया गया है। विवर्तित प्रकाश आगे रखे एक परदे पर आपतित होता है। झिरी का मध्य बिंदु M है।

बिंदु M से गुज़रने वाली और झिरी के तल के अभिलंबवत सरल रेखा परदे को बिंदु C पर मिलती है। हमें परदे के किसी बिंदु P पर तीव्रता ज्ञात करनी है। जैसा पहले चर्चा कर चुके हैं, P को विभिन्न बिंदुओं L, M, N आदि से जोड़ने वाली विभिन्न सरल रेखाएँ परस्पर समांतर एवं अभिलंब MC से कोण θ बनाती हुई मानी जा सकती हैं [चित्र 10.15]।

मूल धारणा यह है कि झिरी को बहुत से छोटे भागों में विभाजित किया जाए और बिंदु P पर उनके योगदानों को उचित कलांतर के साथ जोड़ा जाए। हम झिरी पर प्राप्त तरंगाग्र के विभिन्न भागों को द्वितीयक स्रोतों की तरह व्यवहार में लाते हैं। क्योंकि, आपाती तरंगाग्र झिरी के तल में समांतर है, तथा ये स्रोत एक ही कला में होते हैं।

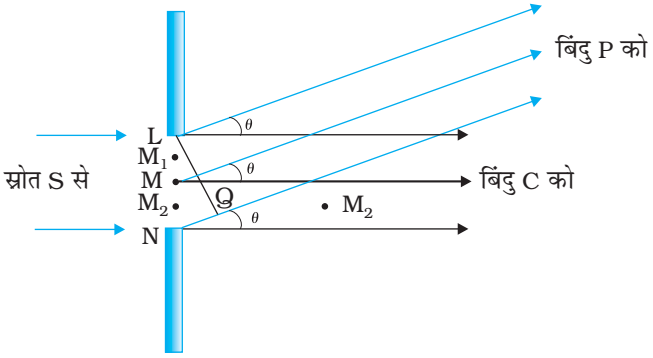
झिरी के दो सिरों के बीच के पथांतर (NP – LP) की गणना ठीक उसी प्रकार की जा सकती है जैसे कि टॉमस यंग के प्रयोग में की थी। चित्र 10.15 से,

$$\begin{aligned} NP - LP &= NQ \\ &= a \sin \theta \\ &\approx a\theta \end{aligned} \qquad (10.21)$$

इसी प्रकार, यदि झिरी के तल में दो बिंदुओं M_1 एवं M_2 के बीच दूरी y हो तो पथांतर $M_2P - M_1P \approx y\theta$ । अब, हमें स्रोतों की बड़ी संख्या से प्राप्त होने वाले समान,

कला-संबद्ध योगदानों को जोड़ना है जिनमें से प्रत्येक भिन्न कला संपन्न होता है। यह गणना फ्रेनेल द्वारा समाकलन के उपयोग द्वारा की गई थी तथा हम यहाँ इस पर विचार नहीं करेंगे। विवर्तन पैटर्न के मुख्य अभिलक्षण साधारण तर्कों द्वारा समझे जा सकते हैं।

परदे के केंद्रीय बिंदु C पर, कोण θ शून्य है। सभी पथांतर शून्य हैं। अत: झिरी के सभी भागों का योगदान समकला में है। इससे बिंदु C पर उच्चतम तीव्रता मिलती है। चित्र 10.15 के प्रायोगिक प्रेक्षण दर्शाते हैं कि तीव्रता का केंद्रीय उच्चिष्ठ $\theta = 0$ पर है तथा दूसरे द्वितीयक उच्चिष्ठ $\theta \approx (n+1/2)\ \lambda/a$ पर हैं तथा निम्निष्ठ (शून्य तीव्रता) $\theta \approx n\lambda/a$, $n = \pm1, \pm2, \pm3, \ldots$ पर हैं। यह देखना आसान है कि कोणों के इन मानों के लिए निम्निष्ठ क्यों प्राप्त होते हैं। पहले कोण θ पर विचार करें, जहाँ पथांतर $a\theta$, λ है तब,



चित्र 10.15 किसी एकल झिरी द्वारा विवर्तन में पथांतर की ज्यामिति।

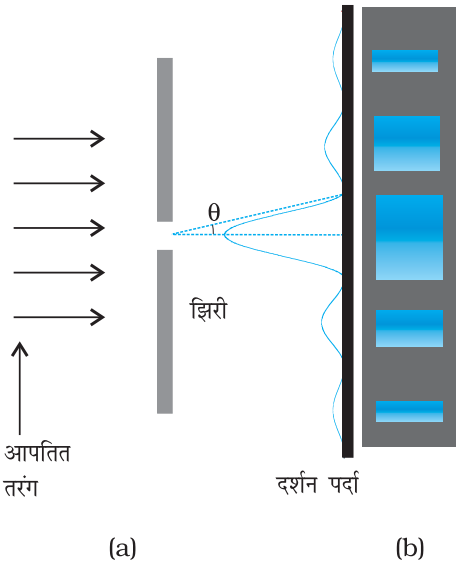
$$\theta \approx \lambda / a \qquad (10.22)$$

अब, झिरी को दो बराबर भागों LM तथा MN में बाँटें जिनमें प्रत्येक का आकार $a/2$ है। भाग LM में प्रत्येक बिंदु M_1 के लिए भाग MN में बिंदु M_2 इस प्रकार है कि $M_1M_2 = a/2$ । बिंदु P पर M_1 तथा M_2 के बीच पथांतर चुने हुए कोण θ के लिए $M_2P - M_1P = \theta a/2 = \lambda/2$। इसका अर्थ यह है कि M_1 तथा M_2 के योगदान 180° से विपरीत कला में हैं तथा $\theta = \lambda/a$ दिशा में रद्द हो जाते हैं। इसलिए झिरी के दो अर्द्धभागों LM तथा MN के योगदान एक-दूसरे को रद्द कर देते हैं। समीकरण (10.22) वह कोण बताती है जिस पर तीव्रता शून्य हो जाती है। इसी प्रकार यह दर्शाया जा सकता है कि $\theta = n\lambda/a$ के लिए तीव्रता शून्य होगी, जहाँ n एक पूर्णांक है (शून्य के अलावा)। ध्यान दें कि झिरी का आकार a घटने से केंद्रीय उच्चिष्ठ का कोणीय साइज़ बढ़ता है।

यह देखना भी आसान है कि $\theta = (n + 1/2)\ \lambda/a$ पर उच्चिष्ठ क्यों प्राप्त होता है तथा n का मान बढ़ने पर इनकी तीव्रता लगातार कम क्यों होती जाती है। अब एक कोण $\theta = 3\lambda/2a$ पर विचार करें जो दो अदीप्त फ्रिंजों के मध्य में है। झिरी को तीन बराबर भागों में बाँटें। यदि हम प्रथम दो-तिहाई झिरी को लें तो दो सिरों के बीच पथांतर होगा

$$\frac{2}{3}a \times \theta = \frac{2a}{3} \times \frac{3\lambda}{2a} = \lambda \qquad (10.23)$$

इसलिए, प्रथम दो-तिहाई झिरी को दो अर्द्धभागों में विभाजित किया जा सकता है जिनका पथांतर $\lambda/2$ होगा। इन दो अर्द्धभागों के योगदान उसी प्रकार रद्द हो जाते हैं जैसे कि पहले वर्णन किया गया है। केवल शेष एक-तिहाई भाग ही दो निम्निष्ठों के मध्य किसी बिंदु पर तीव्रता को योगदान देता है। स्पष्टत: यह केंद्रीय उच्चिष्ठ की अपेक्षा काफ़ी क्षीण होगा (जहाँ पूरी झिरी समकला में योगदान देती है)। इसी प्रकार, यह दिखाया जा सकता है कि $(n + 1/2)\ \lambda/a$ जहाँ $n = 2, 3$, आदि पर उच्चिष्ठ प्राप्त होगा। ये n के बढ़ने के साथ क्षीण होते जाते हैं, क्योंकि झिरी का केवल पाँचवाँ, सातवाँ आदि भाग ही इन स्थितियों में योगदान देता है। फ़ोटोग्राफ़ तथा इसके संगत तीव्रता पैटर्न चित्र 10.16 में दर्शाए गए हैं।



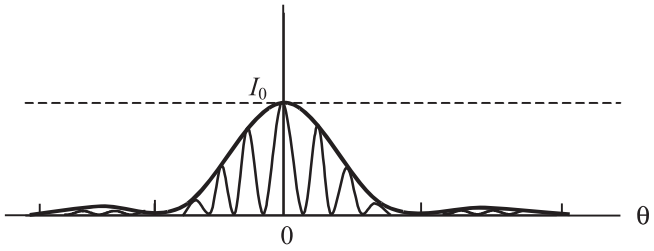
चित्र 10.16 एकल झिरी द्वारा विवर्तन के लिए फ्रिंजों का फ़ोटोग्राफ़ तथा तीव्रता वितरण।

व्यतिकरण तथा विवर्तन में क्या अंतर है, इस संबंध में इन परिघटनाओं की खोज के समय से ही वैज्ञानिकों में लंबा विचार-विमर्श होता रहा है। इस संबंध

में रिचर्ड फ़ाइनमैन* ने अपने प्रसिद्ध *फ़ाइनमैन लेक्चर्स ऑन फ़िजिक्स* में क्या कहा है, यह जानना दिलचस्प रहेगा।

> *अभी तक कोई भी व्यतिकरण तथा विवर्तन के बीच अंतर को संतोषप्रद रूप से परिभाषित नहीं कर पाया है। यह केवल उपयोग का प्रश्न है, इन दोनों के बीच कोई सुस्पष्ट तथा महत्वपूर्ण भौतिक अंतर नहीं है। मोटे तौर से हम अधिक से अधिक कह सकते हैं कि जब केवल कुछ स्रोत होते हैं, मान लीजिए दो व्यतिकारी स्रोत, तब प्रायः मिलने वाले परिणाम को व्यतिकरण कहते हैं, लेकिन यदि इनकी संख्या बहुत अधिक हो, ऐसा प्रतीत होता है कि विवर्तन शब्द प्रायः उपयोग किया जाता है।*

द्विझिरी प्रयोग में, हमें ध्यान देना चाहिए कि परदे पर बनने वाला पैटर्न वास्तव में प्रत्येक झिरी या छिद्र द्वारा अध्यारोपण से बनने वाला एकल झिरी विवर्तन पैटर्न है, तथा द्विझिरी व्यतिकरण पैटर्न है। इसे चित्र 10.17 में दर्शाया गया है। यह एक विस्तृत विवर्तन शीर्ष दर्शाता है जिसमें द्विझिरी व्यतिकरण के कारण अनेक कम चौड़ाई के फ्रिंज दिखलाई देते हैं। विस्तृत विवर्तन शीर्ष में विद्यमान व्यतिकरण फ्रिंजों की संख्या अनुपात d/a अर्थात दो झिरियों के बीच की दूरी तथा झिरी की चौड़ाई के अनुपात पर निर्भर है। a के बहुत छोटे बनने की सीमा में, निवर्तन पैटर्न बहुत समतल बनेगा तथा हमें द्विझिरी व्यतिकरण पैटर्न दिखाई देगा [देखिए चित्र 10.13 (b)]



चित्र 10.17 वास्तविक द्विझिरी व्यतिकरण पैटर्न। आवरण एकल झिरी विवर्तन को दर्शाता है।

एकल झिरी विवर्तन पैटर्न का सुंदर सजीव चित्रण
http://www.phys.hawaii.edu/~teb/optics/java/slitdiffr/

भौतिकी

उदाहरण 10.5

उदाहरण 10.5 उदाहरण 10.3 में, प्रत्येक झिरी की चौड़ाई कितनी होनी चाहिए जिससे कि एकल झिरी पैटर्न के केंद्रीय उच्चिष्ठ के भीतर द्विझिरी पैटर्न के 10 उच्चिष्ठ प्राप्त हो सकें?

हल हम चाहते हैं

$$a\theta = \lambda, \theta = \frac{\lambda}{a}$$

$$10\frac{\lambda}{d} = 2\frac{\lambda}{a} \quad a = \frac{d}{5} = 0.2 \text{ mm}$$

ध्यान दें कि प्रकाश की तरंगदैर्घ्य तथा परदे की दूरी, झिरी की चौड़ाई a के परिकलन में शामिल नहीं होती।

चित्र 10.12 के द्विझिरी व्यतिकरण प्रयोग में यदि हम एक झिरी को बंद कर दें तो क्या होगा? आप देखेंगे कि अब यह एक एकल झिरी की भाँति कार्य करता है। परंतु आपको पैटर्न के कुछ खिसकने पर ध्यान देना होगा। अब हमारे पास S पर एक स्रोत है तथा केवल एक छिद्र (या झिरी)

* रिचर्ड फ़ाइनमैन को 1965 का भौतिकी का नोबेल पुरस्कार मिला जो उनके क्वांटम वैद्युतगतिकी के मौलिक कार्य पर दिया गया।

S_1 या S_2। यह परदे पर एकल झिरी विवर्तन पैटर्न उत्पन्न करेगी। केंद्रीय दीप्त फ्रिंज का केंद्र उस बिंदु पर दिखलाई देगा जो वस्तु स्थिति के अनुसार सरल रेखा SS_1 या SS_2 पर स्थित होगा।

अब हम व्यतिकरण पैटर्न तथा संबद्धतया प्रदीप्त एकल झिरी के पैटर्न (जिसे सामान्यतया एकल झिरी विवर्तन पैटर्न कहते हैं) की समानता तथा विषमता का वर्णन करेंगे।

(i) व्यतिकरण पैटर्न में समान अंतराल पर दीप्त तथा अदीप्त बैंड होते हैं। विवर्तन पैटर्न में एक केंद्रीय दीप्त उच्चिष्ठ होता है जो दूसरे उच्चिष्ठों से दो गुना चौड़ा है। केंद्र के दोनों ओर दूर आनुक्रमिक उच्चिष्ठों पर तीव्रता कम होती जाती है।

(ii) हम व्यतिकरण पैटर्न का परिकलन दो संकीर्ण झिरियों से उद्गमित दो तरंगों के अध्यारोपण द्वारा करते हैं। विवर्तन पैटर्न एक एकल झिरी के प्रत्येक बिंदु से उद्गमित सतत तरंग परिवार के अध्यारोपण से प्राप्त होता है।

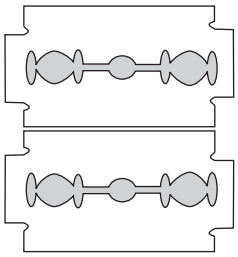
(iii) चौड़ाई a की किसी एकल झिरी के लिए, व्यतिकरण पैटर्न का पहला शून्य कोण λ/a पर स्थित होता है। इसी कोण λ/a पर हमें दो संकीर्ण झिरियों जिनके बीच की दूरी a है, के लिए उच्चिष्ठ (शून्य नहीं) मिलता है।

हमें यह समझ लेना चाहिए कि अच्छा व्यतिकरण तथा विवर्तन पैटर्न देख पाने के लिए d तथा a दोनों ही काफ़ी छोटे होने चाहिए। उदाहरण के लिए, दो झिरियों के बीच प्राथक्य लगभग एक मिलीमीटर की कोटि का होना चाहिए। प्रत्येक झिरी की चौड़ाई a और भी छोटी होनी चाहिए, लगभग 0.1 या 0.2 mm की कोटि के बराबर।

यंग के प्रयोग तथा एकल झिरी विवर्तन के हमारे विवेचन में, हमने यह माना है कि परदा जिस पर फ्रिंजें बनती हैं, अधिक दूरी पर है। झिरी से परदे तक के दो अथवा अधिक पथों को समांतर माना गया था। यही स्थिति तब भी पाई जाती है जब हम एक अभिसारी लेंस को झिरियों के बाद रखते हैं तथा परदे को लेंस के फ़ोकस पर रखते हैं। झिरी से समांतर पथ परदे पर एक बिंदु पर मिलते हैं। *ध्यान दें कि किसी समांतर किरण-पुंज में लेंस कोई अतिरिक्त पथांतर उत्पन्न नहीं करता है।* यह व्यवस्था बहुधा उपयोग में लाई जाती है क्योंकि इससे परदे को बहुत दूर रखने की तुलना में अधिक तीव्रता मिलती है। यदि लेंस की फ़ोकस दूरी f है, तब हम सरलता से केंद्रीय दीप्त उच्चिष्ठ का साइज़ ज्ञात कर सकते हैं। कोणों के रूप में, विवर्तन पैटर्न के प्रथम शून्य से केंद्रीय उच्चिष्ठ का अंतराल λ/a है। अतः परदे पर इसका साइज़ $f\lambda/a$ होगा।

10.6.2 एकल झिरी विवर्तन पैटर्न का अवलोकन

एकल झिरी विवर्तन पैटर्न को स्वयं ही देखना आश्चर्यजनक रूप से सरल है। आवश्यक उपकरण अधिकांश घरों में पाया जा सकता है– दो रेज़र ब्लेड तथा एक पारदर्शक काँच का विद्युत बल्ब (किसी सीधे तंतु वाले बल्ब को वरीयता प्रदान करें)। दोनों ब्लेडों को इस प्रकार पकड़ा जाता है कि उनके किनारे समांतर हों और दोनों के बीच एक संकीर्ण झिरी बने। यह सरलता से अँगूठे तथा उँगलियों के द्वारा भी किया जा सकता है (चित्र 10.18)।



चित्र 10.18 एक एकल झिरी निर्मित करने के लिए दो ब्लेडों को पकड़ना। एक बल्ब तंतु जिसे झिरी में से देखा जाता है, स्पष्ट विवर्तन बैंड दर्शाता है।

झिरी को फ़िलामेंट के समांतर रखिए, ठीक आँख के सामने। यदि आप चश्मा पहनते हैं तो उसका उपयोग करें। झिरी की चौड़ाई तथा किनारों की समांतरता के कुछ समायोजन से दीप्त तथा अदीप्त बैंडों के साथ पैटर्न दिखाई देना चाहिए। क्योंकि सभी बैंडों की स्थिति (केंद्रीय बैंड को छोड़कर) तरंगदैर्घ्य पर निर्भर है, वे कुछ रंग दर्शाएँगी। लाल तथा नीले के लिए फ़िल्टर के उपयोग से फ्रिंजें अधिक स्पष्ट हो जाएँगी। यदि दोनों फ़िल्टर उपलब्ध हों तो नीले की तुलना में लाल रंग की फ्रिंजें अधिक चौड़ी देखी जा सकती हैं।

इस प्रयोग में, तंतु प्रथम स्रोत S की भूमिका निभा रहा है (चित्र 10.15)। नेत्र का लेंस परदे (नेत्र के रेटिना) पर पैटर्न को फ़ोकस करता है।

थोड़े प्रयत्न से, एक ब्लेड की सहायता से ऐलुमिनियम की पन्नी में द्विझिरी काटी जा सकती है। बल्ब तंतु को यंग के प्रयोग को दोहराने के लिए पहले की भाँति देखा जा सकता है। दिन के समय में, नेत्र पर एक छोटा कोण बनाने वाला एक दूसरा उपयुक्त दीप्त स्रोत है। यह किसी चमकीले उत्तल पृष्ठ (उदाहरण के लिए एक साइकिल की घंटी) में सूर्य का परावर्तन है। सूर्य-प्रकाश के साथ सीधे ही प्रयोग न करें– यह नेत्र को क्षति पहुँचा सकता है तथा इससे फ्रिंजें भी नहीं मिलेंगी क्योंकि सूर्य $(1/2)^\circ$ का कोण बनाता है।

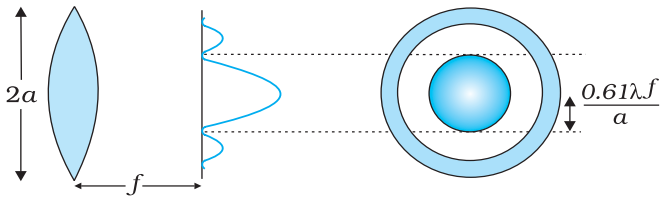
व्यतिकरण तथा विवर्तन में प्रकाश ऊर्जा का पुनर्वितरण होता है। यदि यह अदीप्त फ्रिंज उत्पन्न करते समय एक क्षेत्र में घटती है तो दीप्त फ्रिंज उत्पन्न करते समय दूसरे क्षेत्र में बढ़ती है। ऊर्जा में कोई लाभ अथवा हानि नहीं होती जो ऊर्जा संरक्षण के सिद्धांत के अनुकूल है।

10.6.3 प्रकाशिक यंत्रों की विभेदन क्षमता

अध्याय 9 में हमने दूरदर्शकों के बारे में चर्चा की थी। दूरदर्शी का कोणीय विभेदन इसके अभिदृश्यक से निर्धारित होता है। अभिदृश्यक द्वारा बनाए गए प्रतिबिंब में जो तारे विभेदित नहीं हो पाते वे नेत्रिका द्वारा उत्पन्न आवर्धन द्वारा भी विभेदित नहीं हो सकते। नेत्रिका का प्रारंभिक उद्देश्य, अभिदृश्यक द्वारा उत्पन्न प्रतिबिंब को और अधिक आवर्धित करना है।

एक उत्तल लेंस पर गिरने वाले एक समांतर किरण-पुंज पर विचार करें। यदि लेंस विपथन के लिए पूर्ण रूप से संशोधित है तब ज्यामितीय प्रकाशिकी के अनुसार किरण-पुंज एक बिंदु पर फ़ोकसित होगा। तथापि, विवर्तन के कारण, किरण-पुंज एक बिंदु पर फ़ोकसित होने की बजाय एक परिमित क्षेत्रफल में फ़ोकसित होगा। इस दशा में विवर्तन के प्रभावों को एक समतल तरंग को उत्तल लेंस से पहले रखे वृत्ताकार द्वारक पर आपतित कराकर (चित्र 10.19 देखें) ज्ञात कर सकते हैं। संगत विवर्तन पैटर्न का विश्लेषण पर्याप्त पेचीदा है; तथापि, सिद्धांतत: यह एकल झिरी विवर्तन पैटर्न के विश्लेषण करने के समान है। विवर्तन के प्रभावों को ध्यान में रखते हुए फ़ोकस समतल पर बनने वाले पैटर्न में एक केंद्रीय दीप्त क्षेत्र होगा, जो चारों ओर से अदीप्त तथा दीप्त संकेंद्रित वलयों से घिरा होगा (चित्र 10.19)। विस्तृत विश्लेषण से ज्ञात होता है कि केंद्रीय दीप्त क्षेत्र की त्रिज्या लगभग

$$r_0 \approx \frac{1.22\,\lambda f}{2a} = \frac{0.61\lambda f}{a} \qquad (10.24)$$



चित्र 10.19 उत्तल लेंस पर आपतित प्रकाश का एक समांतर किरण-पुंज। विवर्तन प्रभावों के कारण, किरण-पुंज लगभग $\approx 0.61\,\lambda f/a$ की त्रिज्या के धब्बे के रूप में फ़ोकसित हो जाती है।

होती है। जहाँ पर f लेंस की फ़ोकस दूरी तथा $2a$, वृत्ताकार द्वारक के व्यास अथवा लेंस के व्यास में जो भी कम हो वही है।

उदाहरण के लिए, यदि

$\lambda \approx 0.5\,\mu m$, $f \approx 20\,cm$ तथा $a \approx 5\,cm$

तो हमें प्राप्त होगा

$$r_0 \approx 1.2\,\mu m$$

यद्यपि धब्बे का साइज़ बहुत छोटा है फिर भी यह प्रकाशिक यंत्रों जैसे दूरदर्शक या सूक्ष्मदर्शी की विभेदन सीमा ज्ञात करने में एक महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है। दो तारों को मात्र विभेदित करने के लिए

$$f\Delta\theta \approx r_0 \approx \frac{0.61\lambda f}{a}$$

इससे ज्ञात होता है

$$\Delta\theta \approx \frac{0.61\lambda}{a} \qquad (10.25)$$

अत: यदि अभिदृश्यक का व्यास अधिक है तो $\Delta\theta$ छोटा होगा। इससे पता चलता है कि यदि a का मान अधिक है तो दूरदर्शी की विभेदन क्षमता अधिक होगी। यही कारण है कि अच्छे विभेदन के लिए दूरदर्शक के अभिदृश्यक का व्यास अधिक होना चाहिए।

उदाहरण 10.6

उदाहरण 10.6 मान लीजिए किसी तारे से 6000Å तरंगदैर्घ्य का प्रकाश आ रहा है। किसी दूरदर्शी के विभेदन की सीमा क्या होगी यदि उसके अभिदृश्यक का व्यास 100 इंच है?

हल एक 100 इंच के दूरदर्शक का अर्थ है कि $2a = 100$ इंच $= 254$ cm अत: यदि

$$\lambda \approx 6000\text{Å} = 6\times10^{-5}\,cm$$

तब

$$\Delta\theta \approx \frac{0.61\times 6\times 10^{-5}}{127} \approx 2.9\times10^{-7}\ \text{रेडियन}$$

अपनी आँख की विभेदन क्षमता ज्ञात करें

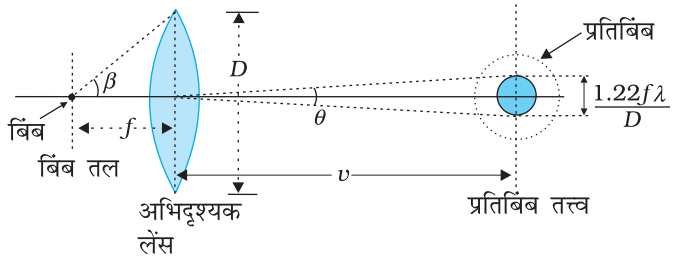
आप अपनी आँख की विभेदन क्षमता का आकलन एक सरल प्रयोग द्वारा कर सकते हैं। समान चौड़ाई की काली पट्टियाँ बनाइए जो सफ़ेद पट्टियों से अलग की गई हों; चित्र देखें। सभी काली पट्टियाँ समान चौड़ाई की होनी चाहिए, जबकि इनके बीच की सफ़ेद पट्टियों की चौड़ाई बाईं से दाईं ओर जाते हुए बढ़नी चाहिए। उदाहरण के लिए, मान लीजिए कि सभी काली पट्टियों की चौड़ाई 0.5 mm है। मान लीजिए कि पहली दो सफ़ेद पट्टियों में प्रत्येक की चौड़ाई 0.5 mm है, अगली दो सफ़ेद पट्टियाँ प्रत्येक 1 mm चौड़ी हैं, इससे अगली दो पट्टियाँ 1.5 mm चौड़ी हैं, आदि। इस पैटर्न को अपने कमरे या प्रयोगशाला की दीवार पर अपनी आँखों की ऊँचाई पर लगा दीजिए।



अब इस पैटर्न को देखिए, बेहतर होगा कि एक आँख से देखें। दीवार से दूर या पास जाकर उस स्थिति को ज्ञात करें, जहाँ से आप दो काली पट्टियों को मात्र अलग-अलग पट्टी के रूप में देख पाएँ। इस पट्टी के बाईं ओर की सभी

काली पट्टियाँ एक-दूसरे में विलय हो जाएँगी तथा विभेद्य नहीं होंगी। दूसरी ओर, इसके दाईं ओर की काली पट्टियाँ और अधिक साफ़-साफ़ दिखाई देंगी। सफ़ेद पट्टी जो दो क्षेत्रों को अलग करती है, की चौड़ाई d नोट कीजिए तथा अपनी आँख से दीवार की दूरी D मापिए। तब d/D आपकी आँख की विभेदन क्षमता होगी।

आपने अपनी खिड़की से आने वाले सूर्य के प्रकाश-पुंज में धूल के कण तैरते देखे होंगे। किसी ऐसे कण की दूरी ज्ञात कीजिए जिसे आप साफ़-साफ़ देख सकें तथा इसके समीप के कण से इसका भेद कर सकें। अपनी आँख का विभेदन तथा कण की दूरी ज्ञात करके धूल के कण के साइज़ का आकलन कीजिए।



चित्र 10.20 एक सूक्ष्मदर्शी के अभिदृश्यक लेंस के द्वारा निर्मित वास्तविक प्रतिबिंब।

हम एक सूक्ष्मदर्शी के अभिदृश्यक लेंस (objective lens) के लिए समान तर्क का उपयोग कर सकते हैं। इस स्थिति में बिंब (वस्तु) को f से थोड़ा अधिक दूर रखा गया है, जिससे कि दूरी v पर वास्तविक प्रतिबिंब बनता है (चित्र 10.20)। आवर्धन – प्रतिबिंब आकार तथा बिंब आकार का अनुपात – $m \approx v/f$ से ज्ञात किया जाता है। चित्र 10.20 से

$$D/f \approx 2 \tan \beta \qquad (10.26)$$

जहाँ 2β सूक्ष्मदर्शी के फ़ोकस पर अभिदृश्यक लेंस के व्यास द्वारा बनाया गया कोण है।

जब किसी सूक्ष्मदर्शीय नमूने में दो बिंदुओं की दूरी, प्रकाश के तरंगदैर्घ्य λ से तुलनीय हो तो विवर्तन प्रभाव महत्वपूर्ण हो जाते हैं। एक बिंदु बिंब का प्रतिबिंब पुनः एक विवर्तन पैटर्न होगा, प्रतिबिंब के समतल में जिसका साइज़

$$v\theta = v\left(\frac{1.22\,\lambda}{D}\right) \qquad (10.27)$$

होगा। दो बिंब जिनके प्रतिबिंब इस दूरी से कम पर होंगे, विभेदित नहीं होंगे, वे एक ही दिखाई देंगे। बिंब तल में संगत न्यूनतम दूरी, $d_{\text{न्यून}}$ होगी

$$d_{\text{न्यून}} = \left[v\left(\frac{1.22\,\lambda}{D}\right)\right] \Big/ m$$

$$= \frac{1.22\lambda}{D} \cdot \frac{v}{m}$$

$$= \frac{1.22\, f\,\lambda}{D} \qquad (10.28)$$

अब समीकरणों (10.26) तथा (10.28) के संयोजन से हमें प्राप्त होगा

$$d_{\text{न्यून}} = \frac{1.22\,\lambda}{2\tan\beta}$$

$$\simeq \frac{1.22\,\lambda}{2\sin\beta} \qquad (10.29)$$

यदि बिंब तथा अभिदृश्यक लेंस के बीच वायु न होकर अपवर्तनांक n का एक माध्यम है तो समीकरण (10.29) संशोधित हो जाती है

$$d_{\text{निम्न}} = \frac{1.22\,\lambda}{2n\sin\beta} \qquad (10.30)$$

गुणनफल $n\sin\beta$ को *संख्यात्मक द्वारक* कहते हैं तथा यह कभी-कभी अभिदृश्यक पर अंकित होता है।

सूक्ष्मदर्शी की विभेदन क्षमता सुस्पष्ट दिखने वाले दो बिंदुओं के बीच की न्यूनतम दूरी के व्युत्क्रम से व्यक्त की जाती है। समीकरण (10.30) से यह देखा जा सकता है कि एक उपयुक्त उच्चतर अपवर्तनांक वाले माध्यम के प्रयोग से विभेदन क्षमता को बढ़ाया जा सकता है। प्रायः एक तेल जिसका अपवर्तनांक लेंस के काँच के अपवर्तनांक के समीप है, का उपयोग किया जाता है। इस व्यवस्था को एक *तैल निमज्जन अभिदृश्यक* कहते हैं। ध्यान दें कि $\sin\beta$ के मान को एक से अधिक करना संभव नहीं है। इस प्रकार, हम यह देखते हैं कि एक सूक्ष्मदर्शी की विभेदन क्षमता मूलतः उपयोग में लाए गए प्रकाश की तरंगदैर्घ्य से निर्धारित होती है।

$z_F \approx a^2/\lambda$

विभेदन तथा आवर्धन के बीच भ्रांति होने की काफ़ी संभावना है, और इसी प्रकार इन प्राचलों (parameters) के व्यवहार में दूरदर्शी तथा सूक्ष्मदर्शी की भूमिका के बीच भी भ्रांति की संभावना है। एक दूरदर्शी, दूर के बिंबों का प्रतिबिंब हमारी आँख के निकट बनाता है। इसलिए जिन बिंबों (objects) का विभेदन बहुत अधिक दूरी पर नहीं किया जा सकता, उन्हें दूरदर्शी द्वारा देखकर विभेदित किया जा सकता है। दूसरी ओर, एक सूक्ष्मदर्शी बिंबों को आवर्धित करता है (जो हमारे समीप होते हैं) तथा उनका बड़ा प्रतिबिंब बनाता है। जब हम किन्हीं दो तारों अथवा किसी दूरस्थ ग्रह के दो उपग्रहों को देख रहे हों या हम किसी जीवित कोशिका के विभिन्न भागों को देख रहे हों, तो हमें यह याद रखना चाहिए कि एक दूरदर्शी विभेदन करता है जबकि एक सूक्ष्मदर्शी आवर्धन करता है।

10.6.4 किरण प्रकाशिकी की वैधता

एक a साइज़ का द्वारक (अर्थात झिरी अथवा छिद्र) किसी समांतर किरण-पुंज द्वारा प्रदीप्त होने पर है, लगभग $\approx \lambda/a$ कोण में प्रकाश विवर्तित करता है। यह दीप्त केंद्रीय उच्चिष्ठ का कोणीय साइज़ है। अतः एक दूरी z, चलने में केवल विवर्तन के कारण ही विवर्तित किरण-पुंज एक चौड़ाई $z\lambda/a$ प्राप्त कर लेगा। यह जानना रोचक होगा कि z के किस मान के लिए विवर्तन द्वारा विस्तारण, द्वारक के साइज़ a के तुल्य होगा। इसके लिए हम $z\lambda/a$ को लगभग a के बराबर मानते हैं। इससे हमें वह दूरी z प्राप्त होती है जिसके आगे a चौड़ाई की किरण-पुंज का अपसरण सार्थक हो जाता है। इसलिए,

$$z \approx a^2/\lambda \qquad (10.31)$$

हम एक राशि z_F जिसे *फ्रेनल दूरी* कहते हैं, को निम्न समीकरण के द्वारा परिभाषित करते हैं

समीकरण (10.31) यह दर्शाती है कि z_F से बहुत कम दूरियों के लिए विवर्तन के कारण विस्तारण, किरण-पुंज के साइज़ की तुलना में छोटा है। जब दूरी लगभग z_F होती है तब यह तुलनीय हो जाता है। z_F से बहुत अधिक दूरियों के लिए, विवर्तन के कारण विस्तारण,

किरण-प्रकाशिकी के कारण विस्तारण की तुलना में (अर्थात द्वारक के आकार a की तुलना में) अधिक प्रभावी हो जाता है। समीकरण (10.31) दर्शाती है कि किरण-प्रकाशिकी तरंगदैर्घ्य के शून्य सीमा की ओर अग्रसर होने में वैध है।

उदाहरण 10.7

उदाहरण 10.7 किस दूरी के लिए किरण-प्रकाशिकी एक अच्छा सन्निकटन है जब द्वारक 3 mm चौड़ा है तथा तरंगदैर्घ्य 500 nm है?

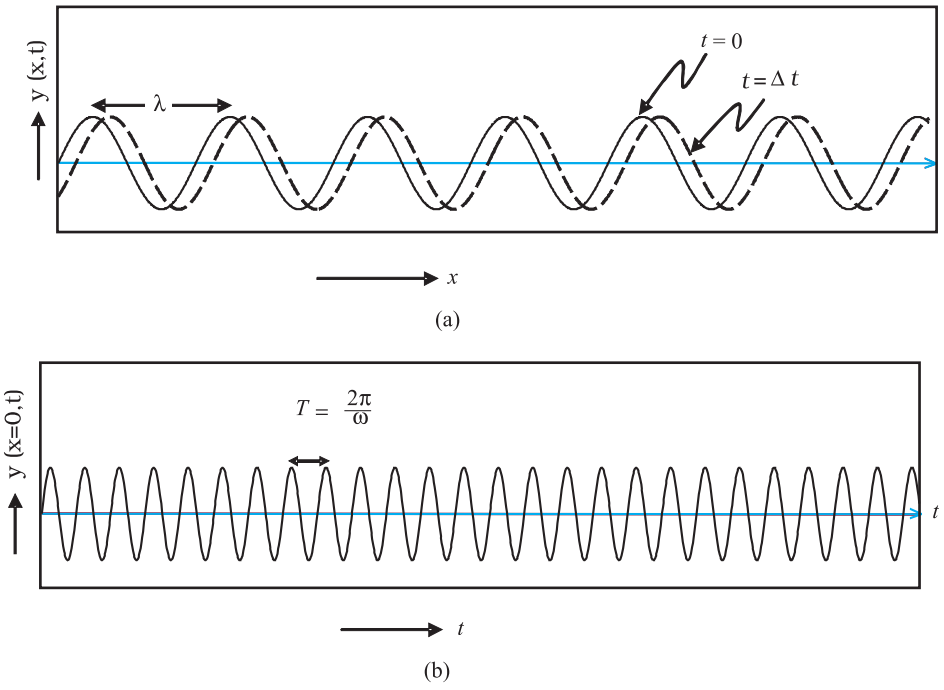
हल

यह उदाहरण प्रदर्शित करता है कि एक लघु द्वारक के लिए भी, विवर्तन विस्तारण कई मीटर लंबी किरणों के लिए उपेक्षित किया जा सकता है। इस प्रकार किरण-प्रकाशिकी कई सामान्य परिस्थितियों में वैध है।

10.7 ध्रुवण

एक लंबी डोरी पर विचार कीजिए जिसे क्षैतिज रखकर पकड़ा गया है और इसका दूसरा सिरा स्थिर माना गया है। यदि हम डोरी के सिरे को ऊपर-नीचे आवर्ती रूप से गति कराएँ तो एक तरंग उत्पन्न कर पाएँगे जो $+x$ दिशा में संचारित होगी (चित्र 10.21)। ऐसी तरंग को समीकरण (10.32) द्वारा व्यक्त किया जा सकता है।

$$y(x,t) = a \sin(kx - \omega t) \qquad (10.32)$$



चित्र 10.21 (a) वक्र किसी डोरी का क्रमशः $t = 0$ तथा $t = \Delta t$ पर विस्थापन निरूपित करते हैं, जब एक ज्यावक्रीय तरंग $+x$ दिशा में संचरित होती है। (b) वक्र विस्थापन $x = 0$ के समय-विचरण को निरूपित करता है, जबकि एक ज्यावक्रीय तरंग $+x$ दिशा में संचरित हो रही है। $x = \Delta x$ पर विस्थापन का समय-विचरण थोड़ा-सा दाईं ओर विस्थापित हो जाएगा।

जहाँ a तथा $\omega (= 2\pi\nu)$ क्रमशः तरंग का आयाम तथा कोणीय आवृत्ति निरूपित करते हैं। इसके अतिरिक्त,

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \tag{10.33}$$

तरंग से संबद्ध तरंगदैर्घ्य को निरूपित करता है। इस प्रकार की तरंगों के संचरण की चर्चा हम कक्षा 11 की पाठ्यपुस्तक के अध्याय 15 में कर चुके हैं। क्योंकि विस्थापन (जो y दिशा के अनुदिश है) तरंग संचरण की दिशा के लंबवत है, हमें *अनुप्रस्थ तरंगें* प्राप्त होती हैं। साथ ही, क्योंकि विस्थापन y दिशा में है, इसीलिए इसे प्रायः y-ध्रुवित तरंग कहा जाता है। क्योंकि डोरी का प्रत्येक बिंदु एक सरल रेखा में गति करता है, तरंग को रैखिकतः ध्रुवित तरंग कहा जाता है। इसके अतिरिक्त, डोरी सदैव x-y तल में ही सीमित रहती है, इसीलिए इसे *समतल ध्रुवित तरंग* भी कहा जाता है।

इसी प्रकार हम x-z तल में z-ध्रुवित तरंग उत्पन्न करके किसी डोरी के कंपन पर विचार कर सकते हैं, जिसका विस्थापन प्राप्त होगा

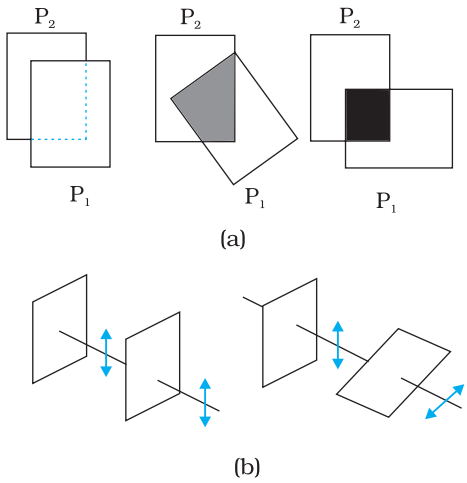
$$z(x,t) = a \sin(kx - \omega t) \tag{10.34}$$

यह बतलाना आवश्यक है कि [समीकरणों (10.33) तथा (10.34) से वर्णित] सभी रैखिकतः ध्रुवित तरंगें अनुप्रस्थ तरंगें होती हैं; अर्थात डोरी के प्रत्येक बिंदु का विस्थापन सदैव तरंग संचरण की दिशा के लंबवत होता है। अंततः, यदि डोरी के कंपन के तल को अत्यंत अल्प अंतराल में यादृच्छिकतः बदला जाए तो हमें *अध्रुवित तरंग* प्राप्त होगी। इस प्रकार एक अध्रुवित तरंग के लिए विस्थापन, समय के साथ, यादृच्छिकतः बदलता रहता है, यद्यपि यह सदैव तरंग संचरण की दिशा के लंबवत रहता है।

प्रकाश की तरंगों की प्रकृति अनुप्रस्थ होती है; अर्थात संचरित हो रही प्रकाश तरंग से संबद्ध विद्युत क्षेत्र सदैव तरंग संचरण की दिशा के लंबवत होता है। इसे एक सरल पोलेरॉइड का उपयोग करके सरलता से प्रदर्शित किया जा सकता है। आपने पतली प्लास्टिक जैसी शीटें देखी होंगी जिन्हें *पोलेरॉइड* कहते हैं। पोलेरॉइड में अणुओं की एक लंबी शृंखला होती है जो एक विशेष दिशा में पंक्तिबद्ध होते हैं। पंक्तिबद्ध अणुओं की दिशा के अनुदिश विद्युत सदिश (संचरित होती प्रकाश तरंगों से संबद्ध) अवशोषित हो जाता है। इस प्रकार यदि कोई अध्रुवित प्रकाश तरंग ऐसे पोलेरॉइड पर आपतित होती तो प्रकाश तरंग रेखीय ध्रुवित हो जाती है, जिसमें विद्युत सदिश पंक्तिबद्ध अणुओं की लंबवत दिशा के अनुदिश दोलन करता है, इस दिशा को पोलेरॉइड की *पारित–अक्ष* (pass-axis) कहते हैं।

इस प्रकार, जब किसी साधारण स्रोत (जैसे एक सोडियम लैंप) का प्रकाश पोलेरॉइड की किसी शीट P_1 से पारित होता है तो यह देखा जाता है कि इसकी तीव्रता आधी हो जाती है। P_1 को घुमाने पर पारगत किरण–पुंज पर कोई प्रभाव नहीं पड़ता क्योंकि पारगमित तीव्रता स्थिर रहती है। अब हम एक समरूप पोलेरॉइड P_2 को P_1 से पहले रखते हैं। अपेक्षानुसार, लैंप से आने वाले प्रकाश की तीव्रता केवल P_2 से ही पारित होने में कम हो जाएगी। परंतु अब P_1 के घुमाने का P_2 से आने वाले प्रकाश पर एक नाटकीय प्रभाव पड़ेगा। एक स्थिति में P_2 से पारगमित तीव्रता P_1 से

पारित होने पर लगभग शून्य हो जाती है। जब इस स्थिति से P_1 को 90° पर घुमाते हैं तो यह P_2 से आने वाली लगभग पूर्ण तीव्रता को पारगमित कर देता है (चित्र 10.22)।



चित्र 10.22 (a) दो पोलेरॉइड P_2 तथा P_1 से होकर प्रकाश का पारगमन। पारगमित अंश 1 से 0 तक गिरता है, जब उनके बीच का कोण 0° से 90° तक परिवर्तित होता है। ध्यान रखें कि प्रकाश जब एक ही पोलेरॉइड P_1 से देखा जाता है तब वह कोण के साथ परिवर्तित नहीं होता। (b) जब प्रकाश दो पोलेरॉइडों से पारित होता है तो विद्युत सदिश का व्यवहार पारगमित ध्रुवण पोलेरॉइड अक्ष के समांतर घटक है। द्विबाणाग्र विद्युत सदिश के दोलन को दर्शाते हैं।

उपरोक्त प्रयोग को यह मानकर आसानी से समझा जा सकता है कि पोलेरॉइड P_2 से पारगमित प्रकाश का P_2 की पारित अक्ष (pass-axis) के अनुदिश ध्रुवण हो जाता है। यदि P_2 की पारित अक्ष, P_1 की पारित अक्ष से θ कोण बनाती है, तब जबकि ध्रुवित प्रकाश-पुंज पोलोरॉइड P_1 से पारगमित होती है, तो P_1 से घटक $E\cos\theta$ (P_1 की पारित अक्ष के अनुदिश) पारित होगा। इस प्रकार जब हम पोलेरॉइड P_1 (या पोलेरॉइड P_2) को घुमाते हैं तो तीव्रता निम्न प्रकार बदलेगी :

$$I = I_0 \cos^2\theta \qquad (10.35)$$

यहाँ I_0, P_1 से गुज़रने के पश्चात ध्रुवित प्रकाश की तीव्रता है। इसे मेलस का नियम (Malus' Law) कहते हैं। उपरोक्त विवेचन दर्शाता है कि एक पोलेरॉइड से आने वाले प्रकाश की तीव्रता, आपतित तीव्रता की आधी है। दूसरा पोलेरॉइड रखकर तथा दोनों पोलेरॉइडों की पारित-अक्षों के बीच के कोण को समायोजित करके तीव्रता को आपतित तीव्रता के 50% से शून्य तक नियंत्रित कर सकते हैं।

पोलेरॉइडों को धूप के चश्मों, खिड़की के शीशों आदि में तीव्रता नियंत्रित करने में उपयोग किया जा सकता है। पोलेरॉइडों का उपयोग फ़ोटोग्राफ़ी कैमरों तथा 3D (त्रिआयामी) चलचित्र कैमरों में भी किया जाता है।

उदाहरण 10.8

उदाहरण 10.8 जब दो क्रॉसित पोलेरॉइडों के बीच में पॉलराइड की एक तीसरी शीट को घुमाया जाता है तो पारगमित प्रकाश की तीव्रता में होने वाले परिवर्तन की विवेचना कीजिए।

हल माना कि प्रथम पोलेराइड P_1 से गुज़रने के बाद ध्रुवित प्रकाश की तीव्रता I_a है। तब दूसरे पोलेराइड P_2 से गुज़रने के बाद प्रकाश की तीव्रता होगी,

$I = I_0\cos^2\theta$,

उदाहरण 10.8

जहाँ कोण θ, P_1 एवं P_2 की पारित-अक्षों के बीच बना कोण है। क्योंकि P_1 एवं P_3 क्रॉसित हैं उनके पारित-अक्षों के बीच कोण $(\pi/2-\theta)$ होगा। अत: P_3 से निर्गमित होने वाले प्रकाश की तीव्रता होगी,

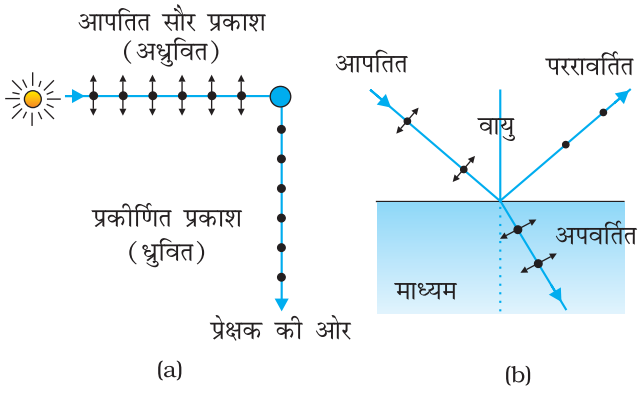
$$I = I_0 \cos^2\theta \cos^2\left(\frac{\pi}{2}-\theta\right)$$

$$= I_0 \cos^2\theta \sin^2\theta = (I_0/4) \sin^2 2\theta$$

अत:, कोण $\theta = \pi/4$ के लिए पारगमित प्रकाश की तीव्रता अधिकतम होगी।

10.7.1 प्रकीर्णन के द्वारा ध्रुवण

आकाश के एक साफ़ नीले भाग से आने वाले प्रकाश को जब एक घूमते हुए पोलेरॉइड में से होकर देखा जाता है तो तीव्रता बढ़ती तथा घटती हुई दिखाई देती है। यह और कुछ नहीं बल्कि सूर्य से आने वाला वह प्रकाश है जिसने पृथ्वी के वायुमंडल के अणुओं से टकराकर (प्रकीर्णन के कारण) अपनी दिशा बदल दी है। आपतित सूर्य का प्रकाश अध्रुवित है [चित्र 10.23(a)]। बिंदुओं के द्वारा चित्र के तल के लंबवत ध्रुवण को दर्शाया गया है। द्विशीर्ष बाण चित्र के तल में ध्रुवण को दर्शाते हैं। (अध्रुवित प्रकाश में इन दोनों में कोई कला-संबंध नहीं है।) आपतित तरंग के विद्युत क्षेत्र के प्रभाव में अणुओं में इलेक्ट्रॉन इन दोनों दिशाओं में गति ग्रहण कर लेते हैं। हमने सूर्य की दिशा के 90° पर देखते हुए एक प्रेक्षक को दर्शाया है। स्पष्टत: आवेश जो द्विशीर्ष बाणों के समांतर त्वरित हैं, इस प्रेक्षक की दिशा में ऊर्जा विकिरित नहीं करते क्योंकि उनके त्वरण का कोई अनुप्रस्थ घटक नहीं है। अणु के द्वारा प्रकीर्णित विकिरण को इसीलिए बिंदुओं से प्रस्तुत किया गया है। यह चित्र-तल के लंबवत ध्रुवित है। इससे आकाश से प्रकीर्णित प्रकाश के ध्रुवण की व्याख्या होती है।

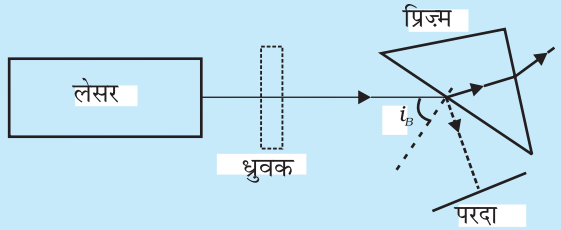


चित्र 10.23 (a) आकाश से नीले प्रकीर्णित प्रकाश का ध्रुवण। सूर्य से आने वाला प्रकाश अध्रुवित है (बिंदु तथा बाण)। एक प्रतीकात्मक अणु दिखाया गया है। यह 90° से कागज़ के तल के लंबवत ध्रुवित प्रकाश (केवल बिंदुओं) को प्रकीर्णित करता है। (b) प्रकाश का ध्रुवण जो पारदर्शी माध्यम से ब्रूस्टर कोण पर परावर्तित है (परावर्तित किरण अपवर्तित किरण के लंबवत)।

अणुओं के द्वारा प्रकाश के प्रकीर्णन का गहन अध्ययन सी.वी. रमन तथा उनके सहयोगियों के द्वारा कोलकाता में 1920 के दशक में किया गया था। रमन को सन् 1930 में इस कार्य के लिए भौतिकी के नोबेल पुरस्कार से सम्मानित किया गया था।

पूर्ण पारगमन की एक विशेष दशा

जब प्रकाश दो माध्यमों के अंतरापृष्ठ पर आपतित होता है तो यह देखा गया है कि इसका कुछ भाग परावर्तित हो जाता है तथा कुछ भाग पारगमित हो जाता है। इसी से संबंधित एक प्रश्न पर विचार करें : क्या यह संभव है कि किसी दशा में किसी सतह पर आपतित होने वाला एकवर्णीय प्रकाश का एक किरण-पुंज (सतह सामान्यत: परावर्ती है) पूर्ण रूप से पारगमित हो जाए तथा कोई परावर्तन न हो? आपको आश्चर्य होगा कि इस प्रश्न का उत्तर "हाँ" है।



आइए, एक साधारण प्रयोग करें तथा जाँच करें कि क्या होता है। एक लेसर, एक अच्छा ध्रुवक (polarizer), एक प्रिज़्म तथा एक परदा दर्शाए गए चित्र की भाँति व्यवस्थित करें।

लेसर स्रोत से उत्सर्जित प्रकाश को ध्रुवक से पारित होने के पश्चात प्रिज़्म की सतह पर ब्रूस्टर कोण i_B से आपतित होने दें। अब ध्रुवक को सावधानीपूर्वक घुमाएँ। आप देखेंगे कि ध्रुवक के एक विशेष संरेखन (alignment) के लिए प्रिज़्म पर आपतित होने वाला प्रकाश पूर्ण रूप से पारगमित हो जाता है तथा प्रिज़्म के पृष्ठ से कोई प्रकाश परावर्तित नहीं होता। परावर्तित धब्बा पूरी तरह अदृश्य हो जाता है।

10.7.2 परावर्तन के द्वारा ध्रुवण

चित्र 10.23 (b) एक पारदर्शी माध्यम जैसे जल से परावर्तित प्रकाश को दर्शाता है। पहले की भाँति बिंदु तथा बाण संकेत करते हैं कि आपतित तथा परावर्तित तरंगों में दोनों ही ध्रुवण मौजूद हैं। हमने एक ऐसी स्थिति प्रस्तुत की है जिसमें परावर्तित किरण, अपवर्तित किरण के समकोण पर चलती है। जल में दोलनकारी इलेक्ट्रॉन परावर्तित तरंग उत्पन्न करते हैं। यह माध्यम तरंग के विकिरण, अर्थात *अपवर्तित तरंग* के अनुप्रस्थ दो दिशाओं में चलते हैं। बाण *परावर्तित* तरंग की दिशा के समांतर हैं। इस दिशा में गति परावर्तित तरंग को कोई योगदान नहीं देती। इसलिए, जैसा कि चित्र दर्शाता है, परावर्तित प्रकाश चित्र-तल के लंबवत रेखीय ध्रुवित है (बिंदुओं के द्वारा दिखाए गए)। इसकी जाँच परावर्तित प्रकाश को किसी विश्लेषक में से होकर आने वाले प्रकाश को देखकर की जा सकती है। जब विश्लेषक का अक्ष, चित्र-तल में (अर्थात आपतन तल में) होगा तो पारगमित तीव्रता शून्य होगी।

दो पारदर्शी माध्यमों की सीमा पर जब कोई अध्रुवित प्रकाश आपतित होता है, तब यदि अपवर्तित तथा परावर्तित किरणें एक-दूसरे के बीच समकोण बनाती हों, तो परावर्तित प्रकाश पूर्णत: ध्रुवित होता है तथा इसका विद्युत सदिश आपतन तल के लंबवत होता है। इस प्रकार हमने देखा कि जब परावर्तित तरंग अपवर्तित तरंग पर लंबवत है तो परावर्तित तरंग एक पूर्ण ध्रुवित तरंग है। इस अवस्था में आपतन कोण को *ब्रूस्टर कोण* कहते हैं तथा इसे i_B से निरूपित करते हैं। हम देख सकते हैं कि i_B सघन माध्यम के अपवर्तनांक से संबंधित है। क्योंकि $i_B + r = \pi/2$ है, हमें स्नैल के नियम से प्राप्त होगा

$$\mu = \frac{\sin i_B}{\sin r} = \frac{\sin i_B}{\sin(\pi/2 - i_B)}$$

$$= \frac{\sin i_B}{\cos i_B} = \tan i_B \qquad (10.36)$$

इसे *ब्रूस्टर का नियम* कहते हैं।

उदाहरण 10.9 एक समतल काँच के पृष्ठ पर अध्रुवित प्रकाश आपतित होता है। आपतन कोण कितना होना चाहिए जिससे कि परावर्तित या अपवर्तित किरणें एक-दूसरे पर लंबवत हों।

हल $i + r, \pi/2$ के बराबर होने के लिए, $\tan i_B = \mu = 1.5$ होना चाहिए। इससे $i_B = 57°$ प्राप्त होता है। यह वायु से काँच के अंतरापृष्ठ पर ब्रूस्टर कोण है।

उदाहरण 10.9

सरलता के लिए, हमने 90° पर प्रकाश के प्रकीर्णन तथा ब्रूस्टर कोण पर परावर्तन का विवेचन किया है। इस विशिष्ट परिस्थिति में, विद्युत क्षेत्र के दो लंबवत घटकों में से एक शून्य हो जाता है। अन्य कोणों पर, दोनों ही घटक विद्यमान होते हैं परंतु एक घटक दूसरे घटक से प्रबल होता है। दोनों लंबवत घटकों में कोई स्थिर कला संबंध नहीं होता है क्योंकि ये एक अध्रुवित किरण-पुंज के दो लंबवत घटकों से उत्पन्न होते हैं। जब ऐसे प्रकाश को किसी घूर्णित विश्लेषक में से देखा जाता है तो तीव्रता का उच्चिष्ठ तथा निम्निष्ठ दिखाई देता है, परंतु पूर्ण अदीप्त नहीं हो पाता। इस प्रकार के प्रकाश को *आंशिक ध्रुवित प्रकाश* कहते हैं।

आइए, इस स्थिति को समझने का प्रयत्न करें। जब दो माध्यमों के अंतरापृष्ठ पर एक अध्रुवित प्रकाश का किरण-पुंज ब्रूस्टर कोण पर आपतित होता है, प्रकाश का केवल एक भाग, जिसका विद्युत क्षेत्र सदिश आपतन तल के लंबवत है, परावर्तित होगा। अब यदि एक अच्छे ध्रुवक (Polarizer) का उपयोग करके, आपतन तल के लंबवत प्रकाश के विद्युत सदिश को पूर्णतया पृथक कर दें तथा इस प्रकाश को ब्रूस्टर कोण पर प्रिज़्म के पृष्ठ पर आपतित कराएँ, तब आप परावर्तन बिलकुल नहीं देख पाएँगे तथा प्रकाश का पूर्ण परागमन होगा।

इस अध्याय को हमने यह संकेत करते हुए प्रारंभ किया कि कुछ परिघटनाएँ ऐसी हैं जिनकी व्याख्या केवल तरंग सिद्धांत द्वारा की जा सकती है। उचित रूप से समझने के लिए हमने पहले परावर्तन तथा अपवर्तन जैसी परिघटनाओं का, जिनका हम किरण प्रकाशिकी के आधार पर अध्याय 9 में अध्ययन कर चुके थे, वर्णन किया तथा देखा कि इन्हें तरंग प्रकाशिकी के आधार पर भी समझा जा सकता है। फिर हमने यंग के द्विझिरी प्रयोग का वर्णन किया जो कि प्रकाशिकी के अध्ययन का एक मोड़ था। अंत में हमने कुछ संबंधित विषयों जैसे विवर्तन, विभेदन, ध्रुवण तथा किरण प्रकाशिकी की वैधता का वर्णन किया। अगले अध्याय में आप देखेंगे कि शताब्दी के समाप्त होते-होते लगभग 1900 ई. में किस प्रकार नए प्रयोगों ने नए सिद्धांतों को जन्म दिया।

सारांश

1. हाइगेंस का सिद्धांत बतलाता है कि किसी तरंगाग्र का प्रत्येक बिंदु द्वितीयक तरंगों का स्रोत होता है, जो जुड़कर कुछ समय पश्चात एक तरंगाग्र बनाते हैं।
2. हाइगेंस की रचना हमें यह बतलाती है कि नया तरंगाग्र द्वितीयक तरंगों का अग्र आवरण है। जब प्रकाश की चाल दिशा पर निर्भर नहीं करती हो तो द्वितीयक तरंगें गोलीय होती हैं। किरणें तब दोनों तरंगाग्रों के लंबवत होती हैं तथा यात्रा काल किसी भी किरण की दिशा में समान होता है। इस सिद्धांत से परावर्तन तथा अपवर्तन के सुज्ञात नियम प्राप्त होते हैं।

3. जब दो अथवा दो से अधिक प्रकाश स्रोत एक ही बिंदु को प्रदीप्त करते हैं तो तरंगों के अध्यारोपण का सिद्धांत लागू होता है। जब हम एक बिंदु पर इन स्रोतों द्वारा प्रकाश की तीव्रता का विचार करते हैं तो विशिष्ट तीव्रताओं के योग के अतिरिक्त एक व्यतिकरण पद प्राप्त होता है। परंतु यह पद तभी महत्वपूर्ण होता है जबकि इसका औसत शून्य नहीं है, जो केवल तभी होता है जबकि स्रोतों की आवृत्तियाँ समान हों तथा इनके बीच एक स्थिर कलांतर हो।
4. पृथकता d वाली टॉमस यंग की द्विझिरी से समान अंतराल की फ्रिंजें प्राप्त होती हैं जिनकी कोणीय पृथकता λ/d होती है। स्रोत, झिरियों का मध्यबिंदु तथा केंद्रीय दीप्त फ्रिंज एक सीधी रेखा में होते हैं। एक बड़े आकार का स्रोत जो झिरियों पर λ/d से अधिक कोण बनाता है, फ्रिंजों को विलुप्त कर देगा।
5. चौड़ाई a की एक एकल झिरी एक विवर्तन पैटर्न देती है जिसमें एक केंद्रीय उच्चिष्ठ होता है। तीव्रता $\pm\lambda/a$, $\pm 2\lambda/a$, आदि कोणों पर शून्य होती है तथा इनके बीच में उत्तरोत्तर क्षीण होते द्वितीयक उच्चिष्ठ होते हैं। विवर्तन किसी दूरदर्शी के कोणीय विभेदन को λ/D तक परिसीमित कर देता है, जहाँ D द्वारक का व्यास है। दो तारें जिनके बीच की दूरी इससे कम होगी प्रबलत: अतिव्यापी प्रतिबिंब बनाएँगे। इसी प्रकार, एक सूक्ष्मदर्शी अभिदृश्यक जो n अपवर्तनांक के माध्यम में फ़ोकस बिंदु पर कोण 2β बनाता है, दो वस्तुओं जिनके बीच की दूरी $\lambda/(2n \sin \beta)$ है, को ठीक-ठीक पृथक करेगा, जोकि सूक्ष्मदर्शी की विभेदन सीमा है। विवर्तन प्रकाश किरणों की संकल्पना की सीमा निर्धारित करता है। इससे पहले कि विवर्तन के कारण प्रकाश प्रसरित होना प्रारंभ करे चौड़ाई a का एक किरण-पुंज एक दूरी a^2/λ चलता है जो *फ्रेनेल दूरी* कहलाती है।
6. प्राकृतिक प्रकाश, जैसे सूर्य से प्राप्त प्रकाश, अध्रुवित होता है। इसका अर्थ यह हुआ कि अनुप्रस्थ तल में विद्युत सदिश मापन के समय, द्रुतत: तथा यादृच्छिकत: सभी संभव दिशाओं में हो सकता है। पोलेरॉइड केवल एक घटक (एक विशिष्ट अक्ष के समांतर) को पारगमित करता है। परिणामी प्रकाश को रेखीय ध्रुवित अथवा समतल ध्रुवित कहते हैं। जब इस प्रकार के प्रकाश को एक दूसरे पोलेरॉइड में से देखते हैं, जिसका अक्ष 2π से घूमता है तो तीव्रता के दो उच्चिष्ठ तथा निम्निष्ठ दिखलाई देते हैं। ध्रुवित प्रकाश एक विशिष्ट कोण (जिसे ब्रूस्टर कोण कहते हैं) पर परावर्तन के द्वारा तथा पृथ्वी के वायुमंडल में $\pi/2$ के प्रकीर्णन द्वारा भी उत्पन्न किया जा सकता है।

विचारणीय विषय

1. एक बिंदु स्रोत से तरंगें सभी दिशाओं में प्रसरित होती हैं, जबकि प्रकाश को संकीर्ण किरणों के रूप में चलते हुए देखा गया था। तरंग सिद्धांत से प्रकाश के व्यवहार के सभी पक्षों के विश्लेषण को समझने के लिए हाइगेंस, यंग तथा फ्रेनेल के प्रयोगों तथा अंतर्दृष्टि की आवश्यकता हुई।
2. तरंगों का महत्वपूर्ण तथा नया स्वरूप भिन्न स्रोतों के आयामों का व्यतिकरण है, जो यंग के प्रयोग में दर्शाए अनुसार संपोषी तथा विनाशी दोनों हो सकता है।
3. एकल झिरी पर पड़ने वाली तरंग को एक बड़ी संख्या में स्रोतों की बनी हुई मान सकते हैं, जो अग्र दिशा में ($\theta = 0$) संपोषी व्यतिकरण दिखाती है तथा दूसरी दिशाओं में विनाशी व्यतिकरण।
4. विवर्तन परिघटना से किरण प्रकाशिकी की परिसीमा परिभाषित होती है। दो बहुत निकटस्थ वस्तुओं के विभेदन के लिए सूक्ष्मदर्शियों तथा दूरदर्शियों की सक्षमता की सीमाएँ भी प्रकाश की तरंगदैर्ध्य द्वारा निर्धारित होती हैं।
5. अधिकांश व्यतिकरण तथा विवर्तन प्रभाव अनुदैर्ध्य तरंगों, जैसे वायु में ध्वनि के लिए भी होते हैं। परंतु ध्रुवण परिघटना केवल अनुप्रस्थ तरंगों, जैसे प्रकाश तरंगों की, विशिष्टता है।

अभ्यास

10.1 589 nm तरंगदैर्घ्य का एकवर्णीय प्रकाश वायु से जल की सतह पर आपतित होता है। (a) परावर्तित तथा (b) अपवर्तित प्रकाश की तरंगदैर्घ्य, आवृत्ति तथा चाल क्या होगी? जल का आवर्तनांक 1.33 है।

10.2 निम्नलिखित दशाओं में प्रत्येक तरंगाग्र की आकृति क्या है?

(a) किसी बिंदु स्रोत से अपसरित प्रकाश।

(b) उत्तल लेंस से निर्गमित प्रकाश, जिसके फ़ोकस बिंदु पर कोई बिंदु स्रोत रखा है।

(c) किसी दूरस्थ तारे से आने वाले प्रकाश तरंगाग्र का पृथ्वी द्वारा अवरोधित (intercepted) भाग।

10.3 (a) काँच का अपवर्तनांक 1.5 है। काँच में प्रकाश की चाल क्या होगी? (निर्वात में प्रकाश की चाल 3.0×10^8 m s^{-1} है।)

(b) क्या काँच में प्रकाश की चाल, प्रकाश के रंग पर निर्भर करती है? यदि हाँ, तो लाल तथा बैंगनी में से कौन-सा रंग काँच के प्रिज़्म में धीमा चलता है?

10.4 यंग के द्विझिरी प्रयोग में झिरियों के बीच की दूरी 0.28 mm है तथा परदा 1.4 m की दूरी पर रखा गया है। केंद्रीय दीप्त फ्रिंज एवं चतुर्थ दीप्त फ्रिंज के बीच की दूरी 1.2 cm मापी गई है। प्रयोग में उपयोग किए गए प्रकाश की तरंगदैर्घ्य ज्ञात कीजिए।

10.5 यंग के द्विझिरी प्रयोग में, λ तरंगदैर्घ्य का एकवर्णीय प्रकाश उपयोग करने पर, परदे के एक बिंदु पर जहाँ पथांतर λ है, प्रकाश की तीव्रता K इकाई है। उस बिंदु पर प्रकाश की तीव्रता कितनी होगी जहाँ पथांतर $\lambda/3$ है?

10.6 यंग के द्विझिरी प्रयोग में व्यतिकरण फ्रिंजों को प्राप्त करने के लिए, 650 nm तथा 520 nm तरंगदैर्घ्यों के प्रकाश-पुंज का उपयोग किया गया।

(a) 650 nm तरंगदैर्घ्य के लिए परदे पर तीसरे दीप्त फ्रिंज की केंद्रीय उच्चिष्ठ से दूरी ज्ञात कीजिए।

(b) केंद्रीय उच्चिष्ट से उस न्यूनतम दूरी को ज्ञात कीजिए जहाँ दोनों तरंगदैर्घ्यों के कारण दीप्त फ्रिंज संपाती (coincide) होते हैं।

10.7 एक द्विझिरी प्रयोग में एक मीटर दूर रखे परदे पर एक फ्रिंज की कोणीय चौड़ाई 0.2° पाई गई। उपयोग किए गए प्रकाश की तरंगदैर्घ्य 600 nm है। यदि पूरा प्रायोगिक उपकरण जल में डुबो दिया जाए तो फ्रिंज की कोणीय चौड़ाई क्या होगी? जल का अपवर्तनांक 4/3 लीजिए।

10.8 वायु से काँच में संक्रमण (transition) के लिए ब्रूस्टर कोण क्या है? (काँच का अपवर्तनांक = 1.5)।

10.9 5000 Å तरंगदैर्घ्य का प्रकाश एक समतल परावर्तक सतह पर आपतित होता है। परावर्तित प्रकाश की तरंगदैर्घ्य एवं आवृत्ति क्या है? आपतन कोण के किस मान के लिए परावर्तित किरण आपतित किरण के लंबवत होगी?

10.10 उस दूरी का आकलन कीजिए जिसके लिए किसी 4 mm के आकार के द्वारक तथा 400 nm तरंगदैर्घ्य के प्रकाश के लिए किरण प्रकाशिकी सन्निकट रूप से लागू होती है।

अतिरिक्त अभ्यास

10.11 एक तारे में हाइड्रोजन से उत्सर्जित 6563 Å की H_α लाइन में 15 Å का अभिरक्त-विस्थापन (red-shift) होता है। पृथ्वी से दूर जा रहे तारे की चाल का आकलन कीजिए।

10.12 किसी माध्यम (जैसे जल) में प्रकाश की चाल निर्वात में प्रकाश की चाल से अधिक है। न्यूटन के कणिका सिद्धांत द्वारा इस आशय की भविष्यवाणी कैसे की गई। क्या जल में प्रकाश की चाल प्रयोग द्वारा ज्ञात करके इस भविष्यवाणी की पुष्टि हुई? यदि नहीं, तो प्रकाश के चित्रण का कौन-सा विकल्प प्रयोगानुकूल है।

10.13 आप मूल पाठ में जान चुके हैं कि हाइगेंस का सिद्धांत परावर्तन और अपवर्तन के नियमों के लिए किस प्रकार मार्गदर्शक है। इसी सिद्धांत का उपयोग करके प्रत्यक्ष रीति से निगमन (deduce) कीजिए कि समतल दर्पण के सामने रखी किसी वस्तु का प्रतिबिंब आभासी बनता है, जिसकी दर्पण से दूरी, बिंब से दर्पण की दूरी के बराबर होती है।

10.14 तरंग संचरण की चाल को प्रभावित कर सकने वाले कुछ संभावित कारकों की सूची है :

(i) स्रोत की प्रकृति,

(ii) संचरण की दिशा,

(iii) स्रोत और/या प्रेक्षक की गति,

(iv) तरंगदैर्घ्य, तथा

(v) तरंग की तीव्रता।

बताइए कि–

(a) निर्वात में प्रकाश की चाल,

(b) किसी माध्यम (माना काँच या जल) में प्रकाश की चाल इनमें से किन कारकों पर निर्भर करती है?

10.15 ध्वनि तरंगों में आवृत्ति विस्थापन के लिए डॉप्लर का सूत्र निम्नलिखित दो स्थितियों में थोड़ा-सा भिन्न है : (i) स्रोत विरामावस्था में तथा प्रेक्षक गति में हो, तथा (ii) स्रोत गति में परंतु प्रेक्षक विरामावस्था में हो। जबकि प्रकाश के लिए डॉप्लर के सूत्र निश्चित रूप से निर्वात में, इन दोनों स्थितियों में एकसमान हैं। ऐसा क्यों है? स्पष्ट कीजिए। क्या आप समझते हैं कि ये सूत्र किसी माध्यम में प्रकाश गमन के लिए भी दोनों स्थितियों में पूर्णतः एकसमान होंगे?

10.16 द्विझिरी प्रयोग में, 600 nm तरंगदैर्घ्य का प्रकाश करने पर, एक दूरस्थ परदे पर बने फ्रिंज की कोणीय चौड़ाई 0.1° है। दोनों झिरियों के बीच कितनी दूरी है?

10.17 निम्नलिखित प्रश्नों के उत्तर दीजिए :

(a) एकल झिरी विवर्तन प्रयोग में, झिरी की चौड़ाई मूल चौड़ाई से दोगुनी कर दी गई है। यह केंद्रीय विवर्तन बैंड के साइज़ तथा तीव्रता को कैसे प्रभावित करेगी?

(b) द्विझिरी प्रयोग में, प्रत्येक झिरी का विवर्तन, व्यतिकरण पैटर्न से किस प्रकार संबंधित है?

(c) सुदूर स्रोत से आने वाले प्रकाश के मार्ग में जब एक लघु वृत्ताकार वस्तु रखी जाती है तो वस्तु की छाया के मध्य एक प्रदीप्त बिंदु दिखाई देता है। स्पष्ट कीजिए क्यों?

(d) दो विद्यार्थी एक 10 m ऊँची कक्ष विभाजक दीवार द्वारा 7 m के अंतर पर हैं। यदि ध्वनि और प्रकाश दोनों प्रकार की तरंगें वस्तु के किनारों पर मुड़ सकती हैं तो फिर भी वे विद्यार्थी एक-दूसरे को देख नहीं पाते यद्यपि वे आपस में आसानी से वार्तालाप किस प्रकार कर पाते हैं?

(e) किरण प्रकाशिकी, प्रकाश के सीधी रेखा में गति करने की संकल्पना पर आधारित है। विवर्तन प्रभाव (जब प्रकाश का संचरण एक द्वारक/झिरी या वस्तु के चारों ओर प्रेक्षित किया जाए) इस संकल्पना को नकारता है। तथापि किरण प्रकाशिकी की संकल्पना प्रकाशकीय यंत्रों में प्रतिबिंबों की स्थिति तथा उनके दूसरे अनेक गुणों को समझने के लिए सामान्यत: उपयोग में लाई जाती है। इसका क्या औचित्य है?

10.18 दो पहाड़ियों की चोटी पर दो मीनारें एक-दूसरे से 40 km की दूरी पर हैं। इनको जोड़ने वाली रेखा मध्य में आने वाली किसी पहाड़ी के 50 m ऊपर से होकर गुज़रती है। उन रेडियो तरंगों की अधिकतम तरंगदैर्घ्य ज्ञात कीजिए, जो मीनारों के मध्य बिना पर्याप्त विवर्तन प्रभाव के भेजी जा सकें।

10.19 500 nm तरंगदैर्घ्य का एक समांतर प्रकाश-पुंज एक पतली झिरी पर गिरता है तथा 1 m दूर परदे पर परिणामी विवर्तन पैटर्न देखा जाता है। यह देखा गया कि पहला निम्निष्ठ परदे के केंद्र से 2.5 mm दूरी पर है। झिरी की चौड़ाई ज्ञात कीजिए।

10.20 निम्नलिखित प्रश्नों के उत्तर दीजिए :

(a) जब कम ऊँचाई पर उड़ने वाला वायुयान ऊपर से गुज़रता है तो हम कभी-कभी टेलीविज़न के परदे पर चित्र को हिलते हुए पाते हैं। एक संभावित स्पष्टीकरण सुझाइए।

(b) जैसा कि आप मूल पाठ में जान चुके हैं कि विवर्तन तथा व्यतिकरण पैटर्न में तीव्रता का वितरण समझने का आधारभूत सिद्धांत तरंगों का रेखीय प्रत्यारोपण है। इस सिद्धांत की तर्कसंगति क्या है?

10.21 एकल झिरी विवर्तन पैटर्न की व्युत्पत्ति में कथित है कि $n\lambda/a$ कोणों पर तीव्रता शून्य है। इस निरसन (cancillation) को, झिरी को उपयुक्त भागों में बाँटकर सत्यापित कीजिए।

अध्याय 11

विकिरण तथा द्रव्य की द्वैत प्रकृति

11.1 भूमिका

सन् 1887 में वैद्युतचुंबकीय किरणों की उत्पत्ति एवं संसूचना पर विद्युत चुंबकत्व के मैक्सवेल समीकरण तथा हर्ट्ज़ के प्रयोगों ने प्रकाश की तरंगीय प्रकृति को अभूतपूर्व रूप से स्थापित किया। उन्नीसवीं शताब्दी के अंतिम चरण में विसर्जन-नलिका में गैसों में कम दाब पर विद्युत-चालन (विद्युत-विसर्जन) पर प्रायोगिक अन्वेषणों से कई ऐतिहासिक खोजें हुईं। रूंटगेन के द्वारा 1895 में X-किरणों की खोज तथा जे. जे. टॉमसन के द्वारा 1897 में की गई इलेक्ट्रॉन की खोज परमाणु-संरचना को समझने में मील का पत्थर थीं। लगभग 0.001 mm पारे के स्तंभ के अत्यंत कम दाब पर यह पाया गया कि ऐसे दो इलेक्ट्रोडों के बीच, जिनके द्वारा विसर्जन-नलिका में गैस पर विद्युत क्षेत्र स्थापित किया जाता है, एक विसर्जन होता है। कैथोड के सम्मुख काँच पर प्रतिदीप्त उत्पन्न होती है। दीप्त का रंग काँच की प्रकृति पर निर्भर करता है, जैसे–सोडा-काँच के लिए पीत-हरा रंग का। इस प्रतिदीप्ति का कारण उस विकिरण को माना गया जो कैथोड से आ रहा था। ये *कैथोड किरणें* 1870 में विलियम क्रुक्स के द्वारा खोजी गई थीं, जिसने बाद में 1879 में यह सुझाया कि ये किरणें तीव्रता से चलने वाली ऋण-आवेशी कणों की धारा से बनी हैं। ब्रिटिश भौतिक शास्त्री जे.जे. टॉमसन (1856 – 1940) ने इस परिकल्पना की पुष्टि की। जे.जे. टॉमसन ने पहली बार विसर्जन-नलिका के आर-पार परस्पर लंबवत विद्युत एवं चुंबकीय क्षेत्रों को स्थापित कर प्रायोगिक तौर पर कैथोड-किरण कणों के वेग तथा आपेक्षिक आवेश [अर्थात आवेश और द्रव्यमान का अनुपात (e/m)] ज्ञात किया। यह पाया गया कि ये कण प्रकाश के वेग (3×10^8 m/s) के

लगभग 0.1 से लेकर 0.2 गुने वेग से चलते हैं। वर्तमान में e/m का स्वीकृत मान 1.76×10^{11} C/kg है। यह भी पाया गया कि e/m का मान कैथोड (उत्सर्जक) के पदार्थ अथवा धातु या विसर्जन-नलिका में भरी गैस की प्रकृति पर निर्भर नहीं करता। इस प्रेक्षण ने कैथोड-किरण कणों की सार्विकता को सुझाया।

लगभग उसी समय, 1887 में, यह पाया गया कि जब कुछ निश्चित धातुओं को पराबैंगनी प्रकाश द्वारा किरणित करते हैं तो कम वेग वाले ऋण-आवेशित कण उत्सर्जित होते हैं। इसी प्रकार, जब कुछ निश्चित धातुओं को उच्च ताप तक गरम किया जाता है तो ये ऋण-आवेशित कण उत्सर्जित करते हैं। इन कणों के लिए e/m का मान उतना ही पाया गया जितना कि कैथोड किरण कणों का था। इस प्रकार इन प्रेक्षणों ने यह स्थापित कर दिया कि ये सभी कण, यद्यपि भिन्न दशाओं में उत्पन्न हुए थे, प्रकृति में समान थे। जे.जे. टॉमसन ने, 1897 में, इन कणों को *इलेक्ट्रॉन* नाम दिया और सुझाया कि ये द्रव्य के मौलिक सार्वत्रिक अवयव हैं। गैसों में विद्युत के संवहन पर उनके सैद्धांतिक तथा प्रायोगिक प्रेक्षणों के द्वारा इलेक्ट्रॉन की इस युगांतकारी खोज के लिए उन्हें 1906 में नोबेल पुरस्कार प्रदान किया गया। 1913 में अमेरिकी भौतिकविज्ञानी आर.ए. मिलिकन (1868–1953) ने इलेक्ट्रॉन पर आवेश के परिशुद्ध मापन के लिए तेल-बूँद का पथ प्रदर्शक प्रयोग किया। उन्होंने यह पाया कि तेल-बिंदुक पर आवेश सदैव एक मूल आवेश, 1.602×10^{-19} C का पूर्ण गुणांक है। मिलिकन के प्रयोग ने यह प्रस्थापित कर दिया कि *वैद्युतआवेश क्वांटीकृत* है। आवेश (e) तथा आपेक्षित आवेश (e/m) के मान से, इलेक्ट्रॉन का द्रव्यमान (m) ज्ञात किया जा सका।

11.2 इलेक्ट्रॉन उत्सर्जन

हम जानते हैं कि धातुओं में मुक्त इलेक्ट्रॉन (ऋण आवेशित कण) होते हैं जो उनकी चालकता के लिए उत्तरदायी होते हैं। तथापि, मुक्त इलेक्ट्रॉन सामान्यत: धातु-पृष्ठ से बाहर नहीं निकल सकते। यदि इलेक्ट्रॉन धातु से बाहर आते हैं तो इसका पृष्ठ धन आवेश प्राप्त कर लेता है और इलेक्ट्रॉनों को वापस धातु पर आकर्षित कर लेता है। इस प्रकार मुक्त इलेक्ट्रॉन धातु के भीतर आयनों के आकर्षण बलों के द्वारा रोककर रखे गए होते हैं। परिणामस्वरूप सिर्फ़ वे इलेक्ट्रॉन जिसकी ऊर्जा इस आकर्षण को अभिभूत कर सके, धातु पृष्ठ से बाहर आ पाते हैं। अत: इलेक्ट्रॉनों को धातु पृष्ठ से बाहर निकालने के लिए एक निश्चित न्यूनतम ऊर्जा की आवश्यकता होती है। इस न्यूनतम ऊर्जा को धातु का *कार्य-फलन* कहते हैं। इसे साधारणतया ϕ_0 के द्वारा व्यक्त करते हैं और eV (इलेक्ट्रॉन वोल्ट) में मापते हैं। एक इलेक्ट्रॉन वोल्ट किसी इलेक्ट्रॉन को 1 वोल्ट विभवांतर के द्वारा त्वरित कराने पर प्राप्त ऊर्जा का मान है। अत: $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19}$ J

साधारणतया ऊर्जा की इस इकाई का प्रयोग परमाणु तथा नाभिकीय भौतिकी में किया जाता है। कार्य-फलन (ϕ_0) धातु के गुणों और इसके पृष्ठ की प्रकृति पर निर्भर करता है। कुछ धातुओं के कार्य-फलन के मान सारणी 11.1 में दिए गए हैं। ये मान अनुमानित हैं क्योंकि इनके मान पृष्ठीय अपद्रव्यों पर बहुत अधिक निर्भर करते हैं।

सारणी 11.1 से यह ध्यान किया जा सकता है कि प्लैटिनम का कार्य-फलन उच्चतम ($\phi_0 = 5.65$ eV) है जबकि सीज़ियम का न्यूनतम ($\phi_0 = 2.14$ eV) है।

धातु के पृष्ठ से इलेक्ट्रॉन उत्सर्जन के लिए मुक्त इलेक्ट्रॉनों को न्यूनतम आवश्यक ऊर्जा निम्न किसी भी एक भौतिक विधि के द्वारा दी जा सकती है :

(i) *तापायनिक उत्सर्जन :* उपयुक्त तापन के द्वारा मुक्त इलेक्ट्रॉनों को पर्याप्त तापीय ऊर्जा दी जा सकती है जिससे कि वे धातु से बाहर आ सकें।

सारणी 11.1 कुछ धातुओं के कार्य-फलन

धातु	कार्य-फलन ϕ_0 (eV)	धातु	कार्य-फलन ϕ_0 (eV)
Cs	2.14	Al	4.28
K	2.30	Hg	4.49
Na	2.75	Cu	4.65
Ca	3.20	Ag	4.70
Mo	4.17	Ni	5.15
Pb	4.25	Pt	5.65

(ii) *क्षेत्र उत्सर्जन :* किसी धातु पर लगाया गया एक प्रबल विद्युत क्षेत्र (10^8 V m^{-1} की कोटि का) इलेक्ट्रॉनों को धातु-पृष्ठ के बाहर ला सकता है, जैसा कि किसी स्पार्क प्लग में।

(iii) *प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन :* उपयुक्त आवृत्ति का प्रकाश जब किसी धातु-पृष्ठ पर पड़ता है तो इलेक्ट्रॉनों का उत्सर्जन होता है। ये प्रकाशजनित इलेक्ट्रॉन *प्रकाशिक इलेक्ट्रॉन* (photo-electron) कहलाते हैं।

11.3 प्रकाश-विद्युत प्रभाव

11.3.1 हर्ट्ज़ के परीक्षण

प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन की परिघटना की खोज हेनरिच हर्ट्ज़ (1857-1894) के द्वारा 1887 में वैद्युतचुंबकीय तरंगों के प्रयोगों के समय की गई थी। स्फुलिंग-विसर्जन (spark discharge) के द्वारा वैद्युतचुंबकीय तरंगों की उत्पत्ति के अपने प्रायोगिक अन्वेषण में हर्ट्ज़ ने यह प्रेक्षित किया कि कैथोड को किसी आर्क लैंप से पराबैंगनी प्रकाश के द्वारा प्रदीप्त करने पर धातु-इलेक्ट्रोडों के पार उच्च वोल्टता स्फुलिंग अधिक हो जाता है।

धातु-पृष्ठ पर चमकने वाला प्रकाश मुक्त आवेशित कणों जिन्हें अब हम इलेक्ट्रॉन कहते हैं, को स्वतंत्र करने में सहायता प्रदान करता है। जब धातु-पृष्ठ पर प्रकाश पड़ता है तो पृष्ठ के समीप इलेक्ट्रॉन आपतित विकिरण से पदार्थ के पृष्ठ में धनात्मक आयनों के आकर्षण को पार करने के लिए ऊर्जा अवशोषित कर लेते हैं। आपतित प्रकाश से आवश्यक ऊर्जा प्राप्त करने के पश्चात, इलेक्ट्रॉन धातु-पृष्ठ से बाहर परिवेश में आ जाते हैं।

11.3.2 हालवॉक्स तथा लीनार्ड के प्रेक्षण

विलहेल्म हालवॉक्स तथा फिलिप लीनार्ड ने 1886-1902 के बीच प्रकाशविद्युत उत्सर्जन की परिघटना का अन्वेषण किया।

दो इलेक्ट्रोडों (धातु पट्टिकाओं) वाली किसी निर्वातित काँच की नली में उत्सर्जक पट्टिका पर पराबैंगनी विकिरणों को आपतित करने पर लीनार्ड (1862-1947) ने पाया कि परिपथ में धारा प्रवाह होता है (चित्र 11.1)। जैसे ही पराबैंगनी विकिरणों को रोका गया, वैसे ही धारा प्रवाह भी रुक गया। इन परीक्षणों से ज्ञात होता है कि जब पराबैंगनी विकिरण उत्सर्जक पट्टिका C पर आपतित

होते हैं, इलेक्ट्रॉन पट्टिका से बाहर आ जाते हैं तथा विद्युत क्षेत्र द्वारा धनात्मक संग्राहक पट्टिका A की ओर आकर्षित हो जाते हैं। निर्वातित काँच की नली में इलेक्ट्रॉनों के प्रवाह के कारण धाराप्रवाह होती है। इस प्रकार से, उत्सर्जक के पृष्ठ पर प्रकाश पड़ने के कारण बाह्य परिपथ में धाराप्रवाह होती है। हालवॉक्स तथा लीनार्ड ने संग्राहक पट्टिका के विभव, आपतित प्रकाश की आवृत्ति तथा तीव्रता के साथ प्रकाश धारा में परिवर्तन का अध्ययन किया।

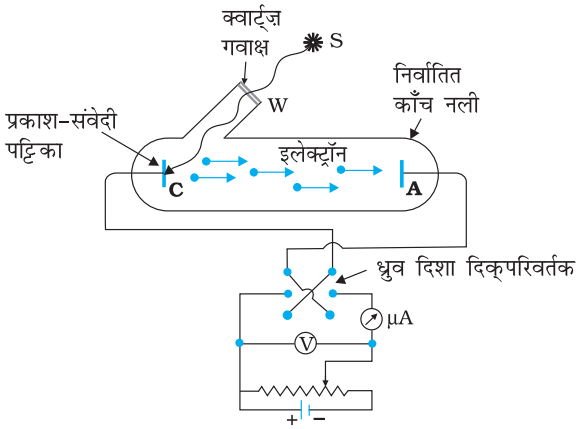
हालवॉक्स ने 1888 में इस अध्ययन को आगे बढ़ाया और एक ऋणावेशित जिंक पट्टिका को एक विद्युतदर्शी से जोड़ दिया। उसने प्रेक्षित किया कि जब पट्टिका को पराबैंगनी प्रकाश से किरणित किया गया तो इसने अपना आवेश खो दिया। इसके अतिरिक्त जब एक अनावेशित जिंक पट्टिका को पराबैंगनी प्रकाश से किरणित किया गया तो यह धनावेशित हो गई। जिंक पट्टिका को पराबैंगनी प्रकाश से पुनः किरणित करने पर, इस पट्टिका पर धनआवेश और अधिक हो गया। इन प्रेक्षणों से उसने यह निष्कर्ष निकाला कि पराबैंगनी प्रकाश के प्रभाव से जिंक पट्टिका से ऋणावेशित कण उत्सर्जित होते हैं।

1897 में इलेक्ट्रॉन की खोज के पश्चात यह निश्चित हो गया कि उत्सर्जक पट्टिका से इलेक्ट्रॉनों के उत्सर्जन का कारक आपतित प्रकाश है। ऋण आवेश के कारण उत्सर्जित इलेक्ट्रॉन विद्युत क्षेत्र द्वारा संग्राहक पट्टिका की ओर धकेले जाते हैं। हालवॉक्स तथा लीनार्ड ने यह भी प्रेक्षित किया कि जब उत्सर्जक पट्टिका पर एक नियत न्यूनतम मान से कम आवृत्ति का पराबैंगनी प्रकाश पड़ता है तो कोई भी इलेक्ट्रॉन उत्सर्जित नहीं होता। इस नियत न्यूनतम आवृत्ति को *देहली आवृत्ति* (threshold frequency) कहते हैं तथा इसका मान उत्सर्जक पट्टिका के पदार्थ की प्रकृति पर निर्भर करता है।

यह पाया गया कि जिंक, कैडमियम, मैग्नीशियम जैसी कुछ धातुओं में यह प्रभाव केवल कम तरंगदैर्घ्य की पराबैंगनी तरंगों के लिए होता है। तथापि लीथियम, सोडियम, पोटेशियम, सीजियम तथा रूबीडियम जैसी क्षार धातुएँ दृश्य प्रकाश के द्वारा भी यह प्रभाव दर्शाती हैं। जब इन *प्रकाश-संवेदी पदार्थों* को प्रकाश से प्रदीप्त किया जाता है तो ये इलेक्ट्रॉन उत्सर्जित करते हैं। इलेक्ट्रॉन की खोज के पश्चात् इन इलेक्ट्रॉनों को *प्रकाशिक इलेक्ट्रॉन* नाम दिया गया। यह परिघटना *प्रकाश-विद्युत प्रभाव* कहलाती है।

11.4 प्रकाश-विद्युत प्रभाव का प्रायोगिक अध्ययन

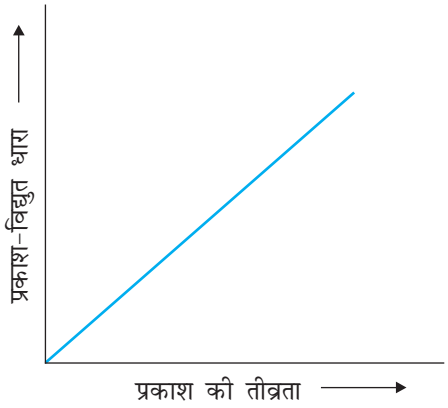
चित्र 11.1 में प्रकाश-विद्युत प्रभाव के प्रायोगिक अध्ययन के लिए उपयोग में लाई गई व्यवस्था को दर्शाया गया है। इसमें एक निर्वातित काँच/क्वार्टज़ की नली है जिसमें एक प्रकाश-संवेदी पट्टिका C और दूसरी धातु पट्टिका A है। स्रोत S से प्रकाश, गवाक्ष (window) W से पार होता है और प्रकाश-संवेदी पट्टिका (उत्सर्जक) C पर पड़ता है। पारदर्शी क्वार्ट्ज़ गवाक्ष (काँच-नली पर मुद्रित) से पराबैंगनी विकिरण पार हो जाता है और प्रकाश-संवेदी पट्टिका C को किरणित करता है। पट्टिका C से इलेक्ट्रॉन उत्सर्जित होते हैं जो पट्टिका A (संग्राहक) पर बैटरी द्वारा उत्पन्न विद्युत क्षेत्र द्वारा एकत्र कर लिए जाते हैं। C तथा A पट्टिकाओं के बीच विभवांतर को बैटरी द्वारा बनाए रखा जाता है तथा इसे परिवर्तित किया जा सकता है। प्लेट C तथा A के ध्रुव दिशा दिक्परिवर्तक (Commutator) के द्वारा बदले जा सकते हैं। इस प्रकार उत्सर्जक पट्टिका C की तुलना में पट्टिका A को इच्छानुसार धन अथवा ऋण विभव पर रखा जा सकता है। जब संग्राहक पट्टिका A, उत्सर्जक पट्टिका C की तुलना में धनात्मक होगी तब इलेक्ट्रॉन इसकी ओर आकर्षित होंगे। इलेक्ट्रॉनों के उत्सर्जन के कारण विद्युत परिपथ में एक प्रवाह उत्पन्न होता है जिससे परिपथ में एक विद्युत धारा स्थापित हो जाती है।



चित्र 11.1 प्रकाश-विद्युत प्रभाव के अध्ययन के लिए प्रायोगिक व्यवस्था।

इलेक्ट्रोडों के बीच के विभवांतर को एक वोल्टमीटर के द्वारा और परिणामस्वरूप परिपथ में प्रवाहित होने वाली प्रकाशिक धारा को माइक्रोऐमीटर के द्वारा मापते हैं। प्रकाशिक विद्युत धारा को संग्राहक पट्टिका A का विभव उत्सर्जक पट्टिका C के सापेक्ष परिवर्तित करके बढ़ाया अथवा घटाया जा सकता है। आपतित प्रकाश की तीव्रता तथा आवृत्ति को भी परिवर्तित किया जा सकता है जैसे कि उत्सर्जक C और संग्राहक A के बीच विभवांतर V को परिवर्तित किया जाता है।

हम चित्र 11.1 की प्रायोगिक व्यवस्था का उपयोग प्रकाशिक धारा के (a) विकिरण की तीव्रता, (b) आपतित विकिरण की आवृत्ति, (c) पट्टिकाओं A तथा C के बीच के विभवांतर, तथा (d) पट्टिका C के पदार्थ की प्रकृति के साथ परिवर्तन के अध्ययन के लिए कर सकते हैं। उत्सर्जक C पर पड़ने वाले प्रकाश के मार्ग में उपयुक्त फिल्टर अथवा रंगीन काँच रखकर भिन्न तरंगदैर्घ्य के प्रकाश का उपयोग कर सकते हैं। प्रकाश स्रोत की उत्सर्जक से दूरी को बदलते हुए प्रकाश की तीव्रता को परिवर्तित किया जा सकता है।



चित्र 11.2 प्रकाश-विद्युत धारा और प्रकाश की तीव्रता के बीच ग्राफ।

11.4.1 प्रकाश-विद्युत धारा पर प्रकाश की तीव्रता का प्रभाव

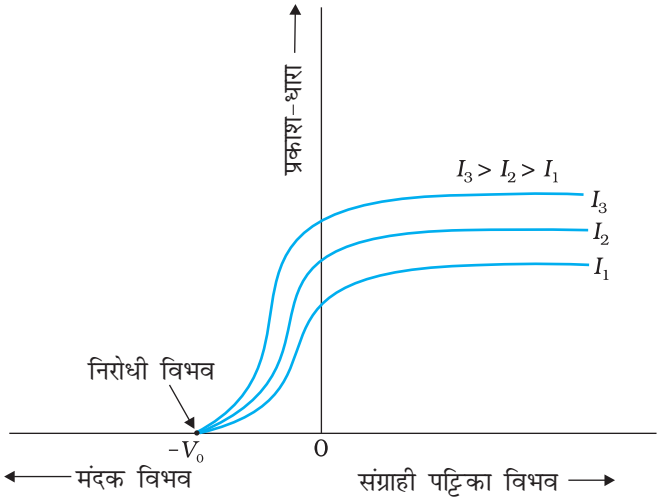
संग्राहक A को उत्सर्जक C की तुलना में एक धन विभव पर रखा जाता है जिससे C से उत्सर्जित इलेक्ट्रॉन संग्राहक A की ओर आकर्षित होते हैं। आपतित विकिरण की आवृत्ति तथा त्वरक विभव को स्थिर रखते हुए, प्रकाश की तीव्रता को परिवर्तित किया जाता है और परिणामी प्रकाश-विद्युत धारा को प्रत्येक बार मापा जाता है। यह पाया जाता है कि प्रकाशिक धारा आपतित प्रकाश की तीव्रता के साथ रैखिकतः बढ़ती है जैसा कि चित्र 11.2 में ग्राफीय रूप में दर्शाया गया है। प्रकाशिक धारा उत्सर्जित होने वाले प्रति सेकंड इलेक्ट्रॉनों की संख्या के अनुक्रमानुपाती है, अतः *उत्सर्जित होने वाले प्रति सेकंड प्रकाशिक इलेक्ट्रॉनों की संख्या आपतित विकिरण की तीव्रता के समानुपाती है।*

11.4.2 प्रकाश-विद्युत धारा पर विभव का प्रभाव

हम पहले पट्टिका A को पट्टिका C की तुलना में किसी धन त्वरक विभव पर रखते हैं और पट्टिका C को निश्चित आवृत्ति ν तथा निश्चित तीव्रता I_1 के प्रकाश से प्रदीप्त करते हैं। फिर हम पट्टिका A के धन विभव को धीरे-धीरे परिवर्तित करते हैं और प्रत्येक बार परिणामी प्रकाश-विद्युत धारा को मापते हैं। यह पाया जाता है कि प्रकाश-विद्युत धारा त्वरक (धन) विभव के साथ बढ़ती है। पट्टिका A के एक निश्चित धन विभव के लिए एक ऐसी स्थिति आ जाती है जिस पर सभी उत्सर्जित इलेक्ट्रॉन पट्टिका A पर संग्रहीत हो जाते हैं तथा प्रकाश-विद्युत धारा उच्चतम हो जाती है अर्थात संतृप्त हो जाती है। यदि हम विद्युत पट्टिका A के त्वरक विभव को और अधिक बढ़ाते हैं तो प्रकाश-विद्युत धारा नहीं बढ़ती। प्रकाश-विद्युत धारा के इस उच्चतम मान को *संतृप्त धारा* कहते हैं। संतृप्त धारा उस स्थिति के संगत है जब उत्सर्जक पट्टिका C के द्वारा उत्सर्जित सभी प्रकाशिक इलेक्ट्रॉन संग्राहक पट्टिका A पर पहुँच जाते हैं।

अब हम पट्टिका A पर पट्टिका C की तुलना में एक ऋण (मंदक) विभव लगाते हैं और इसे

धीरे-धीरे अधिक ऋणात्मक करते जाते हैं। जब पट्टिकाओं की ध्रुवता बदली जाती है तो इलेक्ट्रॉन प्रतिकर्षित होते हैं तथा केवल कुछ अति ऊर्जा वाले इलेक्ट्रॉन ही संग्राहक A तक पहुँच पाते हैं। यह पाया गया कि प्रकाशिक-धारा तेज़ी से कम होती जाती है जब तक कि यह पट्टिका A पर ऋण विभव V_0 के किसी निश्चित तीक्ष्ण और स्पष्ट क्रांतिक मान पर शून्य नहीं हो जाती। आपतित विकिरण की एक निश्चित आवृत्ति के लिए पट्टिका A पर दिया गया *निम्नतम ऋण (मंदक) विभव V_0 जिस पर प्रकाशिक-धारा शून्य हो जाती है, अंतक* (Cut-off) *अथवा निरोधी विभव* (Stopping potential) *कहलाता है।*



चित्र 11.3 आपतित विकिरण की विभिन्न तीव्रताओं के लिए प्रकाशिक-धारा तथा पट्टिका विभव के बीच आलेख।

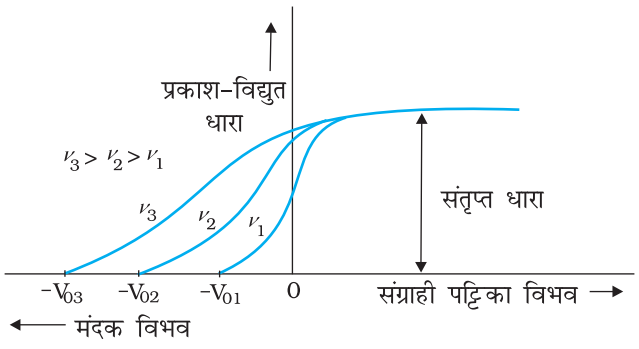
प्रकाशिक इलेक्ट्रॉन के द्वारा प्रेक्षण की व्याख्या सीधी है। धातु से उत्सर्जित सभी प्रकाशिक इलेक्ट्रॉन समान ऊर्जा वाले नहीं होते। प्रकाश-विद्युत धारा तब शून्य होती है जब निरोधी विभव अधिकतम ऊर्जा वाले प्रकाशिक इलेक्ट्रॉनों, जिनकी उच्चतम गतिज ऊर्जा ($K_{\text{उच्च}}$) है, को प्रतिकर्षित करने की अवस्था में हो। अर्थात

$$K_{\text{उच्च}} = e\,V_0 \qquad (11.1)$$

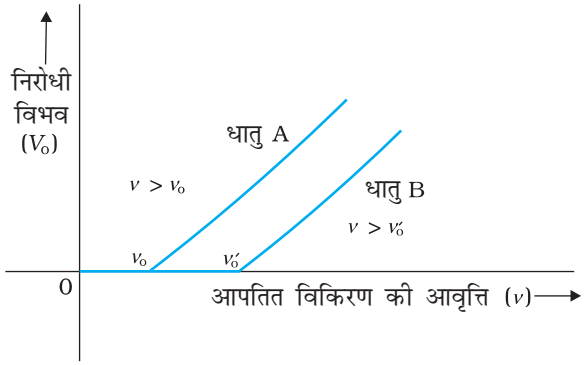
अब हम इस प्रयोग को आपतित विकिरण की एकसमान आवृत्ति परंतु उच्च तीव्रता I_2 तथा I_3 ($I_3 > I_2 > I_1$) के लिए दोहरा सकते हैं। हम यह नोट करते हैं कि अब संतृप्त धाराओं के मान बढ़ जाते हैं। इससे ज्ञात होता है कि आपतित विकिरण की तीव्रता के अनुपात में प्रति सेकंड अधिक इलेक्ट्रॉन उत्सर्जित होते हैं। परंतु निरोधी विभव उतना ही रहता है जितना कि I_1 तीव्रता के आपतित विकिरण के लिए होता है, जैसा कि चित्र 11.3 में ग्राफ के द्वारा दर्शाया गया है। इस प्रकार, *आपतित विकिरण की एक निश्चित आवृत्ति के लिए निरोधी विभव इसकी तीव्रता से स्वतंत्र होता है।* दूसरे शब्दों में, प्रकाशिक इलेक्ट्रॉन की उच्चतम गतिज ऊर्जा, आपतित विकिरण की तीव्रता पर निर्भर नहीं करती है।

11.4.3 निरोधी विभव पर आपतित विकिरण की आवृत्ति का प्रभाव

अब हम आपतित विकिरण की आवृत्ति ν और निरोधी विभव V_0 के मध्य संबंध का अध्ययन करेंगे। हम प्रकाश विकिरण की विभिन्न आवृत्तियों पर उपयुक्त प्रकार से एक ही तीव्रता को समायोजित करते हैं और संग्राही पट्टिका विभव के साथ प्रकाश-विद्युत धारा के परिवर्तन का अध्ययन करते हैं। परिणामी परिवर्तन को चित्र 11.4 में दर्शाया गया है। हमें आपतित विकिरण की भिन्न आवृत्तियों के लिए निरोधी विभव के भिन्न मान परंतु संतृप्त धारा का एक ही मान प्राप्त होता है। उत्सर्जित इलेक्ट्रॉनों की ऊर्जा आपतित विकिरणों की आवृत्ति पर निर्भर है। आपतित विकिरण की उच्चतर आवृत्ति के लिए निरोधी विभव का मान अधिक ऋणात्मक होता है। चित्र 11.4 से यह ज्ञात होता है कि यदि आवृत्तियाँ $\nu_3 > \nu_2 > \nu_1$ के क्रम में हों



चित्र 11.4 आपतित विकिरण की विभिन्न आवृत्तियों के लिए पट्टिका विभव तथा प्रकाश-विद्युत धारा के बीच आलेख।



चित्र 11.5 एक दिए हुए प्रकाश संवेदी पदार्थ के लिए आपतित विकिरण की आवृत्ति ν के साथ निरोधी विभव V_0 का परिवर्तन।

तो निरोधी विभवों का क्रम $V_{03} > V_{02} > V_{01}$ होता है। इसमें यह अंतर्निहित है कि आपतित प्रकाश की आवृत्ति जितनी अधिक होगी, प्रकाशिक इलेक्ट्रॉनों की उच्चतम गतिज ऊर्जा उतनी ही अधिक होगी। फलस्वरूप, इन्हें पूर्ण रूप से रोकने के लिए अधिक निरोधी विभव की आवश्यकता होगी। यदि हम भिन्न धातुओं के लिए आपतित विकिरण की आवृत्ति और संबंधित निरोधी विभव के बीच ग्राफ़ खीचें तो हमें एक सीधी रेखा प्राप्त होती है जैसा कि चित्र 11.5 में दर्शाया गया है।

ग्राफ़ यह दर्शाता है कि

(i) निरोधी विभव V_0 एक दिए हुए प्रकाश-संवेदी पदार्थ के लिए, आपतित विकिरण की आवृत्ति के साथ रैखिकत: परिवर्तित होता है।

(ii) एक निश्चित निम्नतम अंतक आवृत्ति ν_0 होती है जिसके लिए निरोधी विभव शून्य होता है।

इन प्रेक्षणों में दो तथ्य अंतर्निहित हैं :

(i) *प्रकाशिक इलेक्ट्रॉनों की उच्चतम गतिज ऊर्जा आपतित विकिरण की आवृत्ति के साथ रैखिकत: परिवर्तित होती है जबकि यह इसकी तीव्रता पर निर्भर नहीं होती।*

(ii) *आपतित विकिरण की आवृत्ति ν के लिए, जबकि इसका मान अंतक आवृत्ति ν_0 से कम है, कोई प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन संभव नहीं है (तीव्रता अधिक होने की स्थिति में भी)।*

इस न्यूनतम अंतक आवृत्ति ν_0 को *देहली आवृत्ति* कहते हैं। यह भिन्न धातुओं के लिए भिन्न होती है।

भिन्न प्रकाश-संवेदी पदार्थ प्रकाश के लिए विभिन्न अनुक्रियाएँ दर्शाते हैं। सेलिनियम, जिंक अथवा कॉपर की तुलना में अधिक संवेदी है। एक ही प्रकाश-संवेदी पदार्थ विभिन्न तरंगदैर्घ्य के प्रकाश के लिए भिन्न अनुक्रिया दर्शाता है। उदाहरण के लिए, कॉपर में पराबैंगनी प्रकाश से प्रकाश-विद्युत प्रभाव होता है जबकि हरे अथवा लाल रंग के प्रकाश से यह प्रभाव नहीं होता।

ध्यान दें कि ऊपर के सभी प्रयोगों में यह पाया गया है कि यदि आपतित विकिरण की आवृत्ति देहली आवृत्ति से अधिक हो जाती है तो बिना किसी काल-पश्चता के तत्काल प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन प्रारंभ हो जाता है, तब भी जब आपतित विकिरण बहुत मंद हो। अब यह ज्ञात है कि 10^{-9}s की कोटि के या इससे कम समय में उत्सर्जन प्रारंभ हो जाता है।

अब हम इस अनुभाग में वर्णन किए गए प्रायोगिक लक्षणों एवं प्रेक्षणों का यहाँ सारांश देंगे :

(i) किसी दिए गए प्रकाश-संवेदी पदार्थ और आपतित विकिरण की आवृत्ति (देहली आवृत्ति से अधिक) के लिए, प्रकाश-विद्युत धारा आपतित प्रकाश की तीव्रता के अनुक्रमानुपाती होती है (चित्र 11.2)।

(ii) किसी दिए गए प्रकाश-संवेदी पदार्थ और आपतित विकिरण की आवृत्ति के लिए, संतृप्त धारा आपतित विकिरण की तीव्रता के अनुक्रमानुपाती पाई जाती है जबकि निरोधी विभव तीव्रता पर निर्भर नहीं होता है (चित्र 11.3)।

(iii) किसी दिए गए प्रकाश-संवेदी पदार्थ के लिए, एक निश्चित न्यूनतम अंतक-आवृत्ति होती है जिसे *देहली आवृत्ति* कहते हैं, जिसके नीचे प्रकाशिक इलेक्ट्रॉनों का कोई उत्सर्जन नहीं होता चाहे आपतित प्रकाश कितना भी तीव्र क्यों न हो। देहली आवृत्ति के ऊपर, निरोधी विभव अथवा तुल्यत: उत्सर्जित प्रकाशिक इलेक्ट्रॉनों की उच्चतम गतिज ऊर्जा आपतित विकिरण की आवृत्ति के साथ रैखिकत: बढ़ती है परंतु यह इसकी तीव्रता से स्वतंत्र होती है (चित्र 11.5)।

(iv) प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन बिना किसी काल-पश्चता के ($\sim 10^{-9}$s अथवा कम) एक तात्क्षणिक प्रक्रिया है, तब भी जब आपतित विकिरण को अत्यधिक मंद कर दिया जाता है।

11.5 प्रकाश-विद्युत प्रभाव तथा प्रकाश का तरंग सिद्धांत

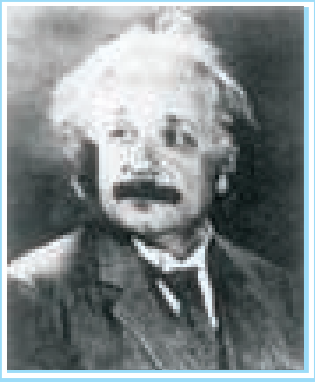
प्रकाश की तरंग प्रकृति उन्नीसवीं शताब्दी के अंत तक अच्छी तरह स्थापित हो गई थी। प्रकाश के तरंग-चित्र के द्वारा व्यतिकरण, विवर्तन तथा ध्रुवण की घटनाओं की स्वाभाविक एवं संतोषजनक रूप में व्याख्या की जा चुकी थी। इस चित्र के अनुसार, प्रकाश एक वैद्युतचुंबकीय तरंग है, जो विद्युत एवं चुंबकीय क्षेत्र से मिलकर बनी होती है तथा जिस आकाशीय क्षेत्र में फैली होती है, वहाँ ऊर्जा का संतत वितरण होता है। अब हम यह देखेंगे कि क्या प्रकाश का यह तरंग-चित्रण पिछले अनुभाग में दिए गए प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन संबंधी प्रेक्षणों की व्याख्या कर सकता है।

प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन के तरंग-चित्रण के अनुसार धातु के पृष्ठ (जहाँ विकिरण की किरण-पुंज पड़ती है) पर स्वतंत्र इलेक्ट्रॉन विकिरित ऊर्जा को संतत रूप में अवशोषित करते हैं। जितनी अधिक प्रकाश की तीव्रता होगी उतने ही अधिक वैद्युत तथा चुंबकीय क्षेत्रों के आयाम होंगे। परिणामस्वरूप, तीव्रता जितनी अधिक होगी उतना ही अधिक प्रत्येक इलेक्ट्रॉन के द्वारा ऊर्जा-अवशोषण होना चाहिए। इस चित्रण के अनुसार, प्रकाशिक इलेक्ट्रॉन की उच्चतम गतिज ऊर्जा तीव्रता में वृद्धि के साथ बढ़नी चाहिए। साथ ही, चाहे प्रकाश की आवृत्ति कुछ भी हो, एक पर्याप्त तीव्र विकिरण किरण-पुंज (पर्याप्त समय में) इलेक्ट्रॉनों को इतनी पर्याप्त ऊर्जा देने में समर्थ होगा जो इनके धातु-पृष्ठ से बाहर निकलने के लिए आवश्यक निम्नतम ऊर्जा से अधिक होगी। इसलिए, एक देहली आवृत्ति का अस्तित्व नहीं होना चाहिए। तरंग सिद्धांत की इन प्रागुक्तियों से अनुभाग 11.4.3 में दिए गए प्रेक्षणों (i), (ii) तथा (iii) का सीधे विरोध होता है।

आगे हमें ध्यान रखना होगा कि तरंग-चित्रण में, इलेक्ट्रॉन द्वारा ऊर्जा का संतत अवशोषण विकिरण के पूरे तरंगाग्र पर होता है। चूँकि एक बड़ी संख्या में इलेक्ट्रॉन ऊर्जा अवशोषित करते हैं, अत: प्रति इलेक्ट्रॉन प्रति इकाई समय में अवशोषित ऊर्जा बहुत कम होगी। स्पष्ट गणना से यह आकलन किया जा सकता है कि एकल इलेक्ट्रॉन के लिए कार्य-फलन को पार कर धातु से बाहर निकल आने के लिए पर्याप्त ऊर्जा जुटाने में कई घंटे अथवा और भी अधिक समय लग सकता है। यह निष्कर्ष भी प्रेक्षण (iv), जिसके अनुसार प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन (लगभग) तात्क्षणिक होता है, के बिलकुल विपरीत है। संक्षेप में, तरंग-चित्रण के द्वारा प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन के अत्यंत मूल लक्षणों की व्याख्या नहीं हो सकती।

11.6 आइंस्टाइन का प्रकाश-विद्युत समीकरण : विकिरण का ऊर्जा क्वांटम

सन् 1905 में अल्बर्ट आइंसटाइन (1879 – 1955) ने प्रकाश-विद्युत प्रभाव की व्याख्या के लिए वैद्युतचुंबकीय विकिरण का एक मौलिक रूप से नया चित्रण प्रस्तावित किया। इस चित्रण में, प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन विकिरण से संतत ऊर्जा-अवशोषण के द्वारा नहीं होता। विकिरण ऊर्जा विविक्त इकाइयों से बनी होती है–जो *विकिरण की ऊर्जा के क्वांटा* कहलाते हैं। विकिरण ऊर्जा के प्रत्येक क्वांटम की ऊर्जा $h\nu$ होती है, जहाँ h प्लांक स्थिरांक है और ν प्रकाश की आवृत्ति। प्रकाश-विद्युत प्रभाव में, एक इलेक्ट्रॉन विकिरण के एक क्वांटम की ऊर्जा ($h\nu$) अवशोषित करता है। यदि ऊर्जा का यह अवशोषित क्वांटम इलेक्ट्रॉन के लिए धातु की सतह से बाहर निकल आने



अल्बर्ट आइंस्टाइन (1879 – 1955)
सन् 1879 में जर्मनी में उल्म नामक स्थान पर जन्मे अल्बर्ट आइंसटाइन आज तक के विश्व के भौतिकविदों में सर्वाधिक महान भौतिकविद के रूप में जाने जाते हैं। उनका विस्मयकारी वैज्ञानिक जीवन उनके सन् 1905 में प्रकाशित तीन क्रांतिकारी शोधपत्रों से आरंभ हुआ। उन्होंने अपने प्रथम शोधपत्र में प्रकाश क्वांटा (अब फ़ोटॉन कहा जाता है) की धारणा को प्रस्तुत किया और प्रकाश-वैद्युत प्रभाव के उस लक्षण की व्याख्या की जिसे विकिरण का चिरप्रतिष्ठित तरंग सिद्धांत नहीं समझा सका। अपने दूसरे शोधपत्र में उन्होंने ब्राउनी गति का सिद्धांत विकसित किया जिसकी कुछ वर्षों बाद प्रयोगात्मक पुष्टि हुई और जिसने द्रव्य के आण्विक चित्रण का विश्वासोत्पादक साक्ष्य उपलब्ध कराया। उनके तृतीय शोधपत्र ने आपेक्षिकता के विशिष्ट सिद्धांत को जन्म दिया। सन् 1916 में उन्होंने आपेक्षिकता के व्यापक सिद्धांत को प्रकाशित किया। आइंस्टाइन के कुछ अन्य महत्वपूर्ण योगदान हैं : उद्दीपित उत्सर्जन की धारणा जो प्लांक कृष्णिका विकिरण नियम के एक वैकल्पिक व्युत्पन्न में प्रस्तुत की गई है, विश्व का स्थैतिक प्रतिरूप जिसने आधुनिक ब्रह्मांडिकी का आरंभ किया, किसी गैस के स्थूल बोसॉन की क्वांटम-सांख्यिकी तथा क्वांटम-यांत्रिकी की संस्थापना का आलोचनात्मक विश्लेषण। सैद्धांतिक भौतिकी में उनके योगदान तथा प्रकाश-विद्युत प्रभाव के लिए 1921 में उन्हें नोबेल पुरस्कार से सम्मानित किया गया।

के लिए निम्नतम आवश्यक ऊर्जा से अधिक होता है (कार्य-फलन, ϕ_0) तब उत्सर्जित इलेक्ट्रॉन की अधिकतम गतिज ऊर्जा होगी :

$$K_{\text{उच्च}} = h\nu - \phi_0 \qquad (11.2)$$

अधिक दृढ़ता से आबद्ध इलेक्ट्रॉनों के उत्सर्जित होने पर उनकी गतिज ऊर्जा अपने अधिकतम मान से कम होती है। ध्यान दें कि किसी आवृत्ति के प्रकाश की तीव्रता, प्रति सेकंड आपतित फ़ोटॉनों की संख्या द्वारा निर्धारित होती है। तीव्रता बढ़ाने पर प्रति सेकंड उत्सर्जित इलेक्ट्रॉनों की संख्या बढ़ती है। तथापि, उत्सर्जित प्रकाशिक इलेक्ट्रॉनों की अधिकतम गतिज ऊर्जा प्रत्येक फ़ोटॉन की ऊर्जा द्वारा निर्धारित होती है।

समीकरण (11.2) को *आइंस्टाइन का प्रकाश-विद्युत समीकरण* कहते हैं। अब हम यह देख सकते हैं कि किस प्रकार यह समीकरण अनुभाग 11.4.3 में दिए प्रकाश-विद्युत प्रभाव से संबंधित सभी प्रेक्षणों को एक सरल एवं परिष्कृत ढंग से प्रस्तुत करता है।

- समीकरण (11.2) के अनुसार, प्रेक्षण के अनुरूप, $K_{\text{उच्च}}$ आवृत्ति ν पर रैखिकत: निर्भर करती है और विकिरण की तीव्रता पर निर्भर नहीं करती है। ऐसा इसलिए हुआ है क्योंकि आइंस्टाइन के चित्रण में, प्रकाश-विद्युत प्रभाव एकल इलेक्ट्रॉन द्वारा विकिरण के एकल क्वांटम के अवशोषण से उत्पन्न होता है। विकिरण की तीव्रता (जो ऊर्जा क्वांटमों की संख्या प्रति इकाई क्षेत्रफल प्रति इकाई समय के अनुक्रमानुपाती है) इस मूल प्रक्रिया के लिए *असंगत* है।
- क्योंकि $K_{\text{उच्च}}$ ऋण राशि नहीं होगी, समीकरण (11.2) में यह अंतर्निहित है कि प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन तभी संभव है जब

  $h\nu > \phi_0$

  अथवा $\nu > \nu_0$, जहाँ

  $$\nu_0 = \frac{\phi_0}{h} \qquad (11.3)$$

  समीकरण (11.3) के अनुसार, कार्य-फलन ϕ_0 के अधिक मान के लिए, प्रकाशिक इलेक्ट्रॉन उत्सर्जित करने के लिए आवश्यक न्यूनतम अथवा देहली आवृत्ति ν_0 का मान अधिक होगा। इस प्रकार, एक देहली आवृत्ति ν_0 (= ϕ_0/h) अस्तित्व में होती है जिससे कम आवृत्ति पर कोई प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन संभव नहीं है, चाहे विकिरण की तीव्रता कुछ भी क्यों न हो अथवा वह पृष्ठ पर कितनी भी देर क्यों न पड़े।
- इस चित्रण में, विकिरण की तीव्रता, जैसा ऊपर परिलक्षित है, ऊर्जा क्वांटा की संख्या प्रति इकाई क्षेत्रफल प्रति इकाई समय के अनुक्रमानुपाती होती है। जितनी अधिक संख्या में ऊर्जा क्वांटा उपलब्ध होंगे, उतनी ही अधिक संख्या में इलेक्ट्रॉन ऊर्जा क्वांटा का अवशोषण करेंगे और इसलिए ($\nu > \nu_0$ के लिए) धातु से बाहर आने वाले इलेक्ट्रॉनों की संख्या उतनी ही अधिक होगी। इससे यह स्पष्ट हो जाता है कि क्यों $\nu > \nu_0$ के लिए प्रकाश-विद्युत धारा तीव्रता के अनुक्रमानुपाती होती है।
- आइंस्टाइन के चित्रण में, प्रकाश-विद्युत प्रभाव में एक इलेक्ट्रॉन के द्वारा

प्रकाश के एक क्वांटम का अवशोषण मूल प्राथमिक प्रक्रिया होती है। यह प्रक्रिया तात्क्षणिक होती है। इस प्रकार, तीव्रता अर्थात विकिरण क्वांटा की संख्या चाहे जितनी भी हो, प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन तात्क्षणिक ही होगा। कम तीव्रता से उत्सर्जन में विलंब नहीं होगा क्योंकि मूल प्राथमिक प्रक्रिया वही रहेगी। तीव्रता से केवल यह निर्धारित होता है कि कितने इलेक्ट्रॉन इस प्राथमिक प्रक्रिया (एक एकल इलेक्ट्रॉन द्वारा एक प्रकाश क्वांटम का अवशोषण) में भाग ले सकने वाले इलेक्ट्रॉनों की संख्या से ही प्रकाश-विद्युत धारा के परिमाण का निर्धारण होता है।

समीकरण (11.1) का उपयोग कर, प्रकाश-विद्युत समीकरण (11.2) को इस प्रकार लिखा जा सकता है

$$e V_0 = h\nu - \phi_0 \; ; \text{ के लिए } \nu \geq \nu_0$$

अथवा $$V_0 = \left(\frac{h}{e}\right)\nu - \frac{\phi_0}{e} \qquad (11.4)$$

यह एक महत्वपूर्ण परिणाम है। इससे यह प्रागुक्ति होती है कि V_0 के विरुद्ध ν का वक्र एक सरल रेखा है, जिसका ढलान = (h/e), जो कि पदार्थ की प्रकृति पर निर्भर नहीं करता। 1906-1916 के मध्य, मिलिकन ने आइंस्टाइन के प्रकाश-विद्युत समीकरण को असत्यापित करने के लिए प्रकाश-वैद्युत प्रभाव पर प्रयोगों की शृंखला की। चित्र 11.5 में दर्शाए अनुसार, उसने सोडियम के लिए प्राप्त सरल रेखा का ढलान मापा। e के ज्ञात मान का उपयोग कर उसने प्लांक स्थिरांक h का मान निर्धारित किया था। यह मान प्लांक स्थिरांक के उस मान (= 6.626×10^{-34} J s) के निकट था जिसे बिलकुल ही भिन्न संदर्भ में ज्ञात किया गया था। इस प्रकार से 1916 में मिलिकन ने आइंस्टाइन के प्रकाश-विद्युत समीकरण को असत्यापित करने के स्थान पर उसकी सत्यता को स्थापित किया।

प्रकाश क्वांटा की परिकल्पना एवं h तथा ϕ_0 के मान (जो अन्य प्रयोगों से प्राप्त मान से मेल रखते हैं) के निर्धारण के उपयोग से प्रकाश-विद्युत प्रभाव के आइंस्टाइन के चित्रण को स्वीकारा गया। मिलिकन ने प्रकाश-विद्युत समीकरण को बड़ी परिशुद्धता से कई क्षारीय धातुओं के लिए विकिरण-आवृत्तियों के विस्तृत परास के लिए सत्यापित किया।

11.7 प्रकाश की कणीय प्रकृति : फ़ोटॉन

प्रकाश-विद्युत प्रभाव ने इस विलक्षण तथ्य को प्रमाणित किया कि प्रकाश किसी द्रव्य के साथ अन्योन्य क्रिया में इस प्रकार व्यवहार करता है जैसे यह क्वांटा अथवा ऊर्जा के पैकेट (जिनमें प्रत्येक की ऊर्जा $h\nu$ है) का बना हो।

क्या प्रकाश ऊर्जा के क्वांटम को किसी कण से संबद्ध किया जा सकता है? आइंसटाइन एक महत्वपूर्ण परिणाम पर पहुँचे कि प्रकाश क्वांटम को संवेग $(h\nu/c)$ से संबद्ध किया जा सकता है। ऊर्जा के साथ-साथ संवेग का निश्चित मान इसका प्रबल सूचक है कि प्रकाश क्वांटम को कण से संबद्ध किया जा सकता है। इस कण को बाद में *फ़ोटॉन* नाम दिया गया। प्रकाश के कण जैसे व्यवहार को ए. एच. कांपटन (1892-1962) के इलेक्ट्रॉन के द्वारा X-किरणों के प्रकीर्णन के प्रयोग से सन् 1924 में पुनः पुष्ट किया गया। सैद्धांतिक भौतिकी में योगदान तथा प्रकाश-विद्युत प्रभाव के अपने कार्य के लिए आइंस्टाइन को 1921 में भौतिकी का नोबेल पुरस्कार प्रदान किया गया। विद्युत के मूल आवेश तथा प्रकाश-विद्युत प्रभाव पर किए गए कार्य के लिए सन् 1923 में मिलिकन को भौतिकी का नोबेल पुरस्कार प्रदान किया गया।

हम वैद्युतचुंबकीय विकिरण के फ़ोटॉन चित्रण का सारांश निम्नानुसार दे सकते हैं :

(i) विकिरण के द्रव्य के साथ अन्योन्य क्रिया में, विकिरण इस प्रकार व्यवहार करता है मानो यह ऐसे कणों से बना हो जिन्हें फ़ोटॉन कहते हैं।

(ii) प्रत्येक फ़ोटॉन की ऊर्जा $E (=h\nu)$ होती है और संवेग $p (= h\nu/c)$ तथा चाल c होती है। जहाँ c प्रकाश की चाल है।

(iii) एक निश्चित आवृत्ति ν, अथवा तरंगदैर्घ्य λ, के सभी फ़ोटॉनों की ऊर्जा $E (=h\nu = hc/\lambda)$ और संवेग $p (= h\nu/c = h/\lambda)$, एकसमान होते हैं (विकिरण की तीव्रता चाहे जो भी हो)। किसी दी गई तरंगदैर्घ्य के प्रकाश की तीव्रता बढ़ाने पर केवल किसी दिए गए क्षेत्र से गुज़रने वाले प्रति सेकंड फोटॉनों की संख्या ही बढ़ती है (सभी फोटॉनों की ऊर्जा एकसमान होती है)। अत: फ़ोटॉन की ऊर्जा विकिरण की तीव्रता पर निर्भर नहीं करती।

(iv) फ़ोटॉन विद्युत उदासीन होते हैं और विद्युत तथा चुंबकीय क्षेत्रों के द्वारा विक्षेपित नहीं होते।

(v) फ़ोटॉन-कण संघट्ट (जैसे कि फोटॉन-इलेक्ट्रॉन संघट्ट) में कुल ऊर्जा तथा कुल संवेग संरक्षित रहते हैं। तथापि, किसी संघट्ट में फ़ोटॉनों की संख्या भी संरक्षित नहीं रह सकती है। फ़ोटॉन अवशोषित हो सकता है अथवा एक नया फ़ोटॉन सृजित हो सकता है।

उदाहरण 11.1

उदाहरण 11.1 6.0×10^{14} Hz आवृत्ति का एकवर्णी प्रकाश किसी लेसर के द्वारा उत्पन्न किया जाता है। उत्सर्जन क्षमता 2.0×10^{-3} W है। (a) प्रकाश किरण-पुंज में किसी फ़ोटॉन की ऊर्जा कितनी है? (b) स्रोत के द्वारा औसत तौर पर प्रति सेकंड कितने फ़ोटॉन उत्सर्जित होते हैं?

हल

(a) प्रत्येक फ़ोटॉन की ऊर्जा होगी

$E = h\nu = (6.63\times10^{-34}\ \text{J s})\ (6.0\times10^{14}\ \text{Hz})$

$= 3.98\times10^{-19}\ \text{J}$

(b) यदि स्रोत के द्वारा प्रति सेकंड उत्सर्जित फ़ोटॉनों की संख्या N है तो किरण-पुंज में संचरित क्षमता P प्रति फ़ोटॉन ऊर्जा E के N गुना होगी जिससे कि $P = NE$ । तब

$$N = \frac{P}{E} = \frac{2.0\times10^{-3}\ \text{W}}{3.98\times10^{-19}\ \text{J}}$$

$= 5.0\times10^{15}$ फ़ोटॉन प्रति सेकंड

उदाहरण 11.2

उदाहरण 11.2 यदि सीज़ियम का कार्य-फलन 2.14 eV है तो परिकलन कीजिए : (a) सीज़ियम की देहली आवृत्ति तथा (b) आपतित प्रकाश का तरंगदैर्घ्य, यदि प्रकाशिक धारा को 0.60 V का एक निरोधी विभव लगाकर शून्य किया जाए।

हल

(a) अंतक अथवा देहली आवृत्ति के लिए, आपतित विकिरण की ऊर्जा $h\nu_0$ कार्य फलन ϕ_0 के समान होती है। अत:

$$\nu_0 = \frac{\phi_0}{h} = \frac{2.14\,\text{eV}}{6.63\times10^{-34}\,\text{J s}}$$

$$= \frac{2.14\times1.6\times10^{-19}\,\text{J}}{6.63\times10^{-34}\,\text{J s}} = 5.16\times10^{14}\ \text{Hz}$$

इस प्रकार $\nu_0 = 5.16\times10^{14}$ Hz से कम आवृत्तियों के लिए, कोई प्रकाशिक इलेक्ट्रॉन मुक्त नहीं होता है।

(b) उत्सर्जित प्रकाशिक इलेक्ट्रॉनों की उच्चतम गतिज ऊर्जा eV_0 स्थितिज ऊर्जा (मंदन-विभव V_0 के द्वारा) के समान होने की स्थिति में प्रकाशिक धारा शून्य हो जाती है। आइंस्टाइन का प्रकाश-विद्युत समीकरण निम्न है :

उदाहरण 11.2

$$eV_0 = h\nu - \phi_0 = \frac{hc}{\lambda} - \phi_0$$

अथवा $\lambda = hc/(eV_0 + \phi_0)$

$$= \frac{(6.63\times10^{-34}\,\text{J s})\times(3\times10^{8}\,\text{m/s})}{(0.60\,\text{eV}+2.14\,\text{eV})}$$

$$= \frac{19.89\times10^{-26}\,\text{J m}}{(2.74\,\text{eV})}$$

$$\lambda = \frac{19.89\times10^{-26}\,\text{J m}}{2.74\times1.6\times10^{-19}\,\text{J}} = 454\ \text{nm}$$

उदाहरण 11.3

उदाहरण 11.3 दृश्य क्षेत्र में बैंगनी रंग, पीले-हरे रंग तथा लाल रंग के प्रकाश की तरंगदैर्घ्य क्रमशः लगभग 390 nm, लगभग 550 nm (औसत तरंगदैर्घ्य) तथा लगभग 760 nm है।

(a) दृश्य क्षेत्र के निम्न प्रकाश के लिए फ़ोटॉन की ऊर्जा (eV) क्या होगी: (i) बैंगनी सिरा; (ii) पीले-हरे रंग की औसत तरंगदैर्घ्य; तथा (iii) लाल सिरा ($h = 6.63\times10^{-34}$ J s तथा 1 eV = 1.6×10^{-19}J)

(b) प्रकाश-संवेदी पदार्थों के लिए सारणी 11.1 में दिए गए कार्य-फलनों के मान तथा (a) प्रश्न के (i), (ii) तथा (iii) भागों के परिणामों को उपयोग में लाते हुए क्या आप दृश्य प्रकाश के साथ कार्य कर सकने वाली प्रकाश विद्युत युक्ति का सृजन कर सकते हैं?

हल

(a) आपतित फ़ोटॉन की ऊर्जा $E = h\nu = hc/\lambda$

$$E = (6.63\times10^{-34}\,\text{J s})\,(3\times10^{8}\,\text{m/s})/\lambda$$
$$= \frac{1.989\times10^{-25}\,\text{J m}}{\lambda}$$

(i) बैंगनी प्रकाश के लिए $\lambda_1 = 390$ nm (निम्न तरंगदैर्घ्य सिरा)

आपतित फ़ोटॉन ऊर्जा, $E_1 = \dfrac{1.989\times10^{-25}\,\text{J m}}{390\times10^{-9}\,\text{m}}$

$= 5.10\times10^{-19}$J

$= \dfrac{5.10\times10^{-19}\,\text{J}}{1.6\times10^{-19}\,\text{J/eV}}$

$= 3.19$ eV

(ii) पीले-हरे प्रकाश के लिए, $\lambda_2 = 550$ nm (औसत तरंगदैर्घ्य)

आपतित फ़ोटॉन ऊर्जा, $E_2 = \dfrac{1.989\times10^{-25}\,\text{J m}}{550\times10^{-9}\,\text{m}}$

$= 3.62\times10^{-19}$ J = 2.26 eV

(iii) लाल प्रकाश के लिए, $\lambda_3 = 760$ nm (उच्च तरंगदैर्घ्य सिरा)

आपतित फ़ोटॉन ऊर्जा, $E_3 = \dfrac{1.989\times10^{-25}\,\text{J m}}{760\times10^{-9}\,\text{m}}$

$= 2.62\times10^{-19}$ J = 1.64 eV

(b) किसी प्रकाश-विद्युत युक्ति के कार्य के लिए आपतित प्रकाश ऊर्जा E का मान प्रयुक्त पदार्थ के कार्य-फलन के मान के समान या अधिक होना चाहिए। अतः बैंगनी प्रकाश ($E = 3.19$ eV) के लिए कार्य कर सकने वाली प्रकाश-विद्युत युक्ति के प्रकाश-संवेदी पदार्थ, Na (कार्य फलन $\phi_0 = 2.75$ eV), K (कार्य-फलन $\phi_0 = 2.30$ eV) तथा Cs (कार्य-फलन $\phi_0 = 2.14$ eV) हो सकते हैं। यह युक्ति पीले-हरे प्रकाश ($E = 2.26$ eV) के लिए प्रकाश-संवेदी पदार्थ Cs (कार्य-फलन $\phi_0 = 2.14$ eV), के उपयोग से ही कार्य कर सकती है। तथापि, यह युक्ति लाल प्रकाश ($E = 1.64$ eV) के लिए उपरोक्त तीनों में से किसी प्रकाश-संवेदी पदार्थ के उपयोग से कार्य नहीं कर सकेगी।

11.8 द्रव्य की तरंग प्रकृति

प्रकाश (व्यापक तौर पर वैद्युतचुंबकीय विकिरण) की द्वैत प्रकृति (तरंग-कण), वर्तमान तथा पूर्व अध्यायों में किए गए अध्ययन द्वारा, स्पष्ट रूप से प्रकट होती है। प्रकाश की तरंग प्रकृति व्यतिकरण, विवर्तन तथा ध्रुवण की परिघटनाओं में दृष्टिगोचर होती है। दूसरी ओर, प्रकाश-विद्युत प्रभाव तथा कॉम्पटन प्रभाव जिनमें ऊर्जा और संवेग का अंतरण होता है, विकिरण इस प्रकार व्यवहार करता है कि मानो यह कणों के गुच्छ अर्थात फ़ोटॉनों से बना हो। कण अथवा तरंग-चित्रण में से कौन किसी प्रयोग को समझने में सर्वाधिक उपयुक्त है, यह प्रयोग की प्रकृति पर निर्भर है। उदाहरण के लिए, अपने नेत्रों से किसी वस्तु को देखने की सुपरिचित घटना में दोनों ही चित्रण महत्वपूर्ण हैं। नेत्र लेंस द्वारा प्रकाश को एकत्र कर फ़ोकस करने की प्रक्रिया को तरंग-चित्रण से भली-भाँति विवेचित किया गया है। परंतु इसका शलाकाओं तथा शंकुओं (रेटिना के) द्वारा अवशोषण में फोटॉन चित्रण की आवश्यकता होती है।

एक स्वाभाविक प्रश्न यह उठता है कि यदि विकिरण की द्वैत प्रकृति (तरंग तथा कण) है तो क्या प्रकृति के कण (इलेक्ट्रॉन, प्रोटॉन आदि) भी तरंग-जैसा लक्षण प्रदर्शित करते हैं? सन् 1924 में एक फ्रांसीसी भौतिकवैज्ञानिक लुइस विक्टर दे ब्रॉग्ली (फ्रेंच उच्चारण में इसे लुई विक्टर दे ब्राए पुकारा जाता है) (1892 – 1987) ने एक निर्भीक परिकल्पना को प्रस्तुत किया कि पदार्थ के गतिमान कण उपयुक्त परिस्थितियों में तरंग सदृश गुण प्रदर्शित कर सकते हैं। उसने यह तर्क दिया कि प्रकृति सममित है और दो मूल भौतिक सत्ताओं, द्रव्य एवं ऊर्जा, का भी सममित लक्षण होना चाहिए। यदि विकिरण का द्वैत लक्षण है तो द्रव्य का भी होना चाहिए। दे ब्रॉग्ली ने प्रस्तावित किया कि संवेग p के कण के साथ जुड़ी तरंगदैर्घ्य λ निम्न प्रकार दर्शायी जा सकती है :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \tag{11.5}$$

जहाँ m कण का द्रव्यमान तथा v इसकी चाल है। समीकरण (11.5) को दे *ब्रॉग्ली का संबंध* और *द्रव्य-तरंग* के तरंगदैर्घ्य λ को दे *ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य* कहते हैं। द्रव्य का द्वैत स्वरूप दे ब्रॉग्ली के संबंध में स्पष्ट है। समीकरण (11.5) की बाईं ओर, λ तरंग का लक्षण है जबकि दाईं ओर संवेग p कण का विशिष्ट लक्षण है। प्लांक स्थिरांक h दोनों लक्षणों को संयोजित करता है।

समीकरण (11.5) एक पदार्थ-कण के लिए मूलत: एक परिकल्पना है जिसकी तर्कसंगति केवल प्रयोग के द्वारा ही परखी जा सकती है। तथापि, यह देखना रोचक है कि यह एक फ़ोटॉन के द्वारा भी संतुष्ट होता है। एक फ़ोटॉन के लिए, जैसा कि हमने देखा है,

$$p = h\nu / c \tag{11.6}$$

इसलिए,

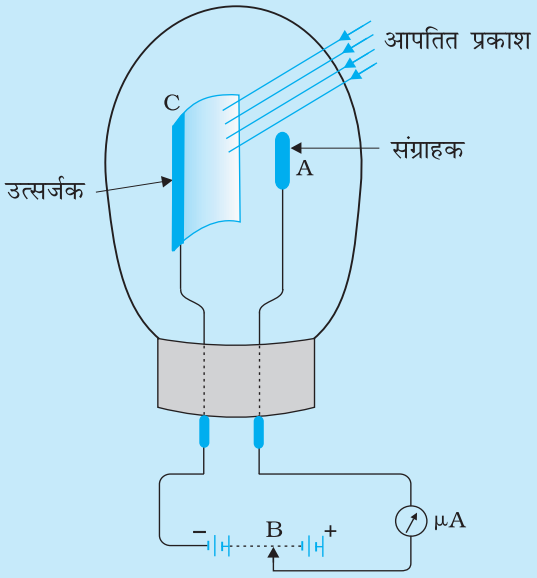
$$\frac{h}{p} = \frac{c}{\nu} = \lambda \tag{11.7}$$

अर्थात, एक फोटॉन का दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य जो समीकरण (11.5) द्वारा दिया गया है उस वैद्युतचुंबकीय विकिरण के तरंगदैर्घ्य के समान होता है तथा फोटॉन विकिरण की ऊर्जा तथा संवेग का एक क्वांटम है।

स्पष्टत: समीकरण (11.5) के द्वारा, λ एक ज़्यादा भारी कण (बड़ा m) अथवा अधिक ऊर्जस्वी कण (बड़े v) के लिए छोटा होगा। उदाहरण के लिए, एक 0.12 kg द्रव्यमान की गेंद जो 20 m s^{-1} की चाल से चल रही है, की दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य का सरलता से परिकलन किया जा सकता है।

फ़ोटो सेल

फ़ोटो सेल (प्रकाश सेल) प्रकाश-विद्युत प्रभाव का एक शिल्प प्रौद्योगिकीय अनुप्रयोग है। यह एक ऐसी युक्ति है जो प्रकाश-ऊर्जा को वैद्युत-ऊर्जा में बदल देती है। इसे कभी-कभी विद्युत नेत्र भी कहते हैं। एक फ़ोटो सेल में एक अर्ध-बेलनाकार प्रकाश-संवेदी धातु पट्टिका C (उत्सर्जक) होती है और एक तार का पाश (लूप) A (संग्राहक) एक निर्वातित काँच या क्वार्टज़ बल्ब में लगे होते हैं। इसे चित्र में दर्शाए अनुसार किसी बाह्य परिपथ में एक उच्च-विभव बैटरी B तथा माइक्रोऐमीटर (μA) के साथ संयोजित किया जाता है, कभी-कभी पट्टिका C के स्थान पर, प्रकाश-संवेदी पदार्थ (c) की एक पतली परत बल्ब की भीतरी सतह पर चिपका दी जाती है। बल्ब के एक भाग को साफ़ छोड़ दिया जाता है जिससे कि प्रकाश इसमें प्रवेश कर सके।



फ़ोटो सेल

जब उपयुक्त तरंगदैर्घ्य का प्रकाश उत्सर्जक C पर पड़ता है तो इलेक्ट्रॉन उत्सर्जित होते हैं। ये प्रकाशिक इलेक्ट्रॉन संग्राहक पर आकर्षित हो जाते हैं। किसी प्रकाश सेल से कुछ माइक्रोऐम्पियर की कोटि की प्रकाशिक धारा प्राप्त की जाती है।

एक प्रकाश सेल प्रदीप्त-तीव्रता में परिवर्तन कर प्रकाशिक धारा में परिवर्तन कर सकता है। यह धारा नियंत्रण तंत्र के चालन और प्रकाश मापक युक्तियों में उपयोग में लाई जा सकती है। अवरक्त विकिरण के लिए संवेदी लेड सल्फ़ाइड के प्रकाश सेलों का उपयोग इलेक्ट्रॉनिक प्रज्वलन परिपथों में किया जाता है।

वैज्ञानिक कार्यों में, प्रकाश की तीव्रता को मापने के सभी अनुप्रयोगों में प्रकाश सेलों का उपयोग किया जाता है। फ़ोटोग्राफी कैमरों में प्रकाश मापक प्रकाश सेल का उपयोग आपतित प्रकाश की तीव्रता मापने में करते हैं। स्वचालित द्वार नियंत्रक में प्रकाश सेल का प्रयोग द्वार-प्रकाश विद्युत परिपथ में होता है। द्वार की ओर बढ़ते हुए व्यक्ति द्वारा प्रकाश सेल पर पड़ने वाले प्रकाश पुंज बाधित हो सकते हैं। प्रकाशिक धारा में अचानक होने वाले बदलाव का उपयोग द्वार खोलने के लिए मोटर को प्रारंभ करने में या अलार्म बजाने में किया जा सकता है। इनका उपयोग उस गणना युक्ति के नियंत्रण में भी किया जाता है जो प्रकाश किरण-पुंज की प्रत्येक रुकावट, जो किरण-पुंज के पार किसी व्यक्ति अथवा वस्तु के जाने के कारण उत्पन्न होती है, को अंकित करता है। इसलिए, प्रकाश सेल किसी प्रेक्षागृह में प्रवेश करने वाले व्यक्तियों की गणना करने में सहायता करता है, यदि वे विशाल कक्ष में एक-एक करके प्रवेश करते हों। इनका उपयोग यातायात नियम तोड़ने वालों की पहचान के लिए किया जाता है। जब भी विकिरण के एक किरण-पुंज को अवरोधित किया जाता है तो एक एलार्म बजाया जा सकता है।

चोर एलार्म में, पराबैंगनी प्रकाश (अदृश्य) को संतत प्रवेश-द्वार पर स्थापित प्रकाश सेल पर डाला जाता है। कोई व्यक्ति जो द्वार में प्रवेश करता है वह प्रकाश सेल पर पड़ने वाले किरण-पुंज को अवरोधित करता है। प्रकाशक विद्युत-धारा में आकस्मिक परिवर्तन का उपयोग एक विद्युत घंटी के बजने से प्रारंभ किया जाता है। अग्नि-एलार्म में, भवन में उपयुक्त स्थानों पर कई प्रकाश सेल स्थापित कर दिए जाते हैं। आग लगने पर प्रकाश विकिरण प्रकाश सेल पर पड़ते हैं। इससे एक विद्युत घंटी अथवा एक भोंपू से होकर जाने वाला परिपथ पूर्ण हो जाता है और यह एक चेतावनी-संकेत के रूप में कार्य करना प्रारंभ कर देता है।

प्रकाश सेलों का उपयोग चल चित्रण में ध्वनि के पुनरुत्पादन तथा टेलीविज़न कैमरे में दृश्य के क्रमवीक्षण (scanning) तथा टेलिविज़न प्रसारण (telecasting) में किया जाता है। इनका प्रयोग उद्योगों में धातु की चादरों में छोटी त्रुटियों तथा छिद्रों को खोजने में भी किया जाता है।

$$p = m\,v = 0.12\ \text{kg} \times 20\ \text{m s}^{-1} = 2.40\ \text{kg m s}^{-1}$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6.63 \times 10^{-34}\ \text{J s}}{2.40\ \text{kg m s}^{-1}} = 2.76 \times 10^{-34}\ \text{m}$$



लुईस विक्टर दे ब्रॉग्ली (1892 – 1987)

लुईस विक्टर दे ब्रॉग्ली (1892 – 1987) फ्रांसीसी भौतिकविद, जिन्होंने द्रव्य की तरंग प्रकृति का क्रांतिकारी विचार प्रस्तुत किया। यह विचार इरविन श्रोडिंगर द्वारा क्वांटम-यांत्रिकी के एक संपूर्ण सिद्धांत के रूप में विकसित किया गया, जिसे सामान्यत: तरंग-यांत्रिकी कहते हैं। इलेक्ट्रॉनों की तरंग प्रकृति की खोज के लिए इन्हें सन् 1929 में नोबेल पुरस्कार से सम्मानित किया गया।

यह तरंगदैर्घ्य इतनी छोटी है कि यह किसी मापन की सीमा से बाहर है। यही कारण है कि स्थूल वस्तुएँ हमारे दैनिक जीवन में तरंग-सदृश गुण नहीं दर्शातीं। दूसरी ओर, अव-परमाण्विक डोमेन (Sub-atomic domain) में, कणों का तरंग लक्षण महत्वपूर्ण है तथा मापने योग्य है।

एक इलेक्ट्रॉन (द्रव्यमान m, आवेश e) जिसे विरामावस्था से एक विभव V द्वारा त्वरित किया जाता है, का विचार करें। इलेक्ट्रॉन की गतिज ऊर्जा K इस पर विद्युत क्षेत्र द्वारा किए गए कार्य (Ve) के बराबर होगी :

$$K = eV \tag{11.8}$$

यहाँ $K = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{p^2}{2m}$, जिससे

$$p = \sqrt{2\,m\,K} = \sqrt{2\,m\,eV} \tag{11.9}$$

तब इलेक्ट्रॉन का दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य λ होगा

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2\,mK}} = \frac{h}{\sqrt{2\,meV}} \tag{11.10}$$

h, m *तथा* e के सांख्यिक मान को स्थानापन्न करने पर हम निम्न मान पाते हैं

$$\lambda = \frac{1.227}{\sqrt{V}}\ \text{nm} \tag{11.11}$$

जहाँ V त्वरक विभव का वोल्ट में मान है। एक 120 V त्वरक विभव के लिए, समीकरण (11.11) से $\lambda = 0.112$ nm प्राप्त होता है। यह तरंगदैर्घ्य उसी कोटि की है जितनी दूरी क्रिस्टलों में परमाण्वीय तलों के बीच होती है। इससे यह संकेत मिलता है कि एक इलेक्ट्रॉन से जुड़ी पदार्थ तरंग को X-किरण विवर्तन जैसे क्रिस्टल विवर्तन प्रयोगों से परखा जा सकता है। हम अगले अनुभाग में दे ब्रॉग्ली की परिकल्पना के प्रायोगिक परीक्षण का वर्णन करेंगे। इलेक्ट्रॉन की तरंगीय प्रकृति की खोज के लिए दे ब्रॉग्ली को 1929 में भौतिकी के नोबेल पुरस्कार से सम्मानित किया गया।

द्रव्य-तरंग चित्रण ने हाइज़नबर्ग के *अनिश्चितता सिद्धांत* को परिष्कृत रूप में समाविष्ट किया। इस सिद्धांत के अनुसार, *एक ही समय* पर किसी इलेक्ट्रॉन (अथवा कोई और कण) की स्थिति एवं संवेग *दोनों* को परिशुद्ध रूप से मापना असंभव है। हमेशा ही कुछ अनिश्चितता (Δx) स्थिति के विनिर्देश और कुछ अनिश्चितता (Δp) संवेग के विनिर्देश में होती है। Δx तथा Δp के गुणनफल की एक निम्नतर सीमा होती है, जो $\hbar$* (जहाँ $\hbar = h/2\pi$) की कोटि की होती है, अर्थात्

$$\Delta x\,\Delta p \approx \hbar \tag{11.12}$$

समीकरण (11.12) इस संभावना की अनुमति देता है कि Δx शून्य हो; परंतु तब Δp को अनंत होना चाहिए जिससे कि गुणनफल शून्य न हो। इसी प्रकार यदि Δp शून्य होता है, तब Δx अनंत होगा। सामान्यतया, दोनों Δx तथा Δp शून्य नहीं होते जिससे कि उनका गुणनफल $\hbar$ कोटि का हो।

अब यदि एक इलेक्ट्रॉन निश्चित संवेग p (अर्थात $\Delta p = 0$) हो, तब दे ब्रॉग्ली संबंध के द्वारा,

* एक अधिक परिशुद्ध विवेचन से $\Delta x\,\Delta p \geq \hbar/2$ प्राप्त होता है।

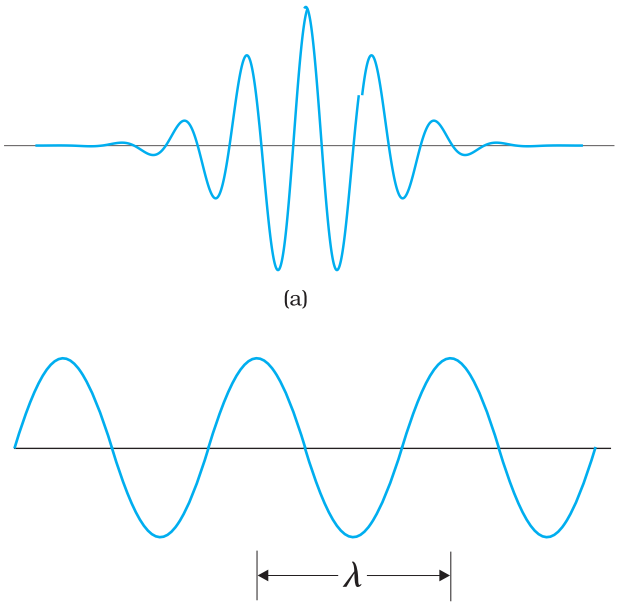
इसका तरंगदैर्घ्य (λ) निश्चित होगा। एक निश्चित (एकल) तरंगदैर्घ्य की तरंग का विस्तार संपूर्ण स्थान में होता है। बॉर्न की प्रायिकता व्याख्या से इसका अर्थ यह हुआ कि इलेक्ट्रॉन स्थान के किसी निश्चित क्षेत्र में स्थानीयित नहीं होगा। अर्थात्, इसकी स्थिति अनिश्चितता अनंत होगी ($\Delta x \to \infty$) जो अनिश्चितता के सिद्धांत के साथ संगत है।

सामान्यत: इलेक्ट्रॉन के साथ जुड़ी पदार्थ-तरंग संपूर्ण आकाश में विस्तृत नहीं होती। यह एक तरंग-पैकेट के रूप में आकाश में एक निश्चित क्षेत्र में विस्तृत होता है। उस स्थिति में Δx अनंत नहीं होता है बल्कि तरंग-पैकेट के विस्तार पर निर्भर इसका कोई परिमित मान होता है। आपको यह भी जानना चाहिए कि परिमित विस्तार की किसी तरंग-पैकेट का तरंगदैर्घ्य एकल नहीं होता। यह किसी केंद्रीय तरंगदैर्घ्य के आसपास विस्तृत तरंगदैर्घ्य से बनी होती है।

तब, दे ब्रॉग्ली के संबंध के द्वारा, इलेक्ट्रॉन के संवेग का भी एक विस्तार होगा – Δp की अनिश्चितता। यह अनिश्चितता के संबंध से अपेक्षित है। गणितीय ढंग (उपपत्ति छोड़ दी गई है) से यह दर्शाया जा सकता है कि तरंग-पैकेट विवरण दे ब्रॉग्ली संबंध तथा बॉर्न-प्रायिकता व्याख्या के साथ हाइजेनबर्ग अनिश्चितता-संबंध का परिशुद्ध रूप में पुनरुत्पन्न करता है।

अध्याय 12 में, दे ब्रॉग्ली संबंध को किसी परमाणु में इलेक्ट्रॉन के कोणीय संवेग के क्वांटमीकरण पर बोर की परिकल्पना की समर्थता को दर्शाते हुए पाएँगे।

चित्र 11.6(a) में एक स्थानीयित तरंग-पैकेट तथा चित्र 11.6(b) में निश्चित तरंगदैर्घ्य के लिए विस्तृत तरंग का व्यवस्था-चित्र दर्शाया गया है।



चित्र 11.6 (a) एक इलेक्ट्रॉन का तरंग-पैकेट विवरण। किसी बिंदु के आयाम के वर्ग को उस बिंदु पर इलेक्ट्रॉन की प्रायिकता घनत्व के साथ संबंधित किया गया है। तरंग-पैकेट किसी केंद्रीय तरंगदैर्घ्य के आसपास तरंगदैर्घ्य के विस्तार (और इस प्रकार दे ब्रॉग्ली संबंध के द्वारा, संवेग के विस्तार) के साथ मेल रखता है। परिणामत:, यह स्थिति में अनिश्चितता (Δx) और संवेग में अनिश्चितता (Δp) से जुड़ा है। (b) किसी इलेक्ट्रॉन के निश्चित संवेग से मेल खाती द्रव्य-तरंग संपूर्ण आकाश में विस्तृत होती है। इस उदाहरण में $\Delta p = 0$ और $\Delta x \to \infty$।

उदाहरण 11.4 (a) एक इलेक्ट्रॉन जो 5.4×10^6 m/s की चाल से गति कर रहा है, (b) 150 g द्रव्यमान की एक गेंद जो 30.0 m/s की चाल से गति कर रही है, से जुड़ी दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य क्या होगी?

हल

(a) इलेक्ट्रॉन के लिए

द्रव्यमान $m = 9.11 \times 10^{-31}$ kg, वेग $v = 5.4\times10^6$ m/s

तब संवेग $p = mv = 9.11\times10^{-31}$ (kg) $\times$ 5.4×10^6 (m/s)

$p = 4.92 \times 10^{-24}$ kg m/s

दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य, $\lambda = h/p$

$$= \frac{6.63\times10^{-34}\ \text{J s}}{4.92\times10^{-24}\ \text{kg m/s}}$$

$\lambda = 0.135$ nm

(b) गेंद के लिए

द्रव्यमान $m' = 0.150$ kg, वेग $v' = 30.0$ m/s

तब संवेग

$p' = m'v' = 0.150$ (kg) $\times$ 30.0 (m/s)

$p' = 4.50$ kg m/s

दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य $\lambda' = h/p'$

उदाहरण 11.4

उदाहरण 11.4

$$= \frac{6.63\times10^{-34}\ \text{J s}}{4.50\times\ \text{kg m / s}}$$

$$\lambda' = 1.47\times10^{-34}\ \text{m}$$

इलेक्ट्रॉन के लिए दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य X-किरण तरंगदैर्घ्य के समान है। परंतु गेंद के लिए यह प्रोटॉन के आकार के लगभग 10^{-19} गुना है जो प्रायोगिक मापन की सीमा के बिलकुल बाहर है।

उदाहरण 11.5

उदाहरण 11.5 एक इलेक्ट्रॉन, एक α-कण तथा एक प्रोटॉन की गतिज ऊर्जा समान हैं। इनमें से किस कण की दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य न्यूनतम होगी?

हल

किसी कण के लिए, दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य $\lambda = h/p$ है।

गतिज ऊर्जा $K = p^2/2m$

अतः, $\lambda = h/\sqrt{2mK}$

समान गतिज ऊर्जा K के लिए किसी कण से संबद्ध दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य उसके द्रव्यमान के वर्गमूल के व्युत्क्रमानुपाती है। प्रोटॉन $\left({}_1^1\text{H}\right)$ इलेक्ट्रॉन से 1836 गुना भारी है तथा α-कण $\left({}_2^4\text{He}\right)$ प्रोटॉन से चार गुना भारी है।

अतः α – कण की दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य न्यूनतम होगी।

द्रव्य तरंगों का प्रायिकता अर्थ

यहाँ इस बात पर विचार करना उचित होगा कि किसी कण (जैसे इलेक्ट्रॉन), से संबंधित द्रव्य-तरंग का क्या अर्थ है। वास्तव में, अभी तक द्रव्य तथा विकिरण के द्वैत प्रकृति की एक वस्तुतः संतोषजनक भौतिक समझ विकसित नहीं हो सकी है। क्वांटम-यांत्रिकी के महान संस्थापकों (नील्स बोहर, अल्बर्ट आइंस्टाइन और कई अन्य) ने इस तथा इससे संबंधित संकल्पनाओं के साथ बहुत समय तक संघर्ष किया। अब भी क्वांटम-यांत्रिकी की गहन भौतिक व्याख्या सक्रिय शोध का विषय बना हुआ है। इसके होते हुए भी, द्रव्य-तरंग की संकल्पना को बड़ी सफलता के साथ आधुनिक क्वांटम-यांत्रिकी में गणितीय तौर पर प्रविष्ट किया गया है। इस संबंध में एक महत्वपूर्ण उपलब्धि यह है कि जब मैक्स बॉर्न (1882-1970) ने द्रव्य-तरंग के आयाम की एक प्रायिकता-व्याख्या सुझाई। इसके अनुसार, किसी बिंदु पर द्रव्य-तरंग की तीव्रता (आयाम का वर्ग) उस बिंदु पर कण का प्रायिकता-घनत्व निर्धारित करता है। प्रायिकता घनत्व का अर्थ प्रायिकता प्रति इकाई आयतन है। इस प्रकार, यदि किसी बिंदु पर A तरंग का आयाम है तो $|A|^2\,\Delta V$ उस बिंदु के चारों ओर ΔV लघु आयतन में उस कण के पाए जाने की प्रायिकता है। अतः किसी विशिष्ट क्षेत्र में यदि द्रव्य-तरंग की तीव्रता अधिक है, तब उसकी तुलना में जहाँ तीव्रता कम है, कण के पाए जाने की प्रायिकता अधिक होगी।

उदाहरण 11.6

उदाहरण 11.6 एक कण, इलेक्ट्रॉन की अपेक्षा तीन गुना अधिक चाल से गति कर रहा है। इस कण की दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य का इलेक्ट्रॉन की दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य से अनुपात 1.813×10^{-4} है। कण के द्रव्यमान का परिकलन कीजिए तथा कण को पहचानिए।

हल

गति करते हुए कण (द्रव्यमान m तथा वेग v) की दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य

उदाहरण 11.6

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

द्रव्यमान $m = h/\lambda v$

इलेक्ट्रॉन का द्रव्यमान $m_e = h/\lambda_e v_e$

हमें ज्ञात है कि $v/v_e = 3$ तथा

$\lambda/\lambda_e = 1.813 \times 10^{-4}$

कण का द्रव्यमान, $m = m_e \left(\frac{\lambda_e}{\lambda}\right)\left(\frac{v_e}{v}\right)$

$m = (9.11 \times 10^{-31}\ \text{kg}) \times (1/3) \times (1/1.813 \times 10^{-4})$

$m = 1.675 \times 10^{-27}\ \text{kg}$

इस द्रव्यमान का कण प्रोटॉन या न्यूट्रॉन हो सकता है।

उदाहरण 11.7

उदाहरण 11.7 100 V के विभवांतर द्वारा त्वरित किसी इलेक्ट्रॉन से संबंधित दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य का परिकलन कीजिए।

हल त्वरक विभव $V = 100$ V

दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य λ होगी

$$\lambda = h/p = \frac{1.227}{\sqrt{V}}\ \text{nm}$$

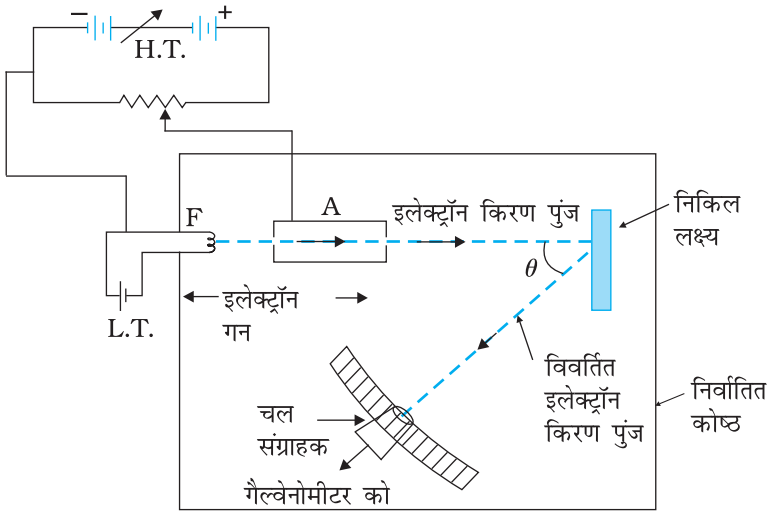
$$\lambda = \frac{1.227}{\sqrt{100}}\ \text{nm} = 0.123\ \text{nm}$$

इलेक्ट्रॉन से संबंधित दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य X-किरण तरंगदैर्घ्यों की कोटि की है।

11.9 डेविसन तथा जर्मर प्रयोग

इलेक्ट्रॉन की तरंग प्रकृति प्रायोगिक तौर पर सर्वप्रथम सी.जे. डेविसन तथा एल.एच. जर्मर के द्वारा 1927 में तथा स्वतंत्र रूप से जी.पी. टॉमसन के द्वारा 1928 में सत्यापित की गई थी। इन वैज्ञानिकों ने इलेक्ट्रॉनों के किरण-पुंज का क्रिस्टलों से प्रकीर्णन के द्वारा विवर्तन प्रभाव का प्रेक्षण किया था। सी.जे. डेविसन (1881-1958) और जी.पी. टॉमसन (1892-1975) ने क्रिस्टल के द्वारा इलेक्ट्रॉनों के विवर्तन की प्रायोगिक खोज के लिए 1937 में संयुक्त रूप से नोबेल पुरस्कार प्राप्त किया।

डेविसन तथा जर्मर की प्रायोगिक व्यवस्था चित्र 11.7 में दर्शायी गई है। इसमें एक 'इलेक्ट्रॉन गन' होती है जो एक टंगस्टन तंतु F की बनी होती है, जिस पर बेरियम ऑक्साइड का लेप होता है। इसे कम विभव (L.T. बैटरी) से गर्म किया जाता है। किसी उच्च वोल्टता ऊर्जा स्रोत (HT बैटरी) द्वारा उपयुक्त विभव/वोल्टता



चित्र 11.7 डेविसन-जर्मर इलेक्ट्रॉन विवर्तन व्यवस्था।

के अनुप्रयोग से तंतु द्वारा उत्सर्जित इलेक्ट्रॉनों को ऐच्छिक वेग तक त्वरित किया जाता है। इन्हें एक बेलन जिसमें इसके अक्ष के समांतर पतले छिद्र होते हैं, से पारित करके एक पतले किरण-पुंज के रूप में समांतरित कर लिया जाता है। इस किरण-पुंज को एक निकिल क्रिस्टल के पृष्ठ पर डाला जाता है। क्रिस्टल के परमाणुओं के द्वारा इलेक्ट्रॉन सभी दिशाओं में प्रकीर्णित होते हैं। किसी दिशा में प्रकीर्णित इलेक्ट्रॉन किरण-पुंज की तीव्रता को इलेक्ट्रॉन संसूचक (संग्राहक) के द्वारा मापा जाता है। संसूचक को वृत्ताकार मापनी पर घुमाया जा सकता है और एक सुग्राही गैल्वेनोमीटर के साथ संयोजित कर दिया जाता है, जो धारा को अंकित करता है। गैल्वेनोमीटर में विक्षेप संग्राहक में प्रवेश करने वाले इलेक्ट्रॉन किरण-पुंज की तीव्रता के अनुक्रमानुपाती होता है। इस उपकरण को एक निर्वातित कोष्ठ में परिबद्ध कर देते हैं। संसूचक को वृत्ताकार मापनी पर विभिन्न स्थितियों में घुमाकर, प्रकीर्णित इलेक्ट्रॉन किरण-पुंज की तीव्रता को विभिन्न अक्षांश कोण के मान के लिए (अथवा प्रकीर्णन के कोण) θ को मापते हैं, जो कि आपतित और प्रकीर्णित इलेक्ट्रॉन किरण पुंजों के बीच का कोण होता है। प्रकीर्णित इलेक्ट्रॉनों की तीव्रता (I) में प्रकीर्णन कोण θ के साथ परिवर्तन को विभिन्न त्वरण विभवों के लिए प्राप्त किया जाता है।

त्वरक विभव के 44 V से 68 V के परास के लिए इस प्रयोग को संपन्न किया गया डेविसन-जर्मर प्रयोग के परिणामों को दर्शाया गया है। यह पाया गया कि एक तीक्ष्ण विवर्तन उच्चिष्ठ के संगत एक प्रबल शिखर, त्वरक विभव 54 V तथा प्रकीर्णन कोण $\theta = 50^{\circ}$ पर इलेक्ट्रॉन वितरण में, प्रकट होती है। एक विशिष्ट दिशा में शिखर का यह प्रकटन क्रिस्टल के परमाणुओं के समान अंतराल की परतों से इलेक्ट्रॉनों के संपोषी व्यतिकरण के कारण होता है। इलेक्ट्रॉन विवर्तन मापन से द्रव्य-तरंग का तरंगदैर्घ्य 0.165 nm प्राप्त किया गया।

दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य λ [समीकरण (11.11) के उपयोग से] $V = 54$ V के लिए इलेक्ट्रॉन का मान निम्न होगा :

$$\lambda = h/p = \frac{1.227}{\sqrt{V}} \text{ nm}$$

$$\lambda = \frac{1.227}{\sqrt{54}} \text{ nm} = 0.167 \text{ nm}$$

अत: दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य के सैद्धांतिक तथा प्रयोग द्वारा प्राप्त मानों में उत्तम सहमति है। डेविसन-जर्मर प्रयोग इस प्रकार प्रभावशाली रूप से इलेक्ट्रॉनों की तरंग प्रकृति तथा दे ब्रॉग्ली संबंध की पुष्टि करता है। प्रकाश की तरंग-प्रकृति के लिए किए गए द्विझिरी प्रयोग के समरूप इलेक्ट्रॉन पुंज की तरंग-प्रकृति को सन् 1989 में प्रायोगिक रूप से प्रदर्शित किया गया। सन् 1994 में भी आयोडीन अणुओं (जो इलेक्ट्रॉनों की तुलना में लगभग दस लाख गुना भारी हैं) के साथ व्यतिकरण फ्रिंजें प्राप्त की जा चुकी हैं।

दे ब्रॉग्ली की परिकल्पना आधुनिक क्वांटम यांत्रिकी के विकास में आधार रही है। इसने इलेक्ट्रॉन-प्रकाशिकी विषय को भी विकसित किया है। इलेक्ट्रॉन के तरंगीय गुणों का उपयोग इलेक्ट्रॉन-सूक्ष्मदर्शी के निर्माण में किया गया है, जो प्रकाश-सूक्ष्मदर्शी की तुलना में उच्चतर विभेदन के कारण एक बहुत बड़ा सुधार है।

इलेक्ट्रॉन-सूक्ष्मदर्शी का विकास
http://www.nobelprize.org

सारांश

1. किसी इलेक्ट्रॉन को धातु से बाहर निकालने के लिए न्यूनतम ऊर्जा को धातु का कार्य-फलन कहते हैं। धातु-पृष्ठ से इलेक्ट्रॉन-उत्सर्जन के लिए आवश्यक ऊर्जा (कार्य-फलन ϕ_0 से अधिक) को उपयुक्त तापन अथवा प्रबल विद्युत क्षेत्र अथवा उपयुक्त आवृत्ति के प्रकाश द्वारा विकिरित करने से दी जा सकती है।
2. प्रकाश-विद्युत प्रभाव धातुओं से उपयुक्त आवृत्ति के प्रकाश से प्रदीप्त करने पर इलेक्ट्रॉनों के उत्सर्जन की परिघटना है। कुछ धातु पराबैंगनी प्रकाश से प्रतिक्रिया करते हैं जबकि दूसरे दृश्य-प्रकाश के लिए भी सुग्राही हैं। प्रकाश-विद्युत प्रभाव में प्रकाश ऊर्जा का वैद्युत ऊर्जा में रूपांतरण होता है। यह ऊर्जा के संरक्षण के नियम का पालन करता है। प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन एक तात्क्षणिक प्रक्रिया है और इसके कुछ विशिष्ट लक्षण होते हैं।
3. प्रकाश-विद्युत धारा (i) आपतित प्रकाश की तीव्रता, (ii) दो इलेक्ट्रोडों के बीच लगाया गया विभवांतर, और (iii) उत्सर्जक के पदार्थ की प्रकृति पर निर्भर करती है।
4. रोधक विभव (V_0) (i) आपतित प्रकाश की आवृत्ति और (ii) उत्सर्जक पदार्थ की प्रकृति पर निर्भर करता है। आपतित प्रकाश की किसी दी हुई आवृत्ति के लिए, यह इसकी तीव्रता पर निर्भर नहीं करता है। रोधक विभव का उत्सर्जित इलेक्ट्रॉनों की उच्चतम गतिज ऊर्जा से संबंधित है: $e V_0 = \frac{1}{2} m v_{\text{उच्च}}^2 = K_{\text{उच्च}}$
5. एक निश्चित आवृत्ति (देहली आवृत्ति) ν_0 के नीचे जो धातु का अभिलक्षण है, कोई प्रकाश-विद्युत उत्सर्जित नहीं होता चाहे आपतित प्रकाश की तीव्रता कितनी भी अधिक क्यों न हो।
6. क्लासिकी तरंग-सिद्धांत प्रकाश-विद्युत प्रभाव के मुख्य लक्षणों की व्याख्या नहीं कर सका। इसका विकिरण से ऊर्जा का संतत अवशोषण का चित्रण $K_{\text{उच्च}}$ की तीव्रता से स्वतंत्रता, ν_0 के अस्तित्व और इस प्रक्रिया की तात्क्षणिक प्रकृति की व्याख्या नहीं कर सका। आइंस्टाइन ने इन लक्षणों की व्याख्या प्रकाश के फ़ोटॉन-चित्रण के आधार पर की। इसके अनुसार प्रकाश, ऊर्जा के विविक्त पैकेटों से बना है, जिन्हें क्वांटा अथवा फ़ोटॉन कहते हैं। प्रत्येक फोटॉन की ऊर्जा $E (= h\nu)$ और संवेग $p (= h/\lambda)$ होता है, जो कि आपतित प्रकाश की आवृत्ति (ν) पर निर्भर करते हैं परंतु इसकी तीव्रता पर निर्भर नहीं करते। धातु के पृष्ठ से प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन एक इलेक्ट्रॉन के द्वारा फ़ोटॉन के अवशोषण से होता है।
7. आइंस्टाइन का प्रकाश-विद्युत समीकरण ऊर्जा संरक्षण नियम के संगत है जैसा कि धातु में एक इलेक्ट्रॉन के द्वारा फ़ोटॉन अवशोषण में लागू होता है। उच्चतम गतिज ऊर्जा ($\frac{1}{2} m v_{\text{उच्च}}^2$) फ़ोटॉन-ऊर्जा ($h\nu$) तथा लक्ष्य धातु कार्य-फलन $\phi_0 (= h\nu_0)$ के अंतर के बराबर होती है।
$$\frac{1}{2} m v_{\text{उच्च}}^2 = V_0 e = h\nu - \phi_0 = h(\nu - \nu_0)$$
इस प्रकाश-विद्युत समीकरण से प्रकाश-विद्युत प्रभाव के सभी लक्षणों की व्याख्या होती है। मिलिकन के प्रथम परिशुद्ध प्रकाश-विद्युत मापनों ने आइंस्टाइन के प्रकाश-विद्युत समीकरण को संपुष्ट किया और प्लैंक-स्थिरांक (h) के यथार्थ मान को प्राप्त किया। इससे आइंस्टाइन द्वारा प्रवर्तित वैद्युतचुंबकीय विकिरण का कण अथवा फ़ोटॉन वर्णन (प्रकृति) स्वीकृत हुआ।
8. विकिरण की द्वैत प्रकृति होती है : तरंग तथा कण। प्रयोग के स्वरूप पर यह निर्धारित होता है कि तरंग अथवा कण के रूप में वर्णन प्रयोग के परिणाम को समझने के लिए सर्वाधिक उपयुक्त है। इस तर्क के साथ कि विकिरण तथा पदार्थ प्रकृति में सममित हैं, लुइस दे ब्रॉग्ली के पदार्थ (पदार्थ कणों) को तरंग जैसा लक्षण प्रदान किया। गतिमान पदार्थ-कणों से जुड़ी तरंगों को पदार्थ तरंग अथवा दे ब्रॉग्ली तरंग कहते हैं।

9. गतिमान कण से संबंधित दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य (λ) इसके संवेग p से इस प्रकार संबंधित है : $\lambda = h/p$ । पदार्थ का द्वैत दे ब्रॉग्ली संबंध, जिसमें तरंग संकल्पना (λ) और कण संकल्पना (p) सम्मिलित हैं, में अंतर्निष्ठ है। दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य पदार्थ-कण के आवेश तथा इसकी प्रकृति से स्वतंत्र है। यह सार्थकता: केवल उप-परमाण्विक कणों, जैसे – इलेक्ट्रॉन, प्रोटॉन आदि (इनके द्रव्यमान अर्थात संवेग की लघुता के कारण) के लिए ही परिमेय (क्रिस्टलों में परमाण्वीय समतलों के बीच की दूरी की कोटि का) है। तथापि यह वास्तव में उन स्थूल वस्तुओं के लिए जो सामान्यत: प्रतिदिन जीवन में मिलती हैं और मापन की सीमा के बिलकुल बाहर है, बहुत छोटा है।
10. डेविसन-जर्मर के तथा जी. पी. टॉमसन के द्वारा इलेक्ट्रॉन विवर्तन प्रयोगों तथा बाद के कई प्रयोगों ने इलेक्ट्रॉन की तरंग-प्रकृति को सत्यापित तथा पुष्ट किया है। पदार्थ तरंग की दे ब्रॉग्ली परिकल्पना, बोहर की स्थायी कक्षा की संकल्पना का समर्थन करती है।

भौतिक राशि	प्रतीक	विमाएँ	मात्रक	टिप्पणी
प्लांक स्थिरांक	h	$[ML^2T^{-1}]$	J s	$E = h\nu$
निरोधक विभव	V_0	$[ML^2T^{-3}A^{-1}]$	V	$eV_0 = K_{उच्च}$
कार्य-फलन	ϕ_0	$[ML^2T^{-2}]$	J; eV	$K_{उच्च} = E - \phi_0$
देहली आवृत्ति	ν_0	$[T^{-1}]$	Hz	$\nu_0 = \phi_0/h$
दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य	λ	[L]	m	$\lambda = h/p$

विचारणीय विषय

1. किसी धातु में मुक्त इलेक्ट्रॉन इस अर्थ में मुक्त हैं कि वे धातु के भीतर एक स्थिर विभव के अंतर्गत गतिमान होते हैं (यह केवल एक सन्निकटन है)। वे धातु के बाहर निकलने के लिए मुक्त नहीं होते हैं। उन्हें धातु से बाहर जाने के लिए अतिरिक्त ऊर्जा की आवश्यकता होती है।
2. किसी धातु में सभी मुक्त इलेक्ट्रॉनों की ऊर्जा समान नहीं होती। किसी गैस जार में अणुओं के जैसे, एक दिए गए ताप पर इलेक्ट्रॉनों का एक निश्चित ऊर्जा वितरण होता है। यह वितरण उस सामान्य मैक्सवेल वितरण से भिन्न होता है जिसे आप गैसों के गतिज सिद्धांत के अध्ययन में पढ़ चुके हैं। इसके विषय में आप बाद के पाठ्यक्रमों में जानेंगे, परंतु भिन्नता का संबंध इस तथ्य से है कि इलेक्ट्रॉन पॉली के अपवर्जन के सिद्धांत का अनुसरण करते हैं।
3. किसी धातु में मुक्त इलेक्ट्रॉनों के ऊर्जा वितरण के कारण, धातु से बाहर आने के लिए इलेक्ट्रॉन के द्वारा अपेक्षित ऊर्जा भिन्न इलेक्ट्रॉनों के लिए भिन्न होती है। उच्चतर ऊर्जा वाले इलेक्ट्रॉनों की धातु से बाहर आने के लिए कम ऊर्जा वाले इलेक्ट्रॉनों की तुलना में कम अतिरिक्त ऊर्जा

की आवश्यकता होती है। कार्य-फलन धातु से बाहर निकलने के लिए किसी इलेक्ट्रॉन के द्वारा अपेक्षित न्यूनतम ऊर्जा है।

4. प्रकाश-विद्युत प्रभाव से संबंधित प्रयोगों में केवल यही अंतर्निहित है कि द्रव्य के साथ प्रकाश की अन्योन्य क्रिया में ऊर्जा का अवशोषण $h\nu$ की विविक्त इकाइयों में होता है। यह बिलकुल ही ऐसा कहने के समान नहीं है कि प्रकाश ऐसे कणों से बना है जिनमें प्रत्येक की ऊर्जा $h\nu$ है।

5. निरोधी विभव पर प्रेक्षण (इसकी तीव्रता पर अनिर्भरता और आवृत्ति पर निर्भरता) प्रकाश-विद्युत प्रभाव के तरंग-चित्रण और फ़ोटॉन-चित्रण के बीच निर्णायक विभेदकारक है।

6. सूत्र $\lambda = \frac{h}{p}$ के द्वारा दिया गया पदार्थ-तरंग का तरंगदैर्घ्य का भौतिकीय महत्त्व है, इसके कला-वेग v_p का कोई भौतिकीय महत्त्व नहीं होता है। तथापि, पदार्थ-तरंग का समूह-वेग भौतिकतया अर्थपूर्ण है और कण के वेग के बराबर होता है।

अभ्यास

11.1 30 kV इलेक्ट्रॉनों के द्वारा उत्पन्न X-किरणों की (a) उच्चतम आवृत्ति तथा (b) निम्नतम तरंगदैर्घ्य प्राप्त कीजिए।

11.2 सीज़ियम धातु का कार्य-फलन 2.14 eV है। जब 6×10^{14} Hz आवृत्ति का प्रकाश धातु-पृष्ठ पर आपतित होता है, इलेक्ट्रॉनों का प्रकाशिक उत्सर्जन होता है।
(a) उत्सर्जित इलेक्ट्रॉनों की उच्चतम गतिज ऊर्जा,
(b) निरोधी विभव, और
(c) उत्सर्जित प्रकाशिक इलेक्ट्रॉनों की उच्चतम चाल कितनी है?

11.3 एक विशिष्ट प्रयोग में प्रकाश-विद्युत प्रभाव की अंतक वोल्टता 1.5 V है। उत्सर्जित प्रकाशिक इलेक्ट्रॉनों की उच्चतम गतिज ऊर्जा कितनी है?

11.4 632.8 nm तरंगदैर्घ्य का एकवर्णी प्रकाश एक हीलियम-नियॉन लेसर के द्वारा उत्पन्न किया जाता है। उत्सर्जित शक्ति 9.42 mW है।
(a) प्रकाश के किरण-पुंज में प्रत्येक फ़ोटॉन की ऊर्जा तथा संवेग प्राप्त कीजिए,
(b) इस किरण-पुंज के द्वारा विकिरित किसी लक्ष्य पर औसतन कितने फ़ोटॉन प्रति सेकंड पहुँचेंगे? (यह मान लीजिए कि किरण-पुंज की अनुप्रस्थ काट एकसमान है जो लक्ष्य के क्षेत्रफल से कम है), तथा
(c) एक हाइड्रोजन परमाणु को फ़ोटॉन के बराबर संवेग प्राप्त करने के लिए कितनी तेज़ चाल से चलना होगा?

11.5 पृथ्वी के पृष्ठ पर पहुँचने वाला सूर्य-प्रकाश का ऊर्जा-अभिवाह (फ्लक्स) 1.388×10^3 W/m^2 है। लगभग कितने फ़ोटॉन प्रति वर्ग मीटर प्रति सेकंड पृथ्वी पर आपतित होते हैं? यह मान लें कि सूर्य-प्रकाश में फ़ोटॉन का औसत तरंगदैर्घ्य 550 nm है।

11.6 प्रकाश-विद्युत प्रभाव के एक प्रयोग में, प्रकाश आवृत्ति के विरुद्ध अंतक वोल्टता की ढलान 4.12×10^{-15} V s प्राप्त होती है। प्लांक स्थिरांक का मान परिकलित कीजिए।

11.7 एक 100 W सोडियम बल्ब (लैंप) सभी दिशाओं में एकसमान ऊर्जा विकिरित करता है। लैंप को एक ऐसे बड़े गोले के केंद्र पर रखा गया है जो इस पर आपतित सोडियम के संपूर्ण प्रकाश को अवशोषित करता है। सोडियम प्रकाश का तरंगदैर्घ्य 589 nm है। (a) सोडियम प्रकाश से जुड़े प्रति फ़ोटॉन की ऊर्जा कितनी है? (b) गोले को किस दर से फ़ोटॉन प्रदान किए जा रहे हैं?

11.8 किसी धातु की देहली आवृत्ति 3.3×10^{14} Hz है। यदि 8.2×10^{14} Hz आवृत्ति का प्रकाश धातु पर आपतित हो, तो प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन के लिए अंतक वोल्टता ज्ञात कीजिए।

11.9 किसी धातु के लिए कार्य-फलन 4.2 eV है। क्या यह धातु 330 nm तरंगदैर्घ्य के आपतित विकिरण के लिए प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन देगा?

11.10 7.21×10^{14} Hz आवृत्ति का प्रकाश एक धातु-पृष्ठ पर आपतित है। इस पृष्ठ से 6.0×10^5 m/s की उच्चतम गति से इलेक्ट्रॉन उत्सर्जित हो रहे हैं। इलेक्ट्रॉनों के प्रकाश उत्सर्जन के लिए देहली आवृत्ति क्या है?

11.11 488 nm तरंगदैर्घ्य का प्रकाश एक ऑर्गन लेसर से उत्पन्न किया जाता है, जिसे प्रकाश-विद्युत प्रभाव के उपयोग में लाया जाता है। जब इस स्पेक्ट्रमी-रेखा के प्रकाश को उत्सर्जक पर आपतित किया जाता है तब प्रकाशिक इलेक्ट्रॉनों का निरोधी (अंतक) विभव 0.38 V है। उत्सर्जक के पदार्थ का कार्य-फलन ज्ञात करें।

11.12 56 V विभवांतर के द्वारा त्वरित इलेक्ट्रॉनों का
(a) संवेग, और
(b) दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य परिकलित कीजिए।

11.13 एक इलेक्ट्रॉन जिसकी गतिज ऊर्जा 120 eV है, उसका
(a) संवेग, (b) चाल और (c) दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य क्या है?

11.14 सोडियम के स्पेक्ट्रमी उत्सर्जन रेखा के प्रकाश का तरंगदैर्घ्य 589 nm है। वह गतिज ऊर्जा ज्ञात कीजिए जिस पर
(a) एक इलेक्ट्रॉन, और (b) एक न्यूट्रॉन का दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य समान होगा।

11.15 (a) एक 0.040 kg द्रव्यमान का बुलेट जो 1.0 km/s की चाल से चल रहा है, (b) एक 0.060 kg द्रव्यमान की गेंद जो 1.0 km/s की चाल से चल रही है, और (c) एक धूल-कण जिसका द्रव्यमान 1.0×10^{-9} kg और जो 2.2 m/s की चाल से अनुगमित हो रहा है, का दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य कितना होगा?

11.16 एक इलेक्ट्रॉन और एक फ़ोटॉन प्रत्येक का तरंगदैर्घ्य 1.00 nm है।
(a) इनका संवेग,
(b) फोटॉन की ऊर्जा, और
(c) इलेक्ट्रॉन की गतिज ऊर्जा ज्ञात कीजिए।

11.17 (a) न्यूट्रॉन की किस गतिज ऊर्जा के लिए दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य 1.40×10^{-10} m होगा?
(b) एक न्यूट्रॉन, जो पदार्थ के साथ तापीय साम्य में है और जिसकी 300 K पर औसत गतिज ऊर्जा $\frac{3}{2} kT$ है, का भी दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य ज्ञात कीजिए।

11.18 यह दर्शाइए कि वैद्युतचुंबकीय विकिरण का तरंगदैर्घ्य इसके क्वांटम (फ़ोटॉन) के तरंगदैर्घ्य के बराबर है।

11.19 वायु में 300 K ताप पर एक नाइट्रोजन अणु का दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य कितना होगा? यह मानें कि अणु इस ताप पर अणुओं के चाल वर्ग माध्य से गतिमान है। (नाइट्रोजन का परमाणु द्रव्यमान = 14.0076 u)

अतिरिक्त अभ्यास

11.20 (a) एक निर्वात नली के तापित कैथोड से उत्सर्जित इलेक्ट्रॉनों की उस चाल का आकलन कीजिए जिससे वे उत्सर्जक की तुलना में 500 V के विभवांतर पर रखे गए एनोड से टकराते हैं। इलेक्ट्रॉनों के लघु प्रारंभिक चालों की उपेक्षा कर दें। इलेक्ट्रॉन का आपेक्षिक आवेश अर्थात e/m 1.76×10^{11} C kg^{-1} है।
(b) संग्राहक विभव 10 MV के लिए इलेक्ट्रॉन की चाल ज्ञात करने के लिए उसी सूत्र का प्रयोग करें, जो (a) में काम में लाया गया है। क्या आप इस सूत्र को गलत पाते हैं? इस सूत्र को किस प्रकार सुधारा जा सकता है?

11.21 (a) एक समोर्जी इलेक्ट्रॉन किरण-पुंज जिसमें इलेक्ट्रॉन की चाल 5.20×10^6 m s^{-1} है, पर एक चुंबकीय क्षेत्र 1.30×10^{-4} T किरण-पुंज की चाल के लंबवत लगाया जाता है। किरण-पुंज द्वारा आरेखित वृत्त की त्रिज्या कितनी होगी, यदि इलेक्ट्रॉन के e/m का मान 1.76×10^{11} C kg^{-1} है।

(b) क्या जिस सूत्र को (a) में उपयोग में लाया गया है वह यहाँ भी एक 20 MeV इलेक्ट्रॉन किरण-पुंज की त्रिज्या परिकलित करने के लिए युक्तिपरक है? यदि नहीं तो किस प्रकार इसमें संशोधन किया जा सकता है?

[**नोट** : अभ्यास 11.20 (b) तथा 11.21 (b) आपको आपेक्षिकीय यांत्रिकी तक ले जाते हैं जो इस पुस्तक के विषय के बाहर है। यहाँ पर इन्हें इस बिंदु पर बल देने के लिए सम्मिलित किया गया है कि जिन सूत्रों को आप (a) में उपयोग में लाते हैं वे बहुत उच्च चालों अथवा ऊर्जाओं पर युक्तिपरक नहीं होते। यह जानने के लिए कि 'बहुत उच्च चाल अथवा ऊर्जा' का क्या अर्थ है? अंत में दिए गए उत्तरों को देखें]

11.22 एक इलेक्ट्रॉन गन जिसका संग्राहक 100 V विभव पर है, एक कम दाब (~10^{-2} mm Hg) पर हाइड्रोजन से भरे गोलाकार बल्ब में इलेक्ट्रॉन छोड़ती है। एक चुंबकीय क्षेत्र जिसका मान 2.83×10^{-4} T है, इलेक्ट्रॉन के मार्ग को 12.0 cm त्रिज्या के वृत्तीय कक्षा में वक्रित कर देता है। (इस मार्ग को देखा जा सकता है क्योंकि मार्ग में गैस आयन किरण-पुंज को इलेक्ट्रॉनों को आकर्षित करके और इलेक्ट्रॉन प्रग्रहण के द्वारा प्रकाश उत्सर्जन करके फ़ोकस करते हैं; इस विधि को 'परिष्कृत किरण-पुंज नली' विधि कहते हैं।) आँकड़ों से e/m का मान निर्धारित कीजिए।

11.23 (a) एक X-किरण नली विकिरण का एक संतत स्पेक्ट्रम जिसका लघु तरंगदैर्घ्य सिरा 0.45 Å पर है, उत्पन्न करता है। विकिरण में किसी फ़ोटॉन की उच्चतम ऊर्जा कितनी है?

(b) अपने (a) के उत्तर से अनुमान लगाइए कि किस कोटि की त्वरक वोल्टता (इलेक्ट्रॉन के लिए) की इस नली में आवश्यकता है?

11.24 एक त्वरित्र (accelerator) प्रयोग में पाज़िट्रॉनों (e^+) के साथ इलेक्ट्रॉनों के उच्च-ऊर्जा संघट्टन पर, एक विशिष्ट घटना की व्याख्या कुल ऊर्जा 10.2 BeV के इलेक्ट्रॉन-पाज़िट्रॉन युग्म के बराबर ऊर्जा की दो γ-किरणों में विलोपन के रूप में की जाती है। प्रत्येक γ-किरण से संबंधित तरंगदैर्घ्यों के मान क्या होंगे? (1BeV = 10^9 eV)

11.25 आगे आने वाली दो संख्याओं का आकलन रोचक हो सकता है। पहली संख्या यह बताएगी कि रेडियो अभियांत्रिक फ़ोटॉन की अधिक चिंता क्यों नहीं करते। दूसरी संख्या आपको यह बताएगी कि हमारे नेत्र 'फ़ोटॉनों की गिनती' क्यों नहीं कर सकते, भले ही प्रकाश साफ़-साफ़ संसूचन योग्य हो।

(a) एक मध्य तरंग (medium wave) 10 kW सामर्थ्य के प्रेषी, जो 500 m तरंगदैर्घ्य की रेडियो तरंग उत्सर्जित करता है, के द्वारा प्रति सेकंड उत्सर्जित फ़ोटॉनों की संख्या।

(b) निम्नतम तीव्रता का श्वेत प्रकाश जिसे हम देख सकते हैं (~10^{-10} W m^{-2}) के संगत फोटॉनों की संख्या जो प्रति सेकंड हमारे नेत्रों की पुतली में प्रवेश करती है। पुतली का क्षेत्रफल लगभग 0.4 cm^2 और श्वेत प्रकाश की औसत आवृत्ति को लगभग 6×10^{14} Hz मानिए।

11.26 एक 100 W पारद (Mercury) स्रोत से उत्पन्न 2271 Å तरंगदैर्घ्य का पराबैंगनी प्रकाश एक मालिब्डेनम धातु से निर्मित प्रकाश सेल को विकिरित करता है। यदि निरोधी विभव –1.3 V हो, तो धातु के कार्य-फलन का आकलन कीजिए। एक He-Ne लेसर द्वारा उत्पन्न 6328 Å के उच्च तीव्रता (~10^5 W m^{-2}) के लाल प्रकाश के साथ प्रकाश सेल किस प्रकार अनुक्रिया करेगा?

11.27 एक नियॉन लैंप से उत्पन्न 640.2 nm ($1nm = 10^{-9}m$) तरंगदैर्घ्य का एकवर्णी विकिरण टंगस्टन पर सीज़ियम से निर्मित प्रकाश-संवेदी पदार्थ को विकिरित करता है। निरोधी वोल्टता 0.54 V मापी जाती है। स्रोत को एक लौह-स्रोत से बदल दिया जाता है। इसकी 427.2 nm वर्ण-रेखा उसी प्रकाश सेल को विकिरित करती है। नयी निरोधी वोल्टता ज्ञात कीजिए।

11.28 एक पारद लैंप, प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन की आवृत्ति निर्भरता के अध्ययन के लिए एक सुविधाजनक स्रोत है, क्योंकि यह दृश्य-स्पेक्ट्रम के पराबैंगनी (UV) से लाल छोर तक कई वर्ण-रेखाएँ उत्सर्जित करता है। रूबीडियम प्रकाश सेल के हमारे प्रयोग में, पारद (Mercury) स्रोत की निम्न वर्ण-रेखाओं का प्रयोग किया गया :

$\lambda_1 = 3650$ Å, $\lambda_2 = 4047$ Å, $\lambda_3 = 4358$ Å, $\lambda_4 = 5461$ Å, $\lambda_5 = 6907$ Å,

निरोधी वोल्टताएँ, क्रमशः निम्न मापी गईं :

$V_{01} = 1.28$ V, $V_{02} = 0.95$ V, $V_{03} = 0.74$ V, $V_{04} = 0.16$ V, $V_{05} = 0$ V

(a) प्लैंक स्थिरांक h का मान ज्ञात कीजिए।

(b) धातु के लिए देहली आवृत्ति तथा कार्य-फलन का आकलन कीजिए।

[**नोट** : उपर्युक्त आँकड़ों से h का मान ज्ञात करने के लिए आपको $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C की आवश्यकता होगी। इस प्रकार के प्रयोग Na, Li, K आदि के लिए मिलिकन ने किए थे। मिलिकन ने अपने तेल-बूँद प्रयोग से प्राप्त e के मान का उपयोग कर आइंस्टाइन के प्रकाश-विद्युत समीकरण को सत्यापित किया तथा इन्हीं प्रेक्षणों से h के मान के लिए पृथक् अनुमान लगाया।]

11.29 निम्न धातुओं के कार्य-फलन निम्न प्रकार दिए गए हैं :

Na: 2.75 eV; K: 2.30 eV; Mo: 4.17 eV; Ni: 5.15 eV । इनमें धातुओं में से कौन प्रकाश सेल से 1 m दूर रखे गए He-Cd लेसर से उत्पन्न 3300 Å तरंगदैर्घ्य के विकिरण के लिए प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन नहीं देगा? लेसर को सेल के निकट 50 cm दूरी पर रखने पर क्या होगा?

11.30 10^{-5} Wm^{-2} तीव्रता का प्रकाश एक सोडियम प्रकाश सेल के 2 cm^2 क्षेत्रफल के पृष्ठ पर पड़ता है। यह मान लें कि ऊपर की सोडियम की पाँच परतें आपतित ऊर्जा को अवशोषित करती हैं, तो विकिरण के तरंग-चित्रण में प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन के लिए आवश्यक समय का आकलन कीजिए। धातु के लिए कार्य-फलन लगभग 2 eV दिया गया है। आपके उत्तर का क्या निहितार्थ है।

11.31 X-किरणों के प्रयोग अथवा उपयुक्त वोल्टता से त्वरित इलेक्ट्रानों से क्रिस्टल-विवर्तन प्रयोग किए जा सकते हैं। कौन-सी जाँच अधिक ऊर्जा संबद्ध है? (परिमाणिक तुलना के लिए, जाँच के लिए तरंगदैर्घ्य को 1 Å लीजिए, जो कि जालक (लेटिस) में अंतर-परमाणु अंतरण की कोटि का है) ($m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg)।

11.32 (a) एक न्यूट्रॉन, जिसकी गतिज ऊर्जा 150 eV है, का दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य प्राप्त कीजिए। जैसा कि आपने अभ्यास 11.31 में देखा है, इतनी ऊर्जा का इलेक्ट्रॉन किरण-पुंज क्रिस्टल विवर्तन प्रयोग के लिए उपयुक्त है। क्या समान ऊर्जा का एक न्यूट्रॉन किरण-पुंज इस प्रयोग के लिए समान रूप में उपयुक्त होगा? स्पष्ट कीजिए। ($m_n = 1.675 \times 10^{-27}$ kg)

(b) कमरे के सामान्य ताप (27 °C) पर ऊष्मीय न्यूट्रॉन से जुड़े दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य ज्ञात कीजिए। इस प्रकार स्पष्ट कीजिए कि क्यों एक तीव्रगामी न्यूट्रॉन को न्यूट्रॉन-विवर्तन प्रयोग में उपयोग में लाने से पहले वातावरण के साथ तापीकृत किया जाता है।

11.33 एक इलेक्ट्रॉन सूक्ष्मदर्शी में 50 kV वोल्टता के द्वारा त्वरित इलेक्ट्रॉनों का उपयोग किया जाता है। इन इलेक्ट्रॉनों से जुड़े दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य ज्ञात कीजिए। यदि अन्य बातों (जैसे कि संख्यात्मक द्वारक, आदि) को लगभग समान लिया जाए, इलेक्ट्रॉन सूक्ष्मदर्शी की विभेदन क्षमता की तुलना पीले प्रकाश का प्रयोग करने वाले प्रकाश सूक्ष्मदर्शी से किस प्रकार होती है?

11.34 किसी जाँच की तरंगदैर्घ्य उसके द्वारा कुछ विस्तार में जाँच की जा सकने वाली संरचना के आकार की लगभग आमाप है। प्रोटॉनों तथा न्यूट्रॉनों की क्वार्क (quark) संरचना 10^{-15} m या इससे भी कम लंबाई के लघु पैमाने की है। इस संरचना को सर्वप्रथम 1970 दशक के प्रारंभ में, एक

रेखीय त्वरित्र (Linear accelerator) से उत्पन्न उच्च ऊर्जा इलेक्ट्रॉनों के किरण-पुंजों के उपयोग द्वारा, स्टैनफ़ोर्ड, संयुक्त राज्य अमेरिका में जाँचा गया था। इन इलेक्ट्रॉन किरण-पुंजों की ऊर्जा की कोटि का अनुमान लगाइए। (इलेक्ट्रॉन की विराम द्रव्यमान ऊर्जा 0.511 MeV है।)

11.35 कमरे के ताप (27 °C) और 1 atm दाब पर He परमाणु से जुड़े प्रारूपी दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य ज्ञात कीजिए और इन परिस्थितियों में इसकी तुलना दो परमाणुओं के बीच औसत दूरी से कीजिए।

11.36 किसी धातु में (27 °C) पर एक इलेक्ट्रॉन का प्रारूपी दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य परिकलित कीजिए और इसकी तुलना धातु में दो इलेक्ट्रॉनों के बीच औसत पृथक्य से कीजिए जो लगभग 2×10^{-10} m दिया गया है।

[**नोट** : अभ्यास 11.35 और 11.36 प्रदर्शित करते हैं कि जहाँ सामान्य परिस्थितियों में गैसीय अणुओं से जुड़े तरंग पैकेट अ-अतिव्यापी हैं; किसी धातु में इलेक्ट्रॉन तरंग पैकेट प्रबल रूप से एक-दूसरे से अतिव्यापी हैं। यह सुझाता है कि जहाँ किसी सामान्य गैस में अणुओं की अलग पहचान हो सकती है, किसी धातु में इलेक्ट्रॉन की एक-दूसरे से अलग पहचान नहीं हो सकती। इस अप्रभेद्यता के कई मूल निहितार्थताएँ हैं जिन्हें आप भौतिकी के अधिक उच्च पाठ्यक्रमों में जानेंगे।]

11.37 निम्न प्रश्नों के उत्तर दीजिए :

(a) ऐसा विचार किया गया है कि प्रोटॉन और न्यूट्रॉन के भीतर क्वार्क पर आंशिक आवेश होते हैं [(+2/3)e ; (–1/3)e]। यह मिलिकन तेल-बूँद प्रयोग में क्यों नहीं प्रकट होते?

(b) e/m संयोग की क्या विशिष्टता है? हम e तथा m के विषय में अलग-अलग विचार क्यों नहीं करते?

(c) गैसें सामान्य दाब पर कुचालक होती हैं परंतु बहुत कम दाब पर चालन प्रारंभ कर देती हैं। क्यों?

(d) प्रत्येक धातु का एक निश्चित कार्य-फलन होता है। यदि आपतित विकिरण एकवर्णी हो तो सभी प्रकाशिक इलेक्ट्रॉन समान ऊर्जा के साथ बाहर क्यों नहीं आते हैं? प्रकाशिक इलेक्ट्रॉनों का एक ऊर्जा वितरण क्यों होता है?

(e) एक इलेक्ट्रॉन की ऊर्जा तथा इसका संवेग इससे जुड़े पदार्थ-तरंग की आवृत्ति तथा इसके तरंगदैर्घ्य के साथ निम्न प्रकार संबंधित होते हैं :

$$E = h\nu,\ p = \frac{h}{\lambda}$$

परंतु λ का मान जहाँ भौतिक महत्त्व का है, ν के मान (और इसलिए कला चाल $\nu\lambda$ का मान) का कोई भौतिक महत्त्व नहीं है। क्यों?

परिशिष्ट

11.1 तरंग तथा कण के उलट-पलट का इतिहास

प्रकाश क्या है? यह प्रश्न मानव जाति को लंबे समय तक परेशान करता रहा है। लगभग चार शताब्दी पहले, वैज्ञानिक तथा औद्योगिक युग के प्रारंभ के समय से ही वैज्ञानिकों द्वारा क्रमबद्ध प्रयोग किए गए। लगभग उसी समय, प्रकाश क्या है, इस संबंध में सैद्धांतिक मॉडल विकसित किए गए। विज्ञान की किसी भी शाखा में कोई मॉडल विकसित करते समय यह देखना आवश्यक है कि यह उस समय विद्यमान सभी प्रायोगिक प्रेक्षणों की व्याख्या कर सके। इसलिए, सत्रहवीं शताब्दी में प्रकाश के विषय में ज्ञात कुछ प्रेक्षणों का संक्षेपण उपयुक्त रहेगा।

उस समय ज्ञात प्रकाश के गुणों में सम्मिलित थे– (a) प्रकाश का सरल रेखीय पथ पर गमन, (b) समतल तथा गोलीय पृष्ठों से परावर्तन, (c) दो माध्यमों के अंतरापृष्ठ पर अपवर्तन, (d) विभिन्न वर्णों में प्रकाश का विक्षेपण, (e) उच्च चाल। पहली चार परिघटनाओं के लिए उचित नियमों को प्रतिपादित किया गया। उदाहरण के लिए, स्नेल ने सन् 1621 में अपवर्तन के नियमों को सूत्रबद्ध किया। गैलिलियो के समय से ही अनेक वैज्ञानिकों ने प्रकाश की चाल को मापने का प्रयत्न किया। लेकिन वे ऐसा करने में असमर्थ रहे। वे केवल यह निष्कर्ष निकाल पाए कि प्रकाश की चाल उनकी माप की सीमा से अधिक है।

सत्रहवीं शताब्दी में प्रकाश के दो मॉडल प्रस्तुत किए गए। सत्रहवीं शताब्दी के प्रारंभिक दशकों में दकार्ते ने प्रतिपादित किया कि प्रकाश कणों से बना है, जबकि सन् 1650-60 के आस पास हाइगेंस ने प्रस्तुत किया कि प्रकाश तरंगों से बना है। दकार्ते का प्रस्ताव मात्र एक दार्शनिक मॉडल था जिसमें प्रयोगों अथवा वैज्ञानिक तर्कों का अभाव था। शीघ्र ही, लगभग 1660-70 के आस पास न्यूटन ने दकार्ते के कणिका सिद्धांत का वैज्ञानिक सिद्धांत के रूप में विस्तार किया तथा इसकी सहायता से प्रकाश के अनेक गुणों की व्याख्या की गई। तरंगों के रूप में तथा कणों के रूप में प्रस्तुत करने वाले ये मॉडल एक दूसरे के बिलकुल विपरीत हैं। लेकिन दोनों ही मॉडल प्रकाश के सभी ज्ञात गुणों की व्याख्या करने में सक्षम थे। इन दोनों में से किसी को भी छाँटना कठिन था।

आगामी कुछ शताब्दियों में इन मॉडलों के विकास का इतिहास मनोरंजक है। सन् 1669 में, बारथोलिनस ने कुछ क्रिस्टलों में प्रकाश के द्विअपवर्तन की खोज की तथा शीघ्र ही सन् 1678 में हाइगेन्स ने अपने तरंग सिद्धांत के आधार पर इसकी व्याख्या की। इसके बावजूद, एक सौ वर्ष से भी अधिक समय तक न्यूटन का कणिका मॉडल अधिक विश्वसनीय माना जाता रहा तथा तरंग मॉडल की अपेक्षा अधिक पसंद किया जाता रहा।

इसका एक अंशत: कारण तो इस मॉडल की सरलता थी तथा अंशत: उस समय के समकालीन भौतिकशस्त्रियों पर न्यूटन का प्रभाव था।

सन् 1801 में यंग ने अपने द्विझिरी प्रयोग द्वारा व्यतिकरण फ्रिंजों का प्रेक्षण किया। इस परिघटना की व्याख्या केवल तरंग सिद्धांत द्वारा ही की जा सकती है। यह भी अनुभव किया गया कि विवर्तन एक अन्य परिघटना है जिसकी व्याख्या केवल तरंग सिद्धांत द्वारा ही की जा सकती है। वास्तव में यह प्रकाश के पथ में प्रत्येक बिंदु से निर्गमन होने वाली हाइगेंस के द्वितीयक तरंगिका का स्वाभाविक निष्कर्ष है। इन प्रयोगों की प्रकाश के कणिका सिद्धांत द्वारा व्याख्या नहीं की जा सकती। लगभग सन् 1810 में ध्रुवण की परिघटना की खोज हुई। इस परिघटना की व्याख्या भी तरंग सिद्धांत द्वारा ही स्वाभाविक रूप से की जा सकती है। इस प्रकार हाइगेंस का तरंग सिद्धांत अग्रभाग में आ गया तथा न्यूटन का कणिका सिद्धांत पृष्ठभूमि में चला गया। यह स्थिति पुन: लगभग एक शताब्दी तक चलती रही।

उन्नीसवीं शताब्दी में प्रकाश की चाल ज्ञात करने के लिए कुछ अच्छे प्रयोग किए गए। अधिक परिशुद्ध प्रयोग द्वारा निर्वात में प्रकाश की चाल का मान 3×10^8 m/s ज्ञात किया गया। लगभग सन् 1860 में, मैक्सवेल ने वैद्युतचुंबकत्व के लिए अपनी समीकरणें प्रस्तुत कीं तथा यह अनुभव किया गया कि उस समय ज्ञात सभी वैद्युतचुंबकीय परिघटनाओं की मैक्सवेल की चार समीकरणों द्वारा व्याख्या की जा सकती है। शीघ्र ही मैक्सवेल ने दर्शाया कि विद्युत तथा चुंबकीय क्षेत्र, वैद्युतचुंबकीय तरंगों के रूप में रिक्त आकाश (निर्वात) में संचारित किए जा सकते हैं। उसने इन तरंगों की चाल परिकलित की तथा इनके सैद्धांतिक मान 2.998×10^8 m/s प्राप्त किए। इस मान की प्रायोगिक मान से निकटता यह दर्शाती है कि प्रकाश वैद्युतचुंबकीय तरंगों से बना है। सन् 1887 में हर्ट्ज़ ने इन तरंगों की उत्पत्ति तथा संसूचन को प्रदर्शित किया। इसने प्रकाश के तरंग सिद्धांत को एक दृढ़ आधार प्रदान किया। हम कह सकते हैं कि अठारहवीं शताब्दी प्रकाश के कणिका मॉडल की तथा उन्नीसवीं शताब्दी प्रकाश के तरंग सिद्धांत की थी।

सन् 1850-1900 के समय के बीच भौतिकी एक बिलकुल भिन्न क्षेत्र, ऊष्मा तथा उससे संबंधित परिघटनाओं पर बड़ी संख्या में प्रयोग किए गए। अणुगति सिद्धांत तथा ऊष्मागतिकी जैसे सिद्धांत तथा मॉडल विकसित किए गए जिन्होंने सफलता पूर्वक, केवल एक को छोड़कर अनेक परिघटनाओं की व्याख्या की।

परिशिष्ट

प्रत्येक वस्तु, किसी भी ताप पर सभी तरंगदैर्घ्यों के विकिरण उत्सर्जित करती है। यह अपने ऊपर पड़ने वाले विकिरणों को अवशोषित भी करती है। कोई वस्तु जो अपने ऊपर पड़ने वाले सभी विकिरणों को अवशोषित कर लेती है, उसे *कृष्णिका* कहते हैं। भौतिकी में यह बिंदु द्रव्यमान अथवा एकसमान गति की अवधारणाओं की भाँति ही एक आदर्श अवधारणा है। किसी वस्तु द्वारा उत्सर्जित विकिरण की तीव्रता तथा इसकी तरंगदैर्घ्य के बीच खींचे गए ग्राफ को *कृष्णिका स्पेक्ट्रम* कहते हैं। उन दिनों में कोई भी सिद्धांत कृष्णिका स्पेक्ट्रम की पूरी तरह व्याख्या नहीं कर पाया।

सन् 1900 में, प्लैंक को एक नया विचार सूझा। उन्होंने कहा, यदि हम मान लें कि विकिरण तरंगों के रूप में संतत चलने की बजाय ऊर्जा के पैकेट के रूप में उत्सर्जित होते हैं, तो हम कृष्णिका स्पेक्ट्रम की व्याख्या कर सकते हैं। प्लैंक ने स्वयं इन क्वांटा अथवा पैकेट को प्रकाश की बजाय उत्सर्जन तथा अवशोषण का गुण माना। उन्होंने एक सूत्र व्युत्पन्न किया जो समस्त स्पेक्ट्रम के लिए सम्मत है। यह तरंग तथा कण चित्रण का एक उलझन-भरा मिश्रण है जिसके अनुसार विकिरण एक कण की भाँति उत्सर्जित होता है, यह एक तरंग की भाँति गमन करता है, तथा फिर से एक कण की भांति अवशोषित होता है। इसके अतिरिक्त, इसने भौतिकविज्ञानियों को दुविधा में डाल दिया। क्या केवल एक परिघटना की व्याख्या करने के लिए हम पुनः प्रकाश के कण चित्रण को स्वीकार कर लें? तब व्यतिकरण तथा विवर्तन की परिघटनाओं का क्या होगा, जिनकी व्याख्या कणिका मॉडल द्वारा नहीं की जा सकती।

लेकिन शीघ्र ही सन् 1905 में आइंसटाइन ने प्रकाश-विद्युत प्रभाव की व्याख्या प्रकाश के कणिका चित्रण द्वारा की। डिबाई ने क्रिस्टलीय ठोस में जालक कंपनों के लिए कण चित्रण का उपयोग करके ठोसों में निम्न ताप विशिष्ट ऊष्माओं की व्याख्या की। भौतिकी के व्यापक विविध क्षेत्रों से जुड़े होने पर भी इन दोनों परिघटनाओं की व्याख्या तरंग मॉडल से न होकर केवल कण मॉडल द्वारा ही की जा सकती है। सन् 1923 में कॉम्पटन के परमाणुओं से X-किरण प्रकीर्णन प्रयोग भी कण-चित्रण के पक्ष में ही गए। इसने वैज्ञानिकों की दुविधा को और बढ़ा दिया।

इस प्रकार 1923 तक भौतिकविज्ञानी निम्न स्थितियों का सामना कर रहे थे– (a) प्रकाश का ऋजुरेखीय संचरण, परावर्तन तथा अपवर्तन जैसी परिघटनाएँ जिनकी व्याख्या कणिका मॉडल अथवा तरंग मॉडल दोनों से ही की जा सकती है। (b) व्यतिकरण तथा विवर्तन जैसी कुछ ऐसी परिघटनाएँ थीं जिनकी व्याख्या कणिका मॉडल द्वारा नहीं की जा सकतीं, इन्हें केवल तरंग मॉडल द्वारा ही समझा जा सकता है। (c) कृष्णिका विकिरण, प्रकाश विद्युत प्रभाव, तथा कॉम्पटन प्रकीर्णन जैसी कुछ परिघटनाओं की व्याख्या तरंग मॉडल द्वारा नहीं की जा सकतीं, इनकी व्याख्या केवल कणिका मॉडल द्वारा ही की जा सकतीं है। उन दिनों में किसी ने ठीक ही टिप्पणी की, कि सोमवार, बुधवार तथा शुक्रवार के दिनों में प्रकाश कण की भाँति व्यवहार करता है तथा मंगलवार, बृहस्पतिवार तथा शनिवार के दिनों में यह तरंग की भाँति व्यवहार करता है तथा रविवारों को हम प्रकाश की बात ही नहीं करते।

सन् 1924 में दे ब्राग्ली ने अपने तरंग-कण के द्वैत सिद्धांत को प्रस्तुत किया जिसमें उन्होंने कहा कि केवल प्रकाश के फोटॉन ही नहीं लेकिन द्रव्य के कणों जैसे इलेक्ट्रॉन तथा परमाणुओं के भी द्वैत लक्षण होते हैं, कभी ये कण की भांति व्यवहार करते हैं और कभी तरंग की भाँति। उन्होंने उनके द्रव्यमान, वेग, संवेग (कण के लक्षणों) को उनकी तरंगदैर्घ्य तथा आवृत्ति (तरंग के विशिष्ट लक्षणों) से जोड़ने वाला एक सूत्र स्थापित किया। सन् 1927 में, टॉमसन तथा डेविसन और जर्मर ने अलग-अलग प्रयोगों द्वारा दर्शाया कि इलेक्ट्रॉन तरंग की भाँति व्यवहार करता है जिसकी तरंगदैर्घ्य दे ब्रॉग्ली के संबंध द्वारा प्राप्त मान से सहमति रखती है। उनका प्रयोग क्रिस्टलीय ठोसों द्वारा इलेक्ट्रॉन के विवर्तन पर आधारित था जिसमें परमाणुओं के नियमित प्रबंध ने एक ग्रेटिंग की भाँति कार्य किया। शीघ्र ही अन्य कणों जैसे न्यूट्रॉन तथा प्रोटॉन के साथ विवर्तन प्रयोग किए गए तथा इनसे भी दे ब्रॉग्ली के सूत्र की पुष्टि हुई। इसने तरंग-कण की द्वैतता को भौतिकी के स्थापित सिद्धांत के रूप में पुष्टि की। इस सिद्धांत से केवल प्रकाश संबंधी उपरोक्त परिघटनाओं की ही व्याख्या नहीं की जाती बल्कि इससे कणों से संबंधित परिघटनाओं की व्याख्या भी संभव है।

लेकिन तरंग-कण द्वैतवाद का कोई सैद्धांतिक आधार नहीं है। दे ब्रॉग्ली का प्रस्ताव केवल एक गुणात्मक तर्क है तथा प्रकृति की सममिति पर आधारित है। तरंग-कण द्वैतवाद अधिक से अधिक एक नियम था, किसी ठोस मूलभूत सिद्धांत का निष्कर्ष नहीं था। यह सच है कि जो भी प्रयोग किए गए उनकी दे ब्रॉग्ली के सूत्र से सहमति थी। लेकिन भौतिकी में इस प्रकार से कार्य नहीं होता। एक ओर इसे प्रायोगिक पुष्टि की आवश्यकता होती है, जबकि दूसरी ओर प्रस्तावित मॉडल के लिए ठोस सैद्धांतिक आधार की भी आवश्यकता है। इसे अगले दो दशकों में विकसित किया गया। लगभग 1928 में डिरैक ने अपने विकिरण के सिद्धांत को विकसित किया तथा हाइज़नबर्ग तथा पॉली ने 1930 तक इसे दृढ़ आधार प्रदान किया। 1940 के उत्तरार्ध में ऑमोनागा, श्विन्जर तथा फाइनमैन ने इसका और अधिक परिष्करण किया तथा सिद्धान्त में जो भी असंगतियाँ देखी गईं, उन्हें स्पष्ट किया। इन सभी सिद्धांतों ने मुख्य रूप से तरंग-कण द्वैतवाद को एक सैद्धांतिक आधार प्रदान किया।

यद्यपि कहानी अभी समाप्त नहीं हुई, यह और अधिक जटिल होती जा रही है तथा इस टिप्पणी के कार्यक्षेत्र से परे है। लेकिन अब हमें जो घटित हुआ है उसकी मूलभूत संरचना ज्ञात है और हमें इस समय इससे संतुष्टि भी हो जानी चाहिए। अब भौतिकी के वर्तमान सिद्धांतों के स्वाभाविक निष्कर्ष के फलस्वरूप हम यह मान सकते हैं कि विभिन्न प्रयोगों में तथा कभी उसी प्रयोग के विभिन्न भागों में, वैद्युतचुंबकीय विकिरण तथा द्रव्य के कण, तरंग तथा कण दोनों ही गुण प्रदर्शित करते हैं।

अध्याय 12

परमाणु

12.1 भूमिका

उन्नीसवीं शताब्दी तक पदार्थ की परमाण्वीय परिकल्पना के समर्थन में काफ़ी साक्ष्य एकत्रित हो गए थे। सन् 1897 में ब्रिटिश भौतिकविज्ञानी जोसेफ जे. टॉमसन (1856 – 1940) ने गैसों के विद्युत विसर्जन प्रयोगों द्वारा ज्ञात किया कि विभिन्न तत्वों के परमाणुओं में उपस्थित ऋणात्मक आवेशित संघटक (इलेक्ट्रॉन) सभी परमाणुओं के लिए पूर्णतया समान हैं। तथापि, परमाणु स्वयं में वैद्युत रूप से उदासीन होते हैं। इसलिए, इलेक्ट्रॉन के ऋण आवेश को निष्प्रभावित करने के लिए परमाणु में धनात्मक आवेश भी अवश्य होना चाहिए। लेकिन परमाणु में धनात्मक आवेश तथा इलेक्ट्रॉन की व्यवस्था क्या है? दूसरे शब्दों में, परमाणु की संरचना क्या है?

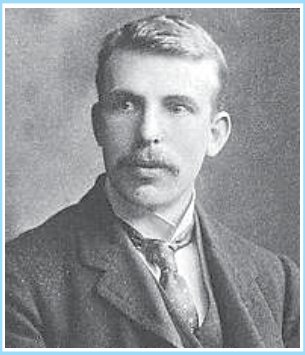
सन् 1898 में जे. जे. टॉमसन ने परमाणु का पहला मॉडल प्रस्तावित किया। इस मॉडल के अनुसार, परमाणु का धन आवेश परमाणु में पूर्णतया एकसमान रूप से वितरित है तथा ऋण आवेशित इलेक्ट्रॉन इसमें ठीक उसी प्रकार अंत:स्थापित हैं जैसे किसी तरबूज में बीज। इस मॉडल को चित्रमय रूप में *प्लम पुडिंग मॉडल* कहा गया। तथापि परमाणु के विषय में बाद के अध्ययनों ने जैसा कि इस अध्याय में वर्णित है, यह दर्शाया कि परमाणु में इलेक्ट्रॉनों तथा धन आवेशों का वितरण इस प्रस्तावित मॉडल से बहुत भिन्न है।

हम जानते हैं कि संघनित पदार्थ (ठोस तथा द्रव) तथा सघन गैसें सभी तापों पर वैद्युतचुंबकीय विकिरण उत्सर्जित करते हैं जिसमें अनेक तरंगदैर्घ्यों का संतत वितरण विद्यमान होता है यद्यपि उनकी तीव्रताएँ भिन्न होती हैं। यह समझा गया कि यह विकिरण परमाणुओं तथा अणुओं के दोलनों के कारण होता है, जो प्रत्येक परमाणु अथवा अणु का अपने समीप के परमाणुओं या अणुओं के साथ होने वाली

अन्योन्य क्रिया से नियंत्रित होता है। इसके विपरीत ज्वाला में गर्म की गई विरलित गैसों द्वारा उत्सर्जित प्रकाश अथवा किसी तापदीप्त नलिका में विद्युत उत्तेजित गैस, जैसे निऑन साइन अथवा पारद-वाष्प प्रकाश में केवल निश्चित विविक्त तरंगदैर्घ्य होती हैं। इनके स्पेक्ट्रम में चमकीली रेखाओं की एक शृंखला दिखाई देती है। ऐसी गैसों में परमाणुओं के मध्य अंतराल अधिक होता है। अतः, उत्सर्जित विकिरण, परमाणुओं अथवा अणुओं के बीच अन्योन्य क्रियाओं के परिणामस्वरूप नहीं, बल्कि व्यष्टिगत परमाणुओं के कारण माना जा सकता है।

उन्नीसवीं शताब्दी के प्रारंभ में ही यह स्थापित हो गया था कि प्रत्येक तत्व से उत्सर्जित विकिरण का एक अभिलाक्षणिक स्पेक्ट्रम होता है। उदाहरण के लिए, हाइड्रोजन स्पेक्ट्रम सदैव रेखाओं का एक समुच्चय होता है जिसमें रेखाओं के बीच की आपेक्षिक स्थितियाँ निश्चित होती हैं। इस तथ्य ने किसी परमाणु की आंतरिक संरचना और इससे उत्सर्जित विकिरण के स्पेक्ट्रम के बीच घनिष्ठ संबंध की ओर संकेत किया। सन् 1885 में जान जेकब बामर (1825 – 1898) ने परमाण्वीय हाइड्रोजन से उत्सर्जित रेखाओं के समूह की आवृत्तियों के लिए एक सरल आनुभविक सूत्र प्राप्त किया। चूँकि हाइड्रोजन एक सरलतम ज्ञात तत्व है, हम इसके स्पेक्ट्रम का इस अध्याय में विस्तार से अध्ययन करेंगे।

जे. जे. टॉमसन के एक भूतपूर्व शोध छात्र अर्नेस्ट रदरफोर्ड (1871–1937), कुछ रेडियोएक्टिव तत्वों से उत्सर्जित ऐल्फ़ा-कणों (α-कणों) पर एक प्रयोग करने में व्यस्त थे। परमाणु की संरचना का अन्वेषण करने के लिए उन्होंने सन् 1906 में परमाणुओं द्वारा ऐल्फ़ा-कणों के प्रकीर्णन से संबंधित एक क्लासिकी प्रयोग प्रस्तावित किया। यह प्रयोग कुछ समय पश्चात सन् 1911 में हैंस गाइगर (1882 – 1945) तथा अर्नेस्ट मार्सडन (1889 – 1970, जो 20 वर्षीय छात्र थे तथा जिन्होंने अभी स्नातक की उपाधि भी ग्रहण नहीं की थी) ने किया। अनुच्छेद 12.2 में इसकी विस्तार से व्याख्या की गई है। इसके परिणामों की व्याख्या ने परमाणु के रदरफोर्ड के ग्रहीय मॉडल को जन्म दिया (जिसे *परमाणु का नाभिकीय मॉडल* भी कहा जाता है)। इसके अनुसार, किसी परमाणु का कुल धनावेश तथा अधिकांश द्रव्यमान एक सूक्ष्म आयतन में संकेंद्रित होता है जिसे नाभिक कहते हैं और इसके चारों ओर इलेक्ट्रॉन उसी प्रकार परिक्रमा करते हैं जैसे सूर्य के चारों ओर ग्रह परिक्रमा करते हैं।



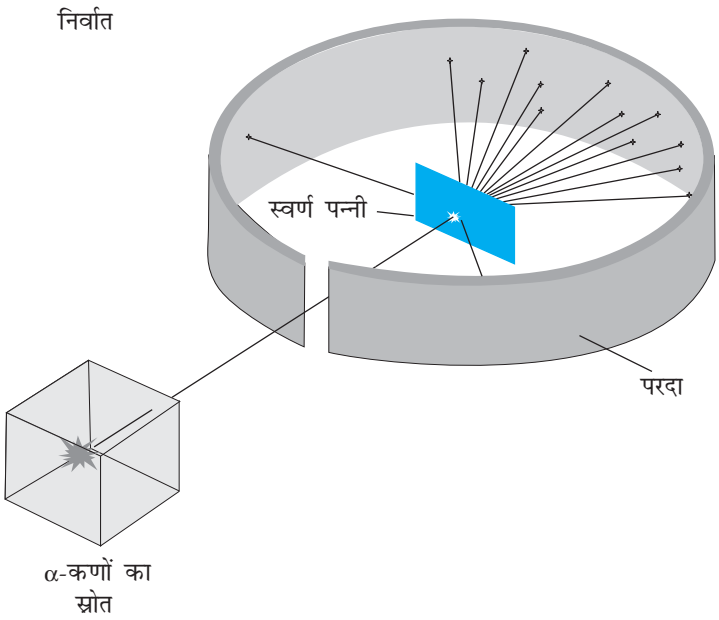
अर्नेस्ट रदरफोर्ड (1871-1937)

अंग्रेज़ भौतिकविज्ञानी जिन्होंने रेडियोएक्टिव विकिरणों पर अग्रणी कार्य किया। उन्होंने ऐल्फ़ा-, एवं बीटा-किरणों की खोज की। फ्रेड्रिक सॉडी के साथ कार्य कर उन्होंने रेडियोएक्टिवता का आधुनिक सिद्धांत प्रस्तुत किया। उन्होंने थोरियम से निकलने वाले विकिरणों का अध्ययन किया जिसके परिणामस्वरूप निष्क्रिय गैस थोरोन की खोज हुई जो रेडॉन का समस्थानिक है। पतले धातु के वर्कों पर ऐल्फ़ा-किरणों के प्रकीर्णन से उन्होंने परमाण्विक नाभिक की खोज की और परमाणु का ग्रहीय मॉडल प्रस्तुत किया। उन्होंने नाभिक के सन्निकट साइज़ का अनुमान भी लगाया।

परमाणु के जिस वर्तमान रूप को हम जानते हैं, रदरफोर्ड का नाभिकीय मॉडल उस दिशा में एक बड़ा कदम था। तथापि इसके द्वारा यह व्याख्या नहीं का जा सकी कि परमाणु केवल विविक्त (discrete) तरंगदैर्घ्य का प्रकाश ही क्यों उत्सर्जित करता है। हाइड्रोजन जैसा एक सरल परमाणु जिसमें एक इलेक्ट्रॉन तथा एक प्रोटॉन होता है, विशेष तरंगदैर्घ्य का एक जटिल स्पेक्ट्रम कैसे उत्सर्जित करता है? परमाणु के क्लासिकी चित्रण में, इलेक्ट्रॉन नाभिक के चारों ओर ठीक ऐसे ही परिक्रमा करता है जैसे कि सूर्य के चारों ओर ग्रह परिक्रमा करते हैं। तथापि, हम देखेंगे कि इस मॉडल को स्वीकार करने में कुछ गंभीर कठिनाइयाँ हैं।

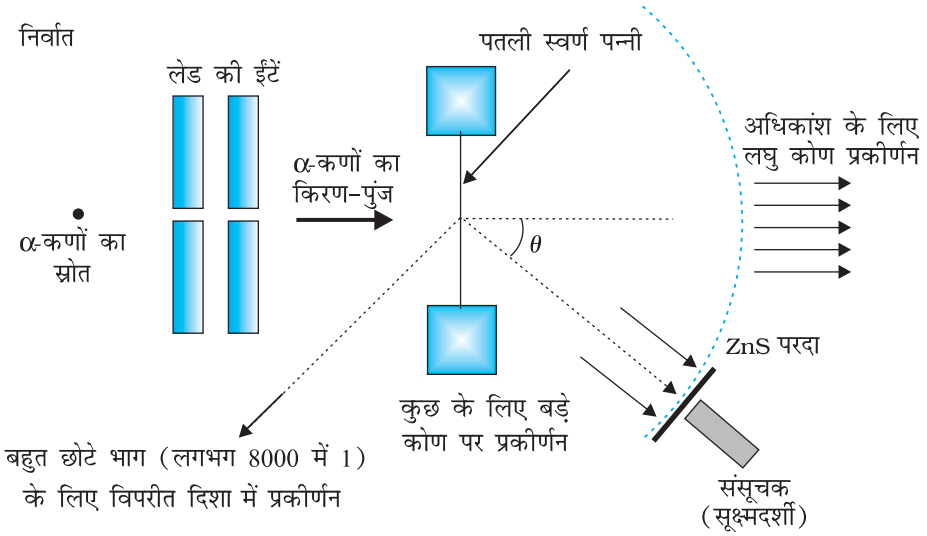
12.2 ऐल्फ़ा कण प्रकीर्णन तथा परमाणु का रदरफोर्ड नाभिकीय मॉडल

सन् 1911 में रदरफोर्ड के सुझाव पर एच. गाइगर तथा ई. मार्सडन ने कुछ प्रयोग किए। उनके द्वारा



चित्र 12.1 गाइगर-मार्सडन प्रकीर्णन प्रयोग। संपूर्ण उपकरण एक निर्वात कक्ष में रखा गया है। (इस चित्र में यह कक्ष नहीं दर्शाया गया है।)

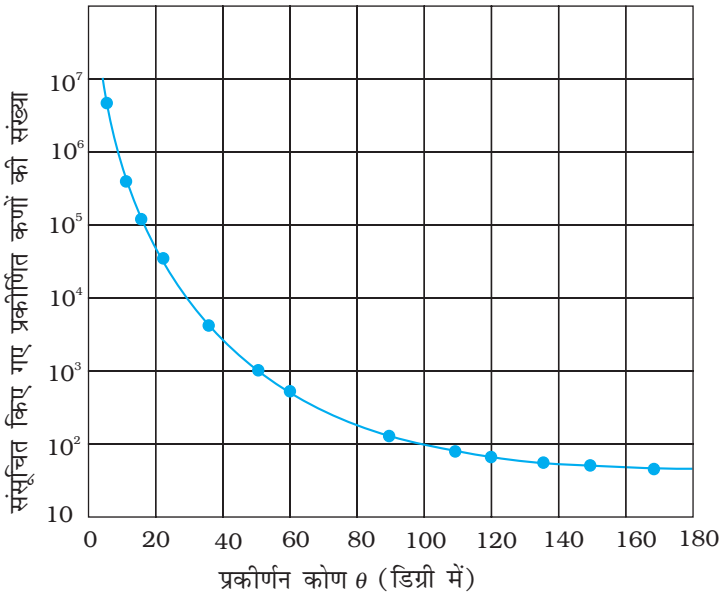
किए गए एक प्रयोग में रेडियोऐक्टिव स्रोत $^{214}_{83}Bi$ से उत्सर्जित 5.5 MeV ऊर्जा वाले α–कणों के एक पुंज को पतले स्वर्ण पन्नी पर दिष्ट कराया गया, जैसा कि चित्र 12.1 में दर्शाया गया है। चित्र 12.2 में इस प्रयोग के व्यवस्थित चित्र को दर्शाया गया है। रेडियोऐक्टिव स्रोत $^{214}_{83}Bi$ से उत्सर्जित α–कणों के एक पतले किरण-पुंज को लेड की ईंटों के मध्य से गुज़ार कर संरेखित किया गया। इस किरण-पुंज का 2.1×10^{-7}m मोटी स्वर्ण पन्नी पर आघात कराया गया। प्रकीर्णित α–कणों का विक्षेप मापने के लिए एक घूर्णी संसूचक का प्रयोग किया गया जिसमें एक जिंक सल्फाइड का परदा एवं एक सूक्ष्मदर्शी था। प्रकीर्णित ऐल्फ़ा-कण परदे से टकराकर चमकीले फ्लैश अथवा प्रस्फुर उत्पन्न करते हैं। ये फ्लैश सूक्ष्मदर्शी द्वारा देखे जा सकते हैं तथा प्रकीर्णित कणों की संख्या के वितरण का प्रकीर्णन कोण के फलन के रूप में अध्ययन किया जा सकता है।



चित्र 12.2 गाइगर-मार्सडन प्रयोग का व्यवस्थात्मक निरूपण।

चित्र 12.3 में किसी दिए समयांतराल में विभिन्न कोणों पर प्रकीर्णित कुल ऐल्फ़ा-कणों की संख्या का प्रारूपिक आलेख दर्शाया गया है। इस चित्र में दिखाए गए बिंदु प्रयोग में प्राप्त आँकड़ों को निरूपित करते हैं और संतत वक्र सैद्धांतिक पूर्वानुमान है जो इस कल्पना पर आधारित है कि परमाणु में एक सूक्ष्म सघन तथा धनावेशित नाभिक है। बहुत से ऐल्फ़ा-कण स्वर्ण पन्नी को पार कर जाते हैं। इसका अर्थ है उनमें संघट्टन नहीं होता। आपतित ऐल्फ़ा-कणों में से केवल 0.14% (लगभग) का 1° के कोण से अधिक प्रकीर्णन होता है तथा 8000 ऐल्फ़ा-कणों में से लगभग 1 कण 90° से अधिक विक्षेपित होता है। रदरफोर्ड ने तर्क किया कि ऐल्फ़ा-कणों को विपरीत दिशा

में विक्षेपित करने के लिए, इन पर बहुत अधिक प्रतिकर्षण बल लगना चाहिए। इतना अधिक बल तभी प्राप्त हो सकता है यदि परमाणु का अधिकांश द्रव्यमान तथा इसका धन-आवेश इसके केंद्र पर दृढ़ता पूर्वक संकेंद्रित हो। तब अंदर आता हुआ ऐल्फ़ा-कण धन आवेश को भेदे बिना इसके अत्यंत समीप आ सकता है तथा इस प्रकार के समागम के परिणामस्वरूप अधिक विक्षेप होगा। इससे नाभिकीय परमाणु की परिकल्पना की पुष्टि होती है। यही कारण है कि रदरफोर्ड को *नाभिक की खोज* का श्रेय दिया जाता है।



चित्र 12.3 चित्र 12.1 तथा 12.2 में गाइगर-मार्सडन द्वारा प्रयुक्त प्रयोग व्यवस्था में पतली पन्नी पर ऐल्फा-कणों के प्रहार में विभिन्न कोणों पर प्राप्त प्रायोगिक प्रकीर्णन आँकड़े (बिन्दुओं के रूप में)। रदरफोर्ड के नाभिकीय मॉडल पर आधारित ठोस वक्र प्रायोगिक परीक्षणों के साथ मेल रखते हुए प्रतीत होते हैं।

रदरफोर्ड के परमाणु के नाभिकीय मॉडल में, परमाणु का कुल धनावेश तथा इसका अधिकांश द्रव्यमान परमाणु के बहुत छोटे से आयतन में संकेंद्रित होता है जिसे नाभिक कहते हैं तथा इलेक्ट्रॉन इससे कुछ दूर होते हैं। इलेक्ट्रॉन, नाभिक के चारों ओर कक्षा में चक्कर लगाते हैं, ठीक ऐसे ही जैसे सूर्य के चारों ओर ग्रह चक्कर लगाते हैं। रदरफोर्ड के प्रयोगों ने सुझाया कि नाभिक का साइज़ लगभग 10^{-15} m से 10^{-14} m हो सकता है। गतिज सिद्धांत के अनुसार परमाणु का साइज़ 10^{-10} m माना जाता है, जो कि नाभिक के साइज़ की अपेक्षा लगभग 10,000 से 100,000 गुना बड़ा है (कक्षा 11 की भौतिकी पाठ्यपुस्तक का अध्याय 11, अनुच्छेद 11.6 देखें)। इस प्रकार, नाभिक से इलेक्ट्रॉन नाभिक के साइज़ की अपेक्षा लगभग 10,000 से 100,000 गुना दूर दिखाई देगा। इस प्रकार, परमाणु के भीतर का अधिकांश भाग खाली है। परमाणु के भीतर का अधिकतर भाग खाली होने के कारण यह समझना आसान है कि अधिकतर ऐल्फ़ा-कण पतली धातु की पन्नी से बिना विक्षेपित हुए बाहर क्यों निकल जाते हैं। तथापि, जब कोई ऐल्फ़ा-कण नाभिक के समीप आता है तो वहाँ पर विद्यमान प्रबल विद्युत बल इसे बड़े कोण से प्रकीर्णित कर देता है। परमाणु के इलेक्ट्रॉन अत्यंत हलके होने के कारण ऐल्फ़ा-कणों पर पर्याप्त प्रभाव नहीं डाल पाते।

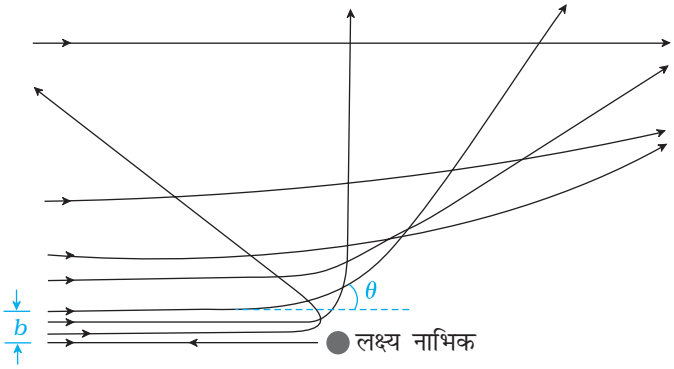
चित्र 12.3 में प्रदर्शित प्रकीर्णन आँकड़ों का विश्लेषण रदरफोर्ड के परमाणु के नाभिकीय मॉडल द्वारा किया जा सकता है। स्वर्ण पन्नी के बहुत पतली होने के कारण यह कल्पना की जा सकती है कि इस पन्नी को पार करते समय α-कण एक से अधिक बार प्रकीर्णित नहीं होंगे। अत: किसी एक नाभिक से प्रकीर्णित ऐल्फ़ा-कण के प्रक्षेप पथ का अभिकलन काफ़ी है। ऐल्फ़ा-कण हीलियम परमाणु के नाभिक हैं इसलिए इन पर दो इकाई, 2e, धनावेश है और द्रव्यमान हीलियम परमाणु के द्रव्यमान के बराबर है। स्वर्ण के नाभिक का आवेश Ze है, यहाँ Z परमाणु का परमाणु क्रमांक है, जो स्वर्ण के लिए 79 है। चूँकि स्वर्ण-नाभिक α–कण के नाभिक से 50 गुना भारी है, अत: यह कल्पना करना तर्कसंगत है कि प्रकीर्णन प्रक्रम के समय स्वर्ण-नाभिक स्थिर रहता है। इन अभिधारणाओं के आधार पर ऐल्फ़ा-कण और धनावेशित नाभिक के मध्य स्थिर वैद्युत प्रतिकर्षण बल के कूलॉम-नियम तथा न्यूटन के गति के द्वितीय नियम द्वारा ऐल्फ़ा-कण के प्रक्षेप पथ का अभिकलन किया जा सकता है। इस बल का परिमाण इस प्रकार व्यक्त किया जाता है :

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{(2e)(Ze)}{r^2} \qquad (12.1)$$

जहाँ r ऐल्फ़ा-कण की नाभिक से दूरी है। आरोपित बल, ऐल्फ़ा-कण और नाभिक को मिलाने वाली रेखा के अनुदिश है। ऐल्फ़ा-कण पर आरोपित बल का परिमाण एवं दिशा, ऐल्फ़ा-कण के नाभिक की ओर अभिगमन करने वाले तथा उससे दूर जाने के साथ लगातार परिवर्तित होती रहती है।

12.2.1 ऐल्फ़ा-कण प्रक्षेप-पथ

ऐल्फ़ा-कण द्वारा अनुरेखित प्रक्षेप पथ, संघट्ट के संघट्ट प्राचल, b पर निर्भर करता है। *संघट्ट प्राचल* ऐल्फ़ा-कण के प्रारंभिक वेग सदिश की नाभिक के केंद्र से अभिलंबीय दूरी है (चित्र 12.4)। दिए गए ऐल्फ़ा-कणों के पुंज के संघट्ट प्राचल b का वितरण इस प्रकार है कि पुंज विभिन्न दिशाओं में भिन्न-भिन्न प्रायिकताओं से प्रकीर्णित होता है (चित्र 12.4)। (किसी पुंज में सभी कणों की लगभग समान गतिज ऊर्जा होती है।) यह देखा गया है कि नाभिक के समीप कोई ऐल्फ़ा-कण (कम संघट्ट प्राचल) अधिक प्रकीर्णित होता है। प्रत्यक्ष संघट्ट की स्थिति में संघट्ट प्राचल न्यूनतम है तथा ऐल्फ़ा-कण पीछे की ओर प्रतिक्षिप्त होता है ($\theta \cong \pi$)। संघट्ट प्राचल के अधिक मान के लिए, ऐल्फ़ा-कण लगभग अविचलित रहता है तथा विक्षेप बहुत कम होता है ($\theta \cong 0$)।



चित्र 12.4 किसी भारी नाभिक के कूलॉम क्षेत्र में ऐल्फ़ा-कण का प्रक्षेप पथ। संघट्ट प्राचल b और प्रकीर्णन कोण θ अंतर चित्र में दर्शाए गए हैं।

यह तथ्य कि आपतित कणों में से केवल एक छोटा भाग ही टकराकर वापस लौटता है, यह सूचित करता है कि प्रत्यक्ष संघट्ट की स्थिति में आने वाले ऐल्फ़ा-कणों की संख्या बहुत कम है। इससे ज्ञात होता है कि नाभिक का द्रव्यमान बहुत छोटे आयतन में संकेंद्रित है। इस प्रकार रदरफोर्ड प्रकीर्णन नाभिक के साइज़ की उच्चसीमा ज्ञात करने का एक शक्तिशाली साधन है।

उदाहरण 12.1

उदाहरण 12.1 परमाणु के रदरफोर्ड के नाभिकीय मॉडल में, नाभिक (त्रिज्या लगभग 10^{-15} m) सूर्य के सदृश है, जिसके परितः इलेक्ट्रॉन अपने कक्ष (त्रिज्या $\approx 10^{-10}$ m) में ऐसे परिक्रमा करता है जैसे पृथ्वी सूर्य के चारों ओर परिक्रमा करती है। यदि सौर परिवार की विमाएँ उसी अनुपात में होतीं जो किसी परमाणु में होती हैं, तो क्या पृथ्वी अपनी वास्तविक स्थिति की अपेक्षा सूर्य के पास होगी या दूर होगी? पृथ्वी के कक्ष की त्रिज्या लगभग 1.5×10^{11} m है। सूर्य की त्रिज्या 7×10^8 m मानी गई है।

हल इलेक्ट्रॉन के कक्ष की त्रिज्या तथा नाभिक की त्रिज्या का अनुपात है $(10^{-10}\text{ m})/(10^{-15}\text{ m}) = 10^5$, अर्थात इलेक्ट्रॉन के कक्ष की त्रिज्या, नाभिक की त्रिज्या से 10^5 गुना अधिक है। यदि सूर्य के चारों ओर पृथ्वी के कक्ष की त्रिज्या सूर्य की त्रिज्या से 10^5 गुना अधिक हो, तो पृथ्वी के कक्ष की त्रिज्या होगी $10^5 \times 7 \times 10^8\text{ m} = 7 \times 10^{13}$ m। यह पृथ्वी की वास्तविक कक्षीय त्रिज्या से 100 गुना अधिक है। अतः इस स्थिति में पृथ्वी सूर्य से बहुत अधिक दूर होगी।

इससे यह भी ज्ञात होता है कि परमाणु में हमारे सौर परिवार की अपेक्षा बहुत अधिक भाग खाली स्थान है।

उदाहरण 12.2 गाइगर-मार्सडन प्रयोग में 7.7 MeV के किसी ऐल्फ़ा कण की स्वर्ण-नाभिक से क्षण भर के लिए विरामावस्था में आने से पहले तथा दिशा प्रतिलोमन से पूर्व समीपतम दूरी क्या है?

हल यहाँ मुख्य धारणा यह है कि प्रकीर्णन प्रक्रम की समस्त अवधि में किसी तंत्र जैसे ऐल्फ़ा-कण और स्वर्ण-नाभिक की कुल यांत्रिक ऊर्जा संरक्षित रहती है। ऐल्फ़ा-कण और नाभिक की अन्योन्यक्रिया से पूर्व तंत्र की प्रारंभिक यांत्रिक ऊर्जा E_i कण के क्षणिक रूप से विरामावस्था में आने पर उसकी यांत्रिक ऊर्जा E_f के बराबर है। प्रारंभिक ऊर्जा E_i आगामी ऐल्फ़ा-कण की गतिज ऊर्जा Kके ठीक बराबर है। अंतिम ऊर्जा E_f तंत्र की विद्युत स्थितिज ऊर्जा U ही है। स्थितिज ऊर्जा U का समीकरण (12.1) से परिकलन किया जा सकता है।

मान लीजिए कि ऐल्फ़ा-कण के केंद्र और स्वर्ण-नाभिक के केंद्र के बीच दूरी d है। जब α-कण अपने विरामन बिंदु पर स्थित है, तब ऊर्जा संरक्षण के नियमानुसार, $E_i = E_f$ को इस प्रकार व्यक्त किया जा सकता है :

$$K = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{(2e)(Ze)}{d} = \frac{2Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 d}$$

अत: समीपतम दूरी d होगी

$$d = \frac{2Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 K}$$

प्राकृतिक स्रोतों के ऐल्फ़ा-कणों में पाई जाने वाली अधिकतम गतिज ऊर्जा 7.7 MeV अथवा 1.2×10^{-12} J है। क्योंकि $1/4\pi\varepsilon_0 = 9.0 \times 10^9$ N m^2/C^2 इसलिए $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C, के साथ, हमें प्राप्त होगा

$$d = \frac{(2)(9.0\times10^9 \text{Nm}^2/C^2)(1.6\times10^{-19}C)^2 Z}{1.2\times10^{-12}\text{J}}$$

$$= 3.84 \times 10^{-16}\, Z \text{ m}$$

पन्नी के पदार्थ स्वर्ण का परमाणु क्रमांक $Z = 79$, इसलिए

d (Au) = 3.0×10^{-14} m = 30 fm (1 fm (अर्थात् फर्मी) = 10^{-15} m)

अत: स्वर्ण नाभिक की त्रिज्या 3.0×10^{-14} m से कम है। यह प्रेक्षित परिणाम से बहुत अधिक मेल नहीं खाती है क्योंकि स्वर्ण नाभिक की वास्तविक त्रिज्या 6 fm है। इस विसंगति का कारण यह है कि समीपतम पहुँचने की दूरी ऐल्फ़ा-कण तथा स्वर्ण-नाभिक की त्रिज्याओं के योग से काफ़ी अधिक है। इस प्रकार ऐल्फ़ा-कण स्वर्ण-नाभिक को वास्तव में छुए बिना ही अपनी गति की दिशा विपरीत कर लेता है।

उदाहरण 12.2

रदरफोर्ड प्रकीर्णन प्रयोग के अनुकार
http://www.outreach.phy.com.ac.uk/company/nucleus/nucleus-exp.html

भौतिकी

12.2.2 इलेक्ट्रॉन-कक्षाएँ

परमाणु का रदरफोर्ड नाभिकीय मॉडल जिसमें क्लासिकी धारणाएँ सम्मिलित हैं, परमाणु को एक विद्युतीय उदासीन गोले के रूप में चित्रित करता है, जिसके केंद्र पर बहुत छोटा, भारी तथा धन आवेशित नाभिक है, जो अपनी-अपनी गतिशील स्थिर कक्षाओं में घूमते इलेक्ट्रॉनों से घिरा हुआ है। परिक्रमा करते हुए इलेक्ट्रॉनों तथा नाभिक के बीच स्थिरवैद्युत आकर्षण बल F_e इलेक्ट्रॉन को अपने कक्ष में बनाए रखने के लिए आवश्यक अभिकेंद्री बल (F_c) प्रदान करता है। अत:, हाइड्रोजन परमाणु में गतिशील स्थिर कक्षा के लिए

$$F_e = F_c$$

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r^2} \qquad (12.2)$$

अत: कक्षा-त्रिज्या तथा इलेक्ट्रॉन-वेग में संबंध होगा

$$r = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 m v^2} \qquad (12.3)$$

हाइड्रोजन के परमाणु में इलेक्ट्रॉन की गतिज ऊर्जा (K) तथा स्थिरवैद्युत स्थितिज ऊर्जा (U) होंगी

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r} \text{ तथा } U = -\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

(U में ऋणात्मक चिह्न सूचित करता है कि स्थिरवैद्युत बल $-r$ दिशा में है) अत: हाइड्रोजन परमाणु में इलेक्ट्रॉन की कुल ऊर्जा E,

$$E = K + U = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r} - \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

$$= -\frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r} \qquad (12.4)$$

इलेक्ट्रॉन की कुल ऊर्जा ऋणात्मक है। यह तथ्य दर्शाता है कि इलेक्ट्रॉन नाभिक से परिबद्ध है। यदि E धनात्मक होता तो इलेक्ट्रॉन नाभिक के चारों ओर बंद कक्ष में नहीं घूमता।

उदाहरण 12.3

उदाहरण 12.3 प्रयोग द्वारा यह पाया गया कि हाइड्रोजन परमाणु को एक प्रोटॉन तथा एक इलेक्ट्रॉन में पृथक करने के लिए 13.6 eV ऊर्जा की आवश्यकता है। हाइड्रोजन परमाणु में कक्षीय-त्रिज्या तथा इलेक्ट्रॉन का वेग परिकलित कीजिए।

हल हाइड्रोजन परमाणु में इलेक्ट्रॉन की कुल ऊर्जा है -13.6 eV $= -13.6 \times 1.6 \times 10^{-19}$ J $= -2.2 \times 10^{-18}$ J अत: समीकरण (12.4) से हमें प्राप्त होगा

$$-\frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r} = -2.2 \times 10^{-18} \text{ J}$$

इससे कक्षीय-त्रिज्या प्राप्त होगी :

$$r = -\frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 E} = -\frac{(9\times10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2)(1.6\times10^{-19}\text{C})^2}{(2)(-2.2\times10^{-18}\text{ J})}$$

$$= 5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$$

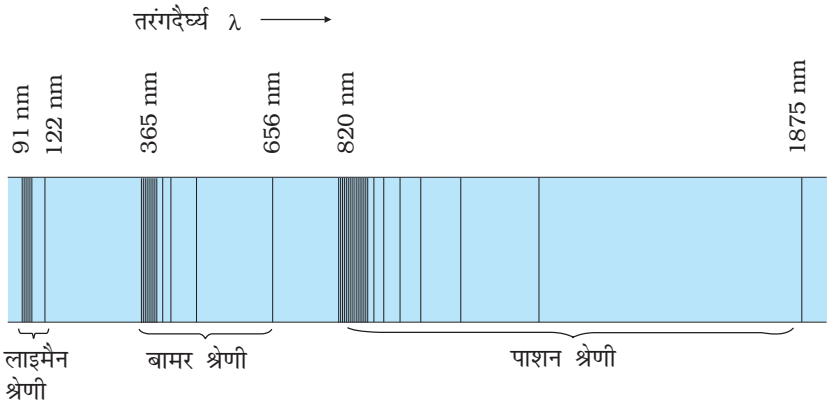
परिक्रमण करते इलेक्ट्रॉन का वेग, समीकरण (12.3) से $m = 9.1 \times 10^{-31}$ kg लेकर परिकलित कर सकते हैं

$$v = \frac{e}{\sqrt{4\pi\varepsilon_0 mr}} = 2.2\times10^6 \text{ m/s}$$

12.3 परमाण्वीय स्पेक्ट्रम

अनुच्छेद 12.1 में उल्लेख किए अनुसार, प्रत्येक तत्व अभिलाक्षणिक स्पेक्ट्रम-विकिरण उत्सर्जित करता है। जब कोई परमाण्वीय गैस अथवा वाष्प निम्न दाब पर, प्राय: इससे विद्युत धारा प्रवाहित करके, उत्सर्जित की जाती है तो उत्सर्जित विकिरण से स्पेक्ट्रम प्राप्त होता है जिसमें कुछ विशिष्ट तरंगदैर्घ्य ही होती हैं। इस प्रकार के स्पेक्ट्रम को उत्सर्जन रैखिक स्पेक्ट्रम कहते हैं तथा इसमें काली

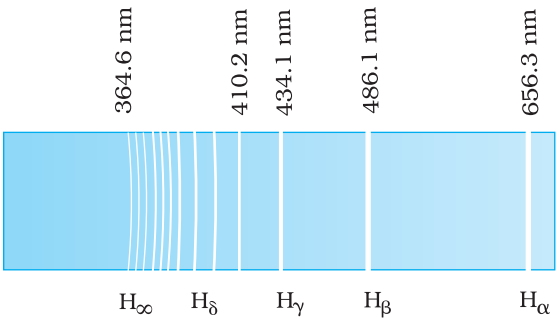
पृष्ठभूमि पर दीप्त रेखाएँ होती हैं। चित्र 12.5 में परमाण्वीय हाइड्रोजन द्वारा उत्सर्जित स्पेक्ट्रम दर्शाया गया है। अत: किसी पदार्थ के उत्सर्जन रैखिक स्पेक्ट्रम का अध्ययन, गैस की पहचान करने के लिए *फिंगरप्रिंट* के रूप में कार्य कर सकता है। जब श्वेत प्रकाश किसी गैस से होकर गुज़रता है तथा हम स्पेक्ट्रोमीटर द्वारा पारगत प्रकाश का विश्लेषण करते हैं तो स्पेक्ट्रम में कुछ अदीप्त रेखाएँ दिखाई देती हैं। ये अदीप्त रेखाएँ परिशुद्धत: रूप से उन तरंगदैर्घ्यों के तदनुरूपी होती हैं जो उस गैस के उत्सर्जन रैखिक स्पेक्ट्रम में पाई जाती हैं। यह उस गैस के पदार्थ का *अवशोषण स्पेक्ट्रम* कहलाता है।



चित्र 12.5 हाइड्रोजन के स्पेक्ट्रम में उत्सर्जन रेखाएँ।

12.3.1 स्पेक्ट्रमी श्रेणी

हम यह आशा कर सकते हैं कि किसी तत्व विशेष से उत्सर्जित प्रकाश की आवृत्तियाँ कुछ नियमित पैटर्न दर्शाएँगी। हाइड्रोजन एक सरलतम परमाणु है और इसलिए इसका स्पेक्ट्रम सरलतम होता है। तथापि, पहली दृष्टि में हमें प्रेक्षित स्पेक्ट्रम की स्पेक्ट्रमी रेखाओं में किसी क्रम या सममितता का आभास नहीं होता। लेकिन हाइड्रोजन स्पेक्ट्रम के कुछ विशेष समुच्चयों के भीतर रेखाओं के बीच की दूरी नियमित रूप से घटती जाती है (चित्र 12.5)। इसमें से प्रत्येक समुच्चय को *स्पेक्ट्रमी श्रेणी* कहते हैं। सन् 1885 में स्वीडन के एक स्कूल अध्यापक जान जेकब बामर (1825 – 1898) ने हाइड्रोजन स्पेक्ट्रम के दृश्य भाग में इस प्रकार की पहली श्रेणी को देखा। इस श्रेणी को *बामर श्रेणी* कहते हैं (चित्र 12.6)। लाल रंग की सर्वाधिक तरंगदैर्घ्य, 656.3 nm वाली रेखा को H_α; 486.1 nm तरंगदैर्घ्य की नीली-हरी अगली रेखा को H_β; 434.1 nm तरंगदैर्घ्य की बैंगनी रंग की तीसरी रेखा को H_γ इत्यादि द्वारा व्यक्त किया जाता है। जैसे-जैसे तरंगदैर्घ्य घटती जाती है, रेखाएँ समीप होती प्रतीत होती हैं तथा उनकी तीव्रता कम हो जाती है। बामर ने इन रेखाओं की प्रेक्षित तरंगदैर्घ्यों के लिए एक सरल आनुभविक (empirical) सूत्र ज्ञात किया :



चित्र 12.6 हाइड्रोजन के उत्सर्जन स्पेक्ट्रम में बामर श्रेणी

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad (12.5)$$

जहाँ λ तरंगदैर्घ्य तथा R एक नियतांक है जिसे *रिडबर्ग-नियतांक* कहते हैं। यहाँ n के पूर्णांक मान 3, 4, 5 इत्यादि हो सकते हैं। R का मान $1.097 \times 10^7\ m^{-1}$ है। इस समीकरण को *बामर सूत्र* कहते हैं।

समीकरण (12.5) में $n = 3$ मानकर रेखा H_α की तरंगदैर्घ्य प्राप्त कर सकते हैं

$$\frac{1}{\lambda} = 1.097 \times 10^7 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}\right)\ m^{-1}$$

$= 1.522 \times 10^6\ m^{-1}$

अर्थात $\lambda = 656.3\ nm$

$n = 4$ रखने पर हम रेखा H_β की तरंगदैर्घ्य तथा इसी प्रकार n के विभिन्न मान रखकर अन्य रेखाओं की तरंगदैर्घ्य प्राप्त कर सकते हैं। $n = \infty$ लेकर तरंगदैर्घ्य $\lambda = 364.6\ nm$ पर, श्रेणी की सीमा प्राप्त की जाती है। यह बामर श्रेणी की लघुतम तरंगदैर्घ्य है। इस सीमा के आगे कोई स्पष्ट रेखा दिखाई नहीं देती, केवल मंद सा सतत स्पेक्ट्रम दिखाई देता है।

हाइड्रोजन के लिए स्पेक्ट्रम की अन्य श्रेणियाँ लाइमैन, पाशन, ब्रेकेट, फुंट की भी खोज हो चुकी है, जिन्हें उनके शोधकर्ताओं के नाम से ही जाना जाता है। इन्हें निम्न सूत्रों द्वारा निरूपित किया जाता है :

लाइमैन श्रेणी :

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad n = 2,3,4... \qquad (12.6)$$

पाशन श्रेणी :

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad n = 4,5,6... \qquad (12.7)$$

ब्रेकेट श्रेणी :

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad n = 5,6,7... \qquad (12.8)$$

फुंट श्रेणी :

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad n = 6,7,8,... \qquad (12.9)$$

लाइमैन श्रेणी में उत्सर्जित स्पेक्ट्रम रेखाएँ पराबैंगनी क्षेत्र में और पाशन एवं ब्रेकेट श्रेणियों में स्पेक्ट्रम रेखाएँ स्पेक्ट्रम के अवरक्त क्षेत्र में प्राप्त होती हैं।

संबंध $c = \nu\lambda$ अथवा $\frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c}$ का उपयोग करके बामर श्रेणी के लिए सूत्र (12.5) को प्रकाश की आवृत्ति के पदों में इस प्रकार भी लिखा जा सकता है।

$$\nu = Rc\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad (12.10)$$

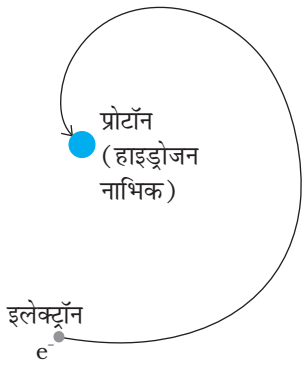
समीकरण (12.5 –12.9) के सरल सूत्रों से केवल कुछ तत्त्वों (हाइड्रोजन, एकधा आयनित हीलियम और द्वित: आयनित लीथियम) के स्पेक्ट्रमों को ही निरूपित किया जा सकता है।

समीकरण (12.5) – (12.9) उपयोगी हैं क्योंकि ये हाइड्रोजन परमाणुओं द्वारा उत्सर्जित अथवा अवशोषित की जाने वाली तरंगदैर्घ्यों के बारे में बतलाती हैं। तथापि, ये परिणाम केवल आनुभविक हैं तथा इसका कोई कारण नहीं बतलाते कि हाइड्रोजन के स्पेक्ट्रम में केवल कुछ आवृत्तियाँ ही क्यों प्रेक्षित की जाती हैं।

12.4 हाइड्रोजन परमाणु का बोर मॉडल

परमाणु के रदरफोर्ड द्वारा प्रस्तावित मॉडल में यह मान लिया गया है कि परमाणु के केंद्र में नाभिक होता है तथा परिक्रमा करते इलेक्ट्रॉन स्थिर हैं ठीक वैसे ही जैसा सौर परिवार में होता है जिसका अनुकरण करके इस मॉडल को विकसित किया गया। तथापि, दोनों स्थितियों में कुछ मूलभूत अंतर

है। ग्रहीय तंत्र गुरुत्वीय बल के कारण बँधा है, जबकि नाभिक-इलेक्ट्रॉन तंत्र में आवेशित कण होने के कारण, बल के कूलॉम-नियम द्वारा अन्योन्य क्रिया होती है। हम जानते हैं कि वृत्ताकार पथ में घूमती कोई वस्तु लगातार त्वरण में होती है, और इस त्वरण की प्रकृति अभिकेंद्री है। क्लासिकी वैद्युतचुंबकीय सिद्धांत के अनुसार कोई त्वरित आवेशित कण वैद्युतचुंबकीय तरंगों के रूप में विकिरण उत्सर्जित करता है। अत: त्वरित इलेक्ट्रॉन की ऊर्जा निरंतर घटनी चाहिए। इलेक्ट्रॉन अंदर की ओर सर्पिल पथ पर चलेगा तथा अंतत: नाभिक में गिर जाएगा (चित्र 12.7)। अत: ऐसा परमाणु स्थायी नहीं हो सकता। इसके अतिरिक्त, क्लासिकी वैद्युतचुंबकीय सिद्धांत के अनुसार परिक्रमी इलेक्ट्रॉनों द्वारा उत्सर्जित वैद्युतचुंबकीय तरंगों की आवृत्ति परिक्रमण-आवृत्ति के बराबर होती है। जब इलेक्ट्रॉन सर्पिल पथ पर अंदर नाभिक की ओर आते हैं तो उनके कोणीय वेग और इस प्रकार उनकी आवृत्तियाँ निरंतर परिवर्तित होंगी। फलस्वरूप उत्सर्जित प्रकाश की आवृत्ति भी निरंतर परिवर्तित होनी चाहिए। अत: इन्हें एक संतत स्पेक्ट्रम उत्सर्जित करना चाहिए जो वास्तव में प्रेक्षित रैखिक स्पेक्ट्रम के विपरीत है। स्पष्टतया रदरफोर्ड का मॉडल केवल तस्वीर का एक पहलू दिखलाता है जिसका अर्थ है कि क्लासिकी विचार परमाणु संरचना की व्याख्या करने के लिए पर्याप्त नहीं है।



चित्र 12.7 परमाणु का कोई त्वरित इलेक्ट्रॉन ऊर्जा ह्रास करके सर्पिल पथ पर नाभिक की ओर अंदर आ जाएगा।



नील्स हेनरिक डेविड बोर (1885 – 1962)
डेनमार्क के भौतिकविज्ञानी जिन्होंने क्वांटम विचारों के आधार पर हाइड्रोजन परमाणु के स्पेक्ट्रम की व्याख्या की। नाभिक के द्रव-बूँद मॉडल के आधार पर उन्होंने नाभिकीय विखंडन का एक सिद्धांत प्रस्तुत किया। बोर ने क्वांटम-यांत्रिकी की संकल्पनात्मक समस्याओं को विशेषकर संपूरकता के सिद्धांत की प्रस्तुति द्वारा स्पष्ट करने में योगदान किया।

उदाहरण 12.4 क्लासिकी वैद्युतचुंबकीय सिद्धांत के अनुसार, हाइड्रोजन परमाणु में प्रोटॉन के चारों ओर परिक्रामी इलेक्ट्रॉन द्वारा उत्सर्जित प्रकाश की प्रारंभिक आवृत्ति परिकलित कीजिए।

हल उदाहरण 12.3 से हम जानते हैं कि हाइड्रोजन परमाणु में प्रोटॉन के चारों ओर 5.3×10^{-11} m की त्रिज्या की कक्षा में परिक्रामी इलेक्ट्रॉन का वेग 2.2×10^{-6} m/s है। अत:, प्रोटॉन के चारों ओर परिक्रामी इलेक्ट्रॉन की आवृत्ति है :

$$\nu = \frac{v}{2\pi r} = \frac{2.2 \times 10^{6}\ \text{m s}^{-1}}{2\pi\left(5.3 \times 10^{-11}\ \text{m}\right)}$$

$$\approx 6.6 \times 10^{15}\ \text{Hz}$$

क्लासिकी वैद्युतचुंबकीय सिद्धांत के अनुसार हम जानते हैं कि परिक्रामी इलेक्ट्रॉनों द्वारा उत्सर्जित वैद्युतचुंबकीय तरंगों की आवृत्ति, इसकी नाभिक के चारों ओर परिक्रमण आवृत्ति के बराबर है। अत: उत्सर्जित प्रकाश की प्रारंभिक आवृत्ति 6.6×10^{15} Hz होगी।

नील्स बोर (1885 – 1962) ने रदरफोर्ड के मॉडल में नयी विकासशील क्वांटम परिकल्पना के विचारों को जोड़कर कुछ रूपांतर किया। नील्स बोर ने 1912 में कई महीनों तक रदरफोर्ड की प्रयोगशाला में अध्ययन किया था तथा वह रदरफोर्ड के नाभिकीय मॉडल की वैधता के बारे में पूरी तरह आश्वस्त थे। उपरोक्त दुविधा में उलझे बोर ने 1913 में निष्कर्ष निकाला कि यद्यपि वैद्युतचुंबकीय सिद्धांत, वृहत स्तरीय परिघटनाओं को व्याख्या करने में सक्षम है तथापि इस सिद्धांत को परमाणु स्तर के प्रक्रमों में प्रयुक्त नहीं किया जा सकता। यह स्पष्ट हो गया कि परमाणु-संरचना और इसका परमाण्वीय स्पेक्ट्रम से संबंध समझने के लिए क्लासिकी यांत्रिकी और वैद्युतचुंबकत्व के स्थापित सिद्धांतों से आमूल विचलन की आवश्यकता होगी। बोर ने क्लासिकी एवं प्रारंभिक क्वांटम संकल्पनाओं को संयुक्त करके तीन अभिगृहीतों के रूप में अपना सिद्धांत प्रस्तुत किया। ये अभिगृहीत हैं :

(i) बोर का पहला अभिगृहीत था कि *किसी परमाणु में कोई इलेक्ट्रॉन निश्चित स्थायी कक्षाओं में विकिरण ऊर्जा उत्सर्जित किए बिना परिक्रमण कर सकता है।* यह वैद्युतचुंबकीय सिद्धांत के अनुमानों के विपरीत है। इस अभिगृहीत के अनुसार प्रत्येक परमाणु की कुछ निश्चित स्थायी अवस्थाएँ हैं जिसमें यह रह सकता है और प्रत्येक संभव अवस्था में निहित कुल ऊर्जा निश्चित होती है। इन संभावित अवस्थाओं को परमाणु की स्थिर अवस्थाएँ कहते हैं।

(ii) बोर का दूसरा अभिगृहीत इन स्थायी कक्षाओं को परिभाषित करता है। इस अभिगृहीत के अनुसार *इलेक्ट्रॉन नाभिक के चारों ओर केवल उन कक्षाओं में ही परिक्रमण करता है जिनके लिए कोणीय संवेग का मान $h/2\pi$ का पूर्णांक गुणज होता है।* जहाँ h प्लांक नियतांक ($= 6.6 \times 10^{-34}$ J s) । अत: परिक्रमा करते हुए इलेक्ट्रॉन का कोणीय संवेग (L) क्वांटित है। अर्थात

$$L = nh/2\pi \qquad (12.11)$$

(iii) बोर के तीसरे अभिगृहीत में परमाणु सिद्धांत में प्लांक तथा आइंसटाइन द्वारा विकसित प्रारंभिक क्वांटम परिकल्पनाओं को समाविष्ट किया गया। इसके अनुसार *कोई इलेक्ट्रॉन अपने विशेष रूप से उल्लिखित अविकिरणी कक्षा से दूसरी निम्न ऊर्जा वाली कक्षा में संक्रमण कर सकता है। जब यह ऐसा करता है तो एक फोटॉन उत्सर्जित होता है जिसकी ऊर्जा प्रारंभिक एवं अंतिम अवस्थाओं की ऊर्जा के अंतर के बराबर होती है। उत्सर्जित फोटॉन की आवृत्ति निम्न व्यंजक द्वारा दी जाती है :*

$$h\nu = E_i - E_f \qquad (12.12)$$

जहाँ E_i एवं E_f प्रारंभिक और अंतिम अवस्थाओं की ऊर्जाएँ हैं, $E_i > E_f$।

समीकरण (12.4) में हाइड्रोजन परमाणु के लिए विभिन्न ऊर्जा स्थितियों की ऊर्जाएँ ज्ञात करने का व्यंजक दिया गया है। लेकिन इस समीकरण में इलेक्ट्रॉन कक्ष की त्रिज्या r की आवश्यकता है। r का मान परिकलित करने के लिए, इलेक्ट्रॉन के कोणीय संवेग से संबंधित बोर के दूसरे अभिगृहीत-क्वांटमीकरण प्रतिबंध का प्रयोग करते हैं। कोणीय संवेग L होता है

$$L = mvr$$

क्वांटमीकरण का बोर के दूसरे अभिगृहीत [समीकरण (12.11)] के अनुसार कोणीय संवेग के अनुमत मान $h/2\pi$ के पूर्णांक गुणज होते हैं।

$$L_n = mv_n r_n = \frac{nh}{2\pi} \qquad (12.13)$$

जहाँ n एक पूर्णांक है, r_n संभावित कक्ष n^{th} की त्रिज्या है तथा v_n, n^{th} कक्ष में गतिमान इलेक्ट्रॉन की चाल है। अनुमत कक्षों को n के मान के अनुसार, 1, 2, 3 ..., द्वारा क्रमांकित किया गया है, जिन्हें कक्ष की *मुख्य क्वांटम संख्या* कहते हैं।

समीकरण (12.3) से v_n तथा r_n के बीच संबंध है

$$v_n = \frac{e}{\sqrt{4\pi\varepsilon_0 m r_n}}$$

इसे समीकरण (12.13) के साथ संयोजित करने पर हमें v_n तथा r_n के लिए निम्न व्यंजक प्राप्त होते हैं,

$$v_n = \frac{1}{n}\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{(h/2\pi)} \qquad (12.14)$$

तथा

$$r_n = \left(\frac{n^2}{m}\right)\left(\frac{h}{2\pi}\right)^2 \frac{4\pi\varepsilon_0}{e^2} \qquad (12.15)$$

समीकरण (12.14) दर्शाता है कि n^{th} कक्षा में इलेक्ट्रॉन की कक्षीय-चाल, गुणक n से कम हो जाती है। समीकरण (12.15) का उपयोग करके अंतरतम कक्षा ($n = 1$) का साइज़ निम्न प्रकार प्राप्त किया जा सकता है।

$$r_1 = \frac{h^2\varepsilon_0}{\pi m e^2}$$

इसे *बोर त्रिज्या* कहते हैं और संकेत a_0 द्वारा निरूपित करते हैं। इस प्रकार,

$$a_0 = \frac{h^2\varepsilon_0}{\pi m e^2} \qquad (12.16)$$

h, m, ε_0 तथा e के मान प्रतिस्थापित करने पर $a_0 = 5.29 \times 10^{-11}$ m प्राप्त होता है। समीकरण (12.15) से यह भी देखा जा सकता है कि कक्षों की त्रिज्याओं में n^2 के साथ वृद्धि होती है।

किसी हाइड्रोजन परमाणु की स्थायी अवस्था में इलेक्ट्रॉन की कुल ऊर्जा, समीकरण (12.4) में कक्षीय त्रिज्या का मान प्रतिस्थापित करने पर प्राप्त की जा सकती है। यथा

$$E_n = -\left(\frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0}\right)\left(\frac{m}{n^2}\right)\left(\frac{2\pi}{h}\right)^2\left(\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}\right)$$

अथवा $$E_n = -\frac{me^4}{8n^2\varepsilon_0^2h^2} \qquad (12.17)$$

समीकरण (12.17) में नियतांकों के मान रखने पर हमें प्राप्त होगा

$$E_n = -\frac{2.18 \times 10^{-18}}{n^2}\,\text{J} \qquad (12.18)$$

परमाण्वीय ऊर्जाएँ प्रायः जूल के स्थान पर इलेक्ट्रॉन वोल्ट (eV) में व्यक्त की जाती हैं। क्योंकि $1\ \text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}$ J। समीकरण (12.18) को पुनः इस प्रकार लिखा जा सकता है

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2}\ \text{eV} \qquad (12.19)$$

किसी कक्ष में गतिमान इलेक्ट्रॉन की कुल ऊर्जा के व्यंजक में ऋणात्मक चिह्न इस बात का द्योतक है कि इलेक्ट्रॉन, परमाणु के नाभिक से आबद्ध है। अतः, हाइड्रोजन परमाणु से इलेक्ट्रॉन को नाभिक से (या हाइड्रोजन परमाणु में प्रोटॉन से) अनंत दूरी तक विलग करने के लिए ऊर्जा की आवश्यकता होगी।

समीकरणों (12.17) – (12.19) की व्युत्पत्ति इस कल्पना पर आधारित है कि इलेक्ट्रॉन की कक्षाएँ वृत्तीय हैं, यद्यपि व्युत्क्रम वर्ग बल के अधीन कक्षाएँ सामान्यत: दीर्घवृत्तीय होती हैं। (सभी ग्रह सूर्य के व्युत्क्रम वर्ग गुरुत्वीय बल के अधीन दीर्घवृत्तीय कक्षाओं में गतिमान हैं)। तथापि जर्मन भौतिकविज्ञानी अर्नोल्ड सोमरफैल्ड (1868 – 1951) ने यह दर्शाया था कि यदि वृत्तीय कक्षा के प्रतिबंध को शिथिल कर दिया जाए तब भी ये समीकरण दीर्घवृत्तीय कक्षाओं पर भी समान रूप से लागू होती हैं।

परमाणु में इलेक्ट्रॉन की स्थिति : कक्षा बनाम ऑर्बिटल

भौतिकी के अध्ययन में किसी न किसी स्तर पर हमारा परिचय परमाणु के बोर मॉडल से कराया जाता है। क्वांटम यांत्रिकी तथा विशेष रूप से परमाणु की संरचना की व्याख्या करने में इस मॉडल का विशेष स्थान है। त्वरित कण के निरंतर ऊर्जा-विकिरित करने के क्लासिकी सिद्धांत के विपरीत, बोर द्वारा निश्चित ऊर्जा कक्ष का क्रांतिकारी विचार एक उपलब्धि है। बोर ने निश्चित कक्षाओं में परिक्रामी इलेक्ट्रॉनों के कोणीय संवेग के क्वांटमीकरण के विचार को भी प्रस्तुत किया। इस प्रकार परमाणु की संरचना का यह एक सेमी-क्लासिकी चित्रण था।

अब, क्वांटम यांत्रिकी के विकास के साथ हमें परमाणु की संरचना की अधिक अच्छी समझ है। शोडिंगर तरंग समीकरण के हलों ने परमाणु के साथ प्रोटॉनों के आकर्षण बल के कारण आबद्ध इलेक्ट्रॉनों को तरंग के सदृश निर्धारित किया।

बोर मॉडल में किसी इलेक्ट्रॉन का कक्ष नाभिक के चारों ओर इलेक्ट्रॉन की गति का वृत्तीय पथ है। परंतु क्वांटम यांत्रिकी के अनुसार, हम किसी परमाणु में इलेक्ट्रॉन की गति को किसी निश्चित पथ के साथ संबद्ध नहीं कर सकते। हम केवल नाभिक के चारों ओर दिक्स्थान के किसी निश्चित भाग में इलेक्ट्रॉन के मिलने की प्रायिकता के बारे में बात कर सकते हैं। यह प्रायिकता एकल-इलेक्ट्रॉन तरंग फलन जिसे कक्षक (ऑर्बिटल) कहते हैं, से अनुमानित की जा सकती है। यह फलन केवल इलेक्ट्रॉन के निर्देशांक पर निर्भर करता है।

अत: यह आवश्यक है कि हम इन दो मॉडलों में सूक्ष्म अंतरों को समझें :

- बोर मॉडल केवल एक इलेक्ट्रॉन परमाणु/आयन के लिए वैध है; इस मॉडल में प्रत्येक कक्षा के लिए ऊर्जा का एक नियत मान होता है, जो मुख्य क्वांटम संख्या n पर निर्भर करता है। अब हमें ज्ञात है कि किसी इलेक्ट्रॉन की स्थिर अवस्था से संबद्ध ऊर्जा एक इलेक्ट्रॉन परमाणु/आयन में केवल n पर निर्भर है। बहुइलेक्ट्रॉन-परमाणु/आयन के लिए यह सत्य नहीं है।
- हाइड्रोजन जैसे परमाणु/आयन के लिए प्राप्त शोडिंगर तरंग समीकरण का हल जिसे तरंग फलन कहते हैं, नाभिक के चारों ओर विभिन्न क्षेत्रों में किसी इलेक्ट्रॉन की प्रायिकता को ज्ञात करने के लिए सूचना प्रदान करता है। इस ऑर्बिटल की बोर मॉडल में इलेक्ट्रॉन के लिए परिभाषित कक्षा से कोई समानता नहीं है।

उदाहरण 12.5

उदाहरण 12.5 10 kg का कोई उपग्रह 8000 km त्रिज्या की एक कक्षा में पृथ्वी का एक चक्कर प्रत्येक 2 h में लगाता है। यह मानते हुए कि बोर का कोणीय संवेग का अभिगृहीत, उसी प्रकार उपग्रह पर लागू होता है जिस प्रकार कि यह हाइड्रोजन के परमाणु में किसी इलेक्ट्रॉन के लिए मान्य है, उपग्रह की कक्षा की क्वांटम संख्या ज्ञात कीजिए।

हल

समीकरण (12.13) से हम पाते हैं

$m\ v_n r_n = nh/2\pi$

उदाहरण 12.5

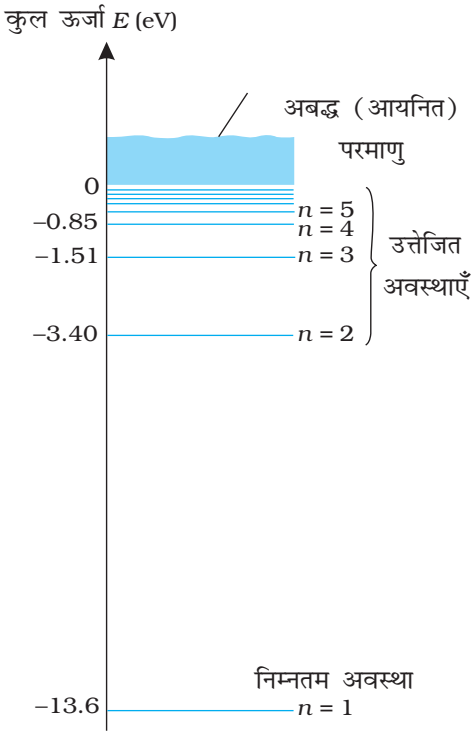
यहाँ $m = 10$ kg तथा $r_n = 8 \times 10^6$ m। घूमते हुए उपग्रह का आवर्त काल T, 2 h है। अर्थात् $T = 7200$ s।
अतः वेग $v_n = 2\pi r_n/T$
उपग्रह की कक्षा की क्वांटम संख्या
$n = (2\pi r_n)^2 \times m/(T \times h)$.
मानों को प्रतिस्थापित करने पर,
$n = (2\pi \times 8 \times 10^6 \text{ m})^2 \times 10/(7200 \text{ s} \times 6.64 \times 10^{-34} \text{ J s})$
$= 5.3 \times 10^{45}$
ध्यान दीजिए कि उपग्रह की गति के लिए क्वांटम संख्या अत्यंत अधिक है! वास्तव में इतनी अधिक क्वांटम संख्या के लिए क्वांटमीकरण प्रतिबंधों के परिणाम क्लासिकी भौतिकी के परिणामों के समीप हैं।

12.4.1 ऊर्जा स्तर

परमाणु की ऊर्जा उस समय *न्यूनतम* (अधिकतम ऋणात्मक मान) होती है जब उसका इलेक्ट्रॉन नाभिक की निकटतम कक्षा (अर्थात् $n = 1$) में परिक्रमण करता है। $n = 2, 3 \ldots$ के लिए, ऊर्जा E के निरपेक्ष मान कम होते जाते हैं, अतः बाह्य कक्षा की ओर जाने पर कक्षाओं में ऊर्जा अधिक होती जाती है। परमाणु की *न्यूनतम* अवस्था में जिसे *निम्नतम अवस्था* कहते हैं इलेक्ट्रॉन की ऊर्जा न्यूनतम होती है, तथा इलेक्ट्रॉन, न्यूनतम त्रिज्या (बोर त्रिज्या a_o) की कक्षा में परिक्रमण करता है। इस अवस्था की ऊर्जा ($n = 1$), E_1 –13.6 eV है। अतः हाइड्रोजन परमाणु की निम्नतम अवस्था से इलेक्ट्रॉन को मुक्त कराने के लिए आवश्यक न्यूनतम ऊर्जा 13.6 eV है। इसे हाइड्रोजन परमाणु की *आयनन ऊर्जा* भी कहते हैं। बोर के मॉडल के आधार पर प्राप्त मान आयनन ऊर्जा के प्रायोगिक मानों से उत्तम अनुरूपता रखता है।

कमरे के ताप पर, अधिकांश हाइड्रोजन परमाणु अपनी निम्नतम अवस्था में रहते हैं। जब कोई परमाणु इलेक्ट्रॉन संघट्ट जैसे प्रक्रमों द्वारा ऊर्जा प्राप्त करता है, तब वह अस्थायी रूप से इतनी ऊर्जा अर्जित कर सकता है जो इलेक्ट्रॉन को उच्च कक्षाओं तक पहुँचाने के लिए पर्याप्त होती है। तब वह परमाणु *उत्तेजित अवस्था* में कहलाता है। समीकरण (12.19) से $n = 2$ के लिए; ऊर्जा E_2, –3.40 eV है। इसका अर्थ यह हुआ कि हाइड्रोजन परमाणु में किसी इलेक्ट्रॉन को इसकी पहली उत्तेजित अवस्था में उत्तेजित करने के लिए आवश्यक ऊर्जा $E_2 - E_1 = -3.40 \text{ eV} - (-13.6) \text{ eV} = 10.2 \text{ eV}$ होगी। इसी प्रकार, $E_3 = -1.53$ eV तथा $E_3 - E_1 = 12.09$ eV। अर्थात्, हाइड्रोजन परमाणु को इसकी निम्नतम अवस्था से ($n = 1$) दूसरी उत्तेजित अवस्था ($n = 3$), तक उत्तेजित करने के लिए 12.09 eV ऊर्जा की आवश्यकता होती है। यह क्रम इसी प्रकार आगे चलता रहता है। इन उत्तेजित अवस्थाओं से इलेक्ट्रॉन फिर अपनी निम्न ऊर्जा अवस्था में वापस गिर सकता है। इस प्रक्रिया में वह एक फोटॉन उत्सर्जित करता है। इस प्रकार, हाइड्रोजन परमाणु की उत्तेजित अवस्था बढ़ाने पर (अर्थात n के बढ़ने पर) उत्तेजित परमाणु से इलेक्ट्रॉन को स्वतंत्र करने के लिए आवश्यक न्यूनतम ऊर्जा घटती है।

समीकरण (12.19) से अभिकलित हाइड्रोजन परमाणु की स्थायी अवस्थाओं का ऊर्जा स्तर आरेख* चित्र (12.8) में दर्शाया गया है। मुख्य क्वांटम संख्या n



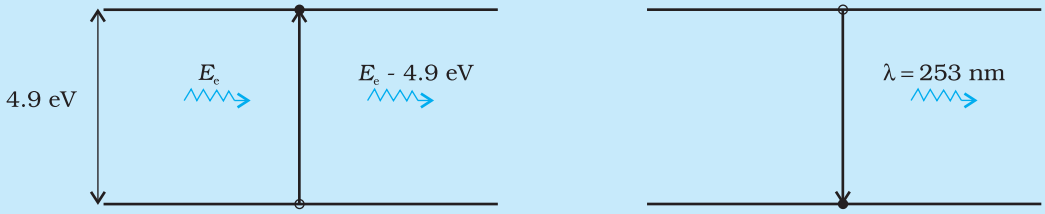
चित्र 12.8 हाइड्रोजन परमाणु के लिए ऊर्जा-स्तर आरेख। कमरे के ताप पर हाइड्रोजन परमाणु में इलेक्ट्रॉन अपना अधिकांश समय निम्नतम अवस्था में व्यतीत करता है। हाइड्रोजन परमाणु को आयनित करने के लिए किसी इलेक्ट्रॉन को निम्नतम अवस्था से 13.6 eV ऊर्जा अवश्य उपलब्ध करानी चाहिए। (क्षैतिज रेखाएँ अनुमत ऊर्जा अवस्थाओं की उपस्थिति को दर्शाती हैं।)

* किसी इलेक्ट्रॉन की $E = 0$ eV से अधिक कुछ भी कुल ऊर्जा हो सकती है। ऐसी दशाओं में इलेक्ट्रॉन स्वतंत्र होता है। इस प्रकार $E = 0$ eV से ऊपर चित्र 12.8 में दर्शाए अनुसार ऊर्जा अवस्थाओं का एक सांतत्य है।

स्थायी अवस्थाओं को ऊर्जा के आरोही क्रम में अंकित करता है। इस चित्र में उच्चतम ऊर्जा अवस्था समीकरण (12.19) में $n = \infty$ के संगत है तथा इसकी ऊर्जा 0 eV है। यह परमाणु की वह ऊर्जा है जब नाभिक से इलेक्ट्रॉन पूरी तरह दूर कर दिया गया है ($r = \infty$) और वह विराम में है। ध्यान दीजिए कि उत्तेजित अवस्थाओं की ऊर्जाएँ n के बढ़ने पर किस प्रकार पास-पास आ जाती हैं।

फ्रैंक - हर्ट्ज़ प्रयोग

किसी परमाणु में विविक्त ऊर्जा स्तरों के अस्तित्व की सीधी पुष्टि सन् 1914 में जेम्स फ्रैंक तथा गुस्ताव हर्ट्ज़ द्वारा की गई। उन्होंने पारे के वाष्प के स्पेक्ट्रम का अध्ययन, वाष्प से विभिन्न गतिज ऊर्जाओं के इलेक्ट्रॉन गुज़ार कर किया। इलेक्ट्रॉन की ऊर्जा परिवर्तित करने के लिए उन पर परिवर्ती तीव्रता के विद्युत क्षेत्र लगाए गए। इलेक्ट्रॉनों ने पारे के परमाणुओं से संघट्ट किया तथा पारे के परमाणुओं को अपनी ऊर्जा अंतरित कर दी। यह तभी संभव हो सकता है जब इलेक्ट्रॉन की ऊर्जा, पारे के उस ऊर्जा स्तर जिसमें इलेक्ट्रॉन हों तथा इससे ऊँचे किसी रिक्त ऊर्जा स्तर (चित्र देखिए) के बीच ऊर्जा अंतर, से अधिक हो। उदाहरण के लिए, पारे के किसी घिरे हुए ऊर्जा स्तर तथा खाली ऊर्जा स्तर में 4.9 eV का ऊर्जा अंतर है। यदि कोई इलेक्ट्रॉन जिसकी ऊर्जा 4.9 eV या इससे अधिक है, पारे से गुज़रता है तो पारे के परमाणु का कोई इलेक्ट्रॉन टकराने वाले इलेक्ट्रॉन से ऊर्जा अवशोषित कर सकता है तथा ऊँचे स्तर पर उत्तेजित हो सकता है [चित्र(a)]। टकराने वाले इलेक्ट्रॉन की गतिज ऊर्जा इतनी ही मात्रा से कम हो जाएगी।



(a) (b)

उत्तेजित इलेक्ट्रॉन बाद में विकिरण उत्सर्जित करके निम्नतम अवस्था पर वापस आ जाएगा [चित्र(b)]। उत्सर्जित विकिरण की तरंगदैर्घ्य होगी :

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{6.625 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^{8}}{4.9 \times 1.6 \times 10^{-19}} = 253 \text{ nm}$$

सीधे मापन द्वारा फ्रैंक तथा हर्ट्ज़ ने देखा कि पारे के उत्सर्जन स्पेक्ट्रम में इस तरंगदैर्घ्य के संगत एक रेखा है। बोर के परमाणु में विविक्त ऊर्जा स्तरों के मूल विचारों तथा फोटॉन उत्सर्जन के प्रक्रम की प्रायोगिक पुष्टि के लिए फ्रैंक तथा हर्ट्ज़ को 1925 में नोबेल पुरस्कार से सम्मानित किया गया।

12.5 हाइड्रोजन परमाणु का लाइन स्पेक्ट्रम

बोर के मॉडल के तृतीय अभिग्रहीत के अनुसार, जब कोई परमाणु उच्च ऊर्जा स्थिति जिसकी क्वांटम संख्या n_i है, से निम्न ऊर्जा स्थिति जिसकी क्वांटम संख्या n_f है ($n_f < n_i$) में संक्रमण करता है, तब ऊर्जा के इस अंतर को आवृत्ति ν_{if} का एक फोटॉन वहन करता है, ताकि

$$h\nu_{if} = E_{n_i} - E_{n_i} \qquad (12.20)$$

E_{n_f} और E_{n_i} के लिए समीकरण (12.16) का प्रयोग करने पर

$$h\nu_{if} = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2}\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) \qquad (12.21)$$

$$\text{अथवा } \nu_{if} = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^3}\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) \qquad (12.22)$$

समीकरण (12.21) हाइड्रोजन परमाणु के स्पेक्ट्रम के लिए रिडबर्ग का सूत्र है। इस संबंध में यदि हम $n_f = 2$ और $n_i = 3,4,5...$ प्रतिस्थापित करते हैं, तो यह संबंध बामर श्रेणी के लिए समीकरण (12.10) के सदृश परिवर्तित हो जाता है। इससे हम रिडबर्ग नियतांक R का मान ज्ञात कर सकते हैं जो इस प्रकार है :

$$R = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^3 c} \qquad (12.23)$$

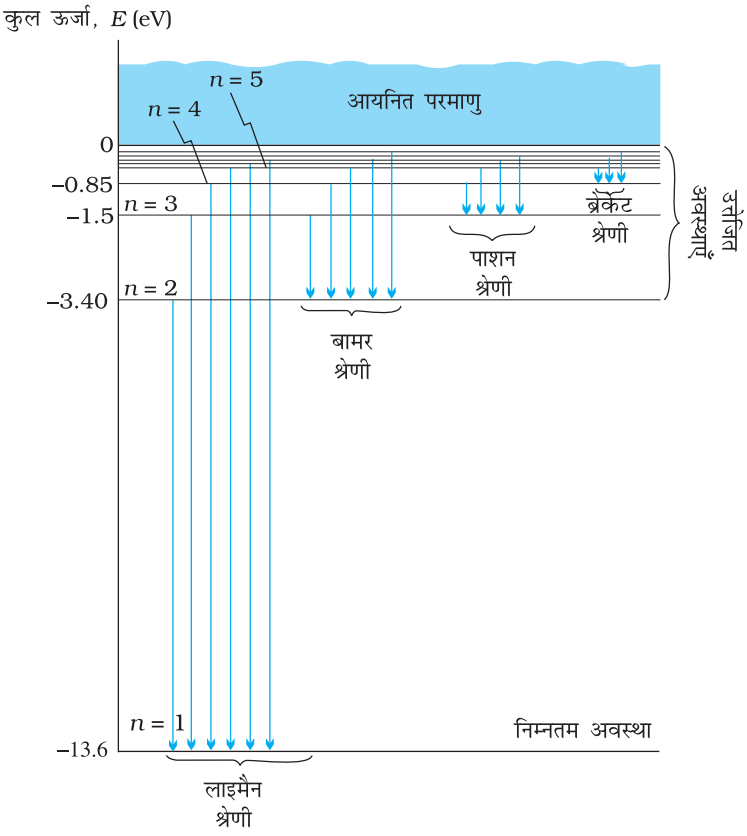
समीकरण (12.23) में विभिन्न नियतांकों के मान प्रतिस्थापित करने पर, हम पाते हैं कि

$$R = 1.03 \times 10^7\ \text{m}^{-1}$$

यह मान आनुभविक बामर सूत्र से प्राप्त मान ($1.097 \times 10^7\ \text{m}^{-1}$) के अति निकट है। सैद्धांतिक एवं प्रायोगिक मानों के इस सामंजस्य ने बोर-मॉडल की स्पष्ट एवं प्रभावशाली संपुष्टि की है।

चूँकि n_f और n_i दोनों पूर्णांक हैं अत: इससे तुरंत परिणाम प्राप्त होता है कि परमाण्वीय स्तरों के मध्य संक्रमणों में, विभिन्न विविक्त आवृत्तियों के प्रकाश उत्सर्जित होते हैं। हाइड्रोजन स्पेक्ट्रम में बामर सूत्र $n_f = 2$ और $n_i = 3, 4, 5$ आदि के तदनुरूपी है। बोर-मॉडल में अन्य रेखाओं की उपस्थिति को भी बताया गया था जो $n_f = 1$ और $n_i = 2, 3$ आदि; $n_f = 3$ और $n_i = 4, 5...$ इत्यादि तथा संक्रमणों के तदनुरूपी हो सकती हैं। इन श्रेणियों की पहचान वास्तव में स्पेक्ट्रोस्कोपिक शोध के समय हुई जिन्हें लाइमैन, बामर, पाशन, ब्रेकेट तथा फुंट श्रेणियों के नाम से जाना जाता है। इन श्रेणियों के तदनुरूपी इलेक्ट्रॉनिक संक्रमण चित्र (12.9) में दर्शाए गए हैं।

जब इलेक्ट्रॉन उच्च ऊर्जा स्थिति से निम्न ऊर्जा स्थिति में आते हैं तो फोटॉन उत्सर्जित होते हैं तथा परमाण्वीय स्पेक्ट्रम की अनेक रेखाएँ उत्पन्न होती हैं। इन स्पेक्ट्रमी रेखाओं को *उत्सर्जन रेखाएँ* कहते हैं। लेकिन जब कोई परमाणु फोटॉन को अवशोषित करता है जिसकी ठीक वही ऊर्जा है जो किसी इलेक्ट्रॉन को निम्न ऊर्जा स्थिति से उच्च ऊर्जा



चित्र 12.9 लाइन स्पेक्ट्रम ऊर्जा स्तरों के बीच संक्रमणों के कारण उत्पन्न होता है।

स्थिति में संक्रमण के लिए आवश्यक होती है, तो इस प्रक्रम को *अवशोषण* कहते हैं। अत: यदि सतत परिसर की आवृत्तियों के फोटॉन किसी विरलित गैस से गुज़रने के पश्चात किसी स्पेक्ट्रोमीटर से विश्लेषित किए जाते हैं तो संतत स्पेक्ट्रम में अदीप्त स्पेक्ट्रमी अवशोषित रेखाओं की श्रेणी दिखाई देती है। अदीप्त रेखाएँ उन आवृत्तियों को निर्दिष्ट करती हैं जो गैस के परमाणुओं द्वारा अवशोषित की गई हैं।

हाइड्रोजन परमाणु के स्पेक्ट्रम का बोर मॉडल द्वारा दिया गया स्पष्टीकरण एक प्रतिभाशाली महान उपलब्धि था जिसने आधुनिक क्वांटम सिद्धांत की प्रगति को अत्यधिक प्रोत्साहित किया। सन् 1922 में बोर को भौतिकी में नोबेल पुरस्कार से सम्मानित किया गया।

उदाहरण 12.6

उदाहरण 12.6 रिडबर्ग सूत्र का उपयोग करके हाइड्रोजन स्पेक्ट्रम की लाइमैन श्रेणी में प्रथम चार स्पेक्ट्रमी रेखाओं की तरंगदैर्घ्य को परिकलित कीजिए।

हल रिडबर्ग सूत्र इस प्रकार व्यक्त किया जाता है :

$$hc/\lambda_{if} = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2}\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)$$

लाइमैन श्रेणी की प्रथम चार रेखाओं की तरंगदैर्घ्य $n_i = 2,3,4,5$ से $n_f = 1$ के संक्रमण के तदनुरूपी होती है। हम जानते हैं कि

$$\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} = 13.6 \text{ eV} = 21.76 \times 10^{-19} \text{ J}$$

अत:

$$\lambda_{if} = \frac{hc}{21.76 \times 10^{-19}\left(\frac{1}{1} - \frac{1}{n_i^2}\right)} \text{m}$$

$$= \frac{6.625 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 \times n_i^2}{21.76 \times 10^{-19} \times (n_i^2 - 1)} \text{m} = \frac{0.9134\ n_i^2}{(n_i^2 - 1)} \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$= 913.4\ n_i^2/(n_i^2 - 1)\ \text{Å}$$

इस संबंध में n_i=2,3,4,5 प्रतिस्थापित करने पर हमें, चारों वांछित तरंगदैर्घ्य प्राप्त होती हैं जो इस प्रकार हैं : $\lambda_{21} = 1218$ Å, $\lambda_{31} = 1028$ Å, $\lambda_{41} = 974.3$ Å तथा $\lambda_{51} = 951.4$ Å।

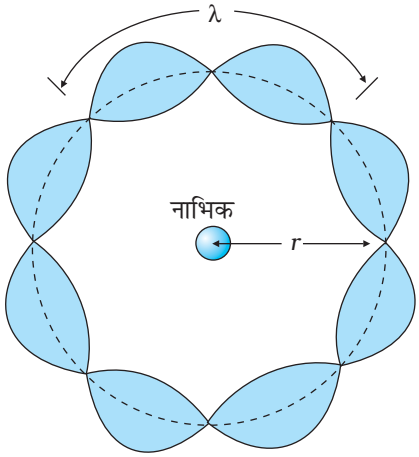
12.6 बोर के क्वांटमीकरण के द्वितीय अभिगृहीत का दे ब्रॉग्ली द्वारा स्पष्टीकरण

बोर द्वारा प्रस्तुत परमाणु के मॉडल के सभी अभिगृहीतों में संभवत: दूसरा अभिगृहीत सबसे अधिक उलझन पैदा करने वाला था। इसके कथन के अनुसार नाभिक के चारों ओर परिक्रमा करते इलेक्ट्रॉन का कोणीय संवेग क्वांटित है (अर्थात $L_n = nh/2\pi$; $n = 1, 2, 3 \ldots$)। कोणीय संवेग के केवल वही मान क्यों होते हैं जो $h/2\pi$ के पूर्णांक गुणज हैं? बोर द्वारा अपना मॉडल प्रस्तुत करने के दस वर्ष पश्चात सन् 1923 में एक फ्रांसीसी भौतिक वैज्ञानिक लुइस दे ब्रॉग्ली ने इस समस्या का हल ढूँढ़ा।

हमने अध्याय 11 में दे ब्रॉग्ली की परिकल्पना का अध्ययन किया था जिसके अनुसार, द्रव्य कण जैसे इलेक्ट्रॉन भी तरंग जैसे लक्षण प्रदर्शित करते हैं। सी.जे. डेविसन तथा एल.एच. जर्मर द्वारा

1927 में प्रायोगिक तौर पर इलेक्ट्रॉनों की तरंग प्रकृति का सत्यापन किया गया। लुइस दे ब्रॉग्ली ने तर्क किया कि इलेक्ट्रॉन को बोर द्वारा प्रस्तावित इसकी वृत्ताकार कक्षा में, एक कण-तरंग के रूप में देखा जाना चाहिए। डोरी में गमन करती तरंगों के सदृश, कण तरंगें भी अनुनादी अवस्थाओं में अप्रगामी तरंगें उत्पन्न कर सकती हैं। कक्षा 11 के लिए भौतिकी की पाठ्यपुस्तक के अध्याय 15 से हम जानते हैं कि किसी तनित डोरी को विभिन्न स्थानों पर कर्षण करके, उसमें विभिन्न तरंगदैर्घ्यों को उत्पन्न किया जा सकता है। तथापि, केवल वही तरंगदैर्घ्य विद्यमान रह पाती हैं जिनके सिरों पर निष्पंद होते हैं तथा जो डोरी में अप्रगामी तरंग बनाती हैं। इसका अर्थ है कि किसी डोरी में, अप्रगामी तरंगें तभी बनेंगी जब तरंग द्वारा डोरी में एक ओर जाने में तथा वापस आने में तय की गई कुल दूरी, एक तरंगदैर्घ्य, दो तरंगदैर्घ्य, अथवा कोई भी पूर्णांक संख्या की तरंगदैर्घ्य के बराबर हो। अन्य तरंगदैर्घ्यों की तरंगों में परावर्तन के पश्चात आपस में व्यतिकरण होता है तथा उनके आयाम शीघ्रता से शून्य हो जाते हैं। r_n त्रिज्या की n^{th} की कक्षा में परिक्रमा करते किसी इलेक्ट्रॉन द्वारा कक्षा की परिधि में तय की गई कुल दूरी $2\pi r_n$ होगी। अत:

$$2\pi r_n = n\lambda, \quad n = 1, 2, 3... \qquad (12.24)$$



चित्र 12.10 वृत्ताकार कक्षा में एक अप्रगामी तरंग दर्शाई गई है जहाँ पर कक्षा की परिधि में चार दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य आती हैं।

चित्र 12.10 में किसी वृत्ताकार कक्षा पर जिसके लिए $n = 4$ है, एक अप्रगामी कण तरंग दर्शायी गई है। इस प्रकार, $2\pi r_n = 4\lambda$, जहाँ λ n^{th} कक्षा में परिक्रमा करते हुए इलेक्ट्रॉन की दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य है। अध्याय 11 से, हम जानते हैं $\lambda = h/p$, जहाँ p इलेक्ट्रॉन के संवेग का परिमाण है। यदि इलेक्ट्रॉन की चाल प्रकाश की चाल से बहुत कम है, तो संवेग mv_n होगा। इस प्रकार $\lambda = h/mv_n$ होगा। समीकरण (12.24) से हमें प्राप्त होगा :

$$2\pi r_n = n h/mv_n \quad \text{अथवा} \quad m v_n r_n = nh/2\pi$$

यह बोर द्वारा प्रस्तावित इलेक्ट्रॉन के कोणीय संवेग का क्वांटम प्रतिबंध है [समीकरण (12.13)]। अनुच्छेद 12.5 में हमने देखा है कि यह समीकरण हाइड्रोजन परमाणु में ऊर्जा स्तरों तथा विविक्त कक्षाओं की व्याख्या करने का आधार है। इस प्रकार दे ब्रॉग्ली की परिकल्पना, परिक्रामी इलेक्ट्रॉन के कोणीय संवेग के क्वांटमीकरण की बोर द्वारा प्रस्तावित द्वितीय अभिगृहीत के लिए व्याख्या प्रस्तुत करती है। इलेक्ट्रॉन की क्वांटित कक्षाएँ तथा ऊर्जा स्थितियाँ, इलेक्ट्रॉन की तरंग प्रकृति के कारण हैं और केवल अनुनादी अप्रगामी तरंगें ही अवस्थित रह सकती हैं।

बोर-मॉडल जिसमें चिर प्रतिष्ठित प्रक्षेप पथ चित्रण (नाभिक के चारों ओर ग्रह-सदृश कक्षाएँ) सम्मिलित हैं, हाइड्रोजनसम परमाणुओं*(एकल इलेक्ट्रॉन) के मुख्य लक्षणों, मुख्य रूप से उत्सर्जित अथवा वरणात्मक अवशोषित विकिरणों की आवृत्तियों की उचित भविष्यवाणी करता है। तथापि इस मॉडल की कुछ सीमाएँ हैं। इनमें से कुछ हैं :

(i) बोर-मॉडल हाइड्रोजनसम परमाणुओं के लिए ही उपयुक्त है। द्वि-इलेक्ट्रॉन परमाणु जैसे हीलियम के लिए भी इसे विस्तारित नहीं किया जा सकता। हाइड्रोजनसम* परमाणुओं के लिए बोर मॉडल को एक से अधिक इलेक्ट्रॉन वाले परमाणुओं के विश्लेषण के लिए प्रयोग करने के प्रयत्न किए गए, परंतु कोई सफलता प्राप्त नहीं हुई। कठिनाई यह है कि प्रत्येक इलेक्ट्रॉन केवल धनावेशित नाभिक से ही नहीं परंतु दूसरे सभी इलेक्ट्रॉनों से भी अन्योन्य क्रिया करता है।

* हाइड्रोजनसम परमाणु वे परमाणु हैं जिनमें धन आवेश $+Ze$ युक्त नाभिक और एकल इलेक्ट्रॉन होता है जहाँ Z प्रोटॉन संख्या है। हाइड्रोजन परमाणु, एकधा आयनित हीलियम, द्वित: आयनित लीथियम इत्यादि हाइड्रोजनसम परमाणुओं के उदाहरण हैं। इन परमाणुओं में अधिक जटिल इलेक्ट्रॉन-इलेक्ट्रॉन अन्योन्य क्रियाएँ नहीं पाई जातीं।

बोर मॉडल के संरूपण में इलेक्ट्रॉन तथा धनावेशित नाभिक के बीच विद्युत बल सम्मिलित है। इनमें इलेक्ट्रॉनों के मध्य विद्युत बल शामिल नहीं है जो कि बहु-इलेक्ट्रॉन परमाणुओं में आवश्यक रूप से प्रकट होता है।

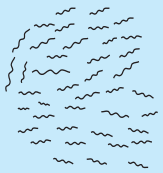
(ii) यद्यपि बोर-मॉडल हाइड्रोजनसम परमाणुओं द्वारा उत्सर्जित प्रकाश की आवृत्तियों की सही भविष्यवाणी करता है, फिर भी यह स्पेक्ट्रम में आवृत्तियों की आपेक्षिक तीव्रताओं की व्याख्या नहीं कर पाता। हाइड्रोजन के उत्सर्जन स्पेक्ट्रम में कुछ दृश्य आवृत्तियों की तीव्रता क्षीण होती है, जबकि दूसरी आवृत्तियों की तीव्रता प्रबल होती है। ऐसा क्यों होता है? प्रायोगिक प्रेक्षण दर्शाते हैं कि कुछ संक्रमण दूसरों की अपेक्षा अधिक स्वीकार्य हैं। बोर-मॉडल विभिन्न संक्रमणों की विविध तीव्रताओं की व्याख्या करने में असमर्थ है।

बोर-मॉडल परमाणु का परिष्कृत चित्र प्रस्तुत करता है तथा इसका जटिल परमाणुओं के लिए व्यापकीकरण नहीं किया जा सकता। जटिल परमाणुओं के लिए हमें क्वांटम यांत्रिकी पर आधारित एक नए मूलभूत सिद्धांत का उपयोग करना होगा जो परमाणु संरचना का अधिक पूर्ण चित्र प्रस्तुत करता है।

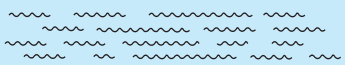
लेसर प्रकाश

किसी भीड़-भाड़ वाले बाज़ार या रेलवे प्लेटफॉर्म की कल्पना कीजिए जहाँ बहुत से मनुष्य एक द्वार से प्रवेश करके सभी दिशाओं में जा रहे हैं। उनके कदम अनियमित हैं तथा उनके बीच में कोई कला-संबंध नहीं है। दूसरी ओर बहुत बड़ी संख्या में सैनिकों को सुव्यवस्थित मार्च करते हुए सोचिए। उन सभी के कदम एक-दूसरे से मिलते हैं। यहाँ इस चित्र को देखिए।

सामान्य स्रोत जैसे मोमबत्ती या किसी बल्ब से उत्सर्जित तथा लेसर से उत्सर्जित प्रकाश में यही अंतर है। परिवर्णी शब्द लेसर, (LASER) से तात्पर्य है : *विकिरण के उद्दीप्त उत्सर्जन द्वारा प्रकाश प्रवर्धन* (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)। 1960 में इसके विकास के साथ ही, इसने विज्ञान और प्रौद्योगिकी के सभी क्षेत्रों में प्रवेश कर लिया। आजकल भौतिकी, रसायन शास्त्र, जीवविज्ञान, आयुर्विज्ञान, शल्य चिकित्सा, इंजीनियरी आदि में इसके अनुप्रयोग हो रहे हैं। कुछ लेसर निम्न क्षमता के होते हैं जिनकी क्षमता 0.5 mW होती है। इन्हें पेंसिल लेसर कहते हैं जो संकेतक की भांति कार्य करते हैं। आजकल विभिन्न क्षमताओं के लेसर उपलब्ध हैं जिनका उपयोग आँख जैसे नाजुक अंगों अथवा आमाशय की ग्रंथि के शल्यकर्म के लिए होता है। अंततः कुछ ऐसे लेसर भी हैं जो इस्पात को भी काट अथवा वेल्ड कर सकते हैं।



(a) किसी बल्ब से उत्सर्जित प्रकाश



(b) लेसर प्रकाश

किसी स्रोत से प्रकाश, तरंगों के पैकेट के रूप में उत्सर्जित होता है। किसी सामान्य स्रोत से आने वाला प्रकाश अनेक तरंगों का मिश्रण होता है। विभिन्न तरंगों में कोई कला संबंध भी नहीं होता। इसलिए, ऐसा प्रकाश, यदि किसी द्वारक से भी गुजरता है तो अत्यंत तेजी से विस्तारित होता है तथा पुंज का साइज़ दूरी के साथ तेज़ी से बढ़ता है। लेसर प्रकाश में प्रत्येक पैकेट का तरंगदैर्घ्य प्रायः समान होता है। तरंग के पैकेट की औसत लंबाई भी बहुत अधिक होती है। इसका अर्थ है कि लंबे समय अंतराल के लिए अच्छा कला सह संबंध होता है। इसके परिणामस्वरूप लेसर पुंज का अपसरण भरपूर कम हो जाता है।

यदि किसी स्रोत में N परमाणु हैं और प्रत्येक परमाणु I तीव्रता का प्रकाश उत्सर्जित कर रहा है, तब किसी सामान्य स्रोत द्वारा उत्पन्न कुल तीव्रता NI के अनुक्रमानुपाती होती है, जबकि लेसर स्रोत में यह NI^2 के अनुक्रमानुपाती है। यह मानते हुए कि N काफ़ी अधिक है, हम देख सकते हैं कि सामान्य स्रोत की अपेक्षा लेसर से प्रकाश अत्यंत तीव्र हो सकता है।

जब अपोलो मिशन के अंतरिक्ष यात्री चंद्रमा पर गए तो उन्होंने उसके पृष्ठ पर पृथ्वी की दिशा की ओर एक दर्पण रखा। तब पृथ्वी पर वैज्ञानिकों ने एक तीव्र लेसर पुंज इसकी ओर भेजा जिसे चंद्रमा पर रखे दर्पण द्वारा परावर्तित कराकर पृथ्वी पर वापस ग्रहण किया गया। परावर्तित लेसर पुंज का साइज़ तथा आने-जाने में लगे संपूर्ण समय को मापा गया। इससे अत्यंत यथार्थतता से (a) लेसर पुंज का अत्यंत कम अपसरण तथा (b) पृथ्वी से चंद्रमा की दूरी, ज्ञात हुई।

सारांश

1. परमाणु कुल मिलाकर वैद्युत उदासीन होता है और इसलिए परमाणु में धनावेश और ऋणावेश की मात्राएँ समान होती हैं।
2. *टॉमसन-मॉडल* में परमाणु धनावेशों का गोलीय मेघ है जिसमें इलेक्ट्रॉन अंत:स्थापित होते हैं।
3. *रदरफोर्ड-मॉडल* में परमाणु का सर्वाधिक द्रव्यमान और इसका कुल धनावेश एक सूक्ष्म नाभिक में संकेंद्रित होता है (प्ररूपत: परमाणु के साइज़ का दस हज़ारवाँ भाग) तथा इलेक्ट्रॉन इसके चारों ओर परिक्रमा करते हैं।
4. परमाणु की संरचना की व्याख्या करने में रदरफोर्ड के नाभिकीय मॉडल में दो मुख्य कठिनाइयाँ हैं : (a) इसके अनुसार परमाणु अस्थिर हैं क्योंकि नाभिक के चारों ओर घूमते हुए त्वरित इलेक्ट्रॉनों को सर्पिल पथ पर नाभिक की ओर अंदर आ जाना चाहिए। यह पदार्थ के स्थायित्व का खंडन करता है। (b) यह विभिन्न तत्वों के परमाणुओं के अभिलाक्षणिक लाइन स्पेक्ट्रम की व्याख्या नहीं कर सकता।
5. प्रत्येक तत्व के परमाणु स्थायी होते हैं और अभिलाक्षणिक स्पेक्ट्रम उत्सर्जित करते हैं। स्पेक्ट्रम में विलग समांतर रेखाओं का समुच्चय होता है जिसे रेखिल स्पेक्ट्रम कहते हैं। यह परमाणु-संरचना के विषय में उपयोगी सूचनाएँ देता है।
6. परमाण्वीय हाइड्रोजन अनेक श्रेणी युक्त रेखिल स्पेक्ट्रम उत्सर्जित करता है। किसी श्रेणी में किसी रेखा की आवृत्ति को दो पदों के अंतर के रूप में व्यक्त किया जा सकता है।

   लाइमैन श्रेणी : $\nu = Rc\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right)$; $n = 2, 3, 4,...$

   बामर श्रेणी : $\nu = Rc\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)$; $n = 3, 4, 5,...$

   पाशन श्रेणी : $\nu = Rc\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right)$; $n = 4, 5, 6,...$

   ब्रेकेट श्रेणी : $\nu = Rc\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2}\right)$; $n = 5, 6, 7,...$

   फुंट श्रेणी : $\nu = Rc\left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2}\right)$; $n = 6, 7, 8,...$
7. परमाणुओं द्वारा उत्सर्जित रेखिल स्पेक्ट्रम तथा परमाणुओं के स्थायित्व की व्याख्या करने के लिए नील्स बोर ने हाइड्रोजनसम परमाणुओं (एकल इलेक्ट्रॉन) के लिए एक मॉडल प्रस्तावित किया। उन्होंने तीन अभिगृहीत प्रस्तुत किए तथा क्वांटम यांत्रिकी की नींव रखी:
   (a) किसी हाइड्रोजन परमाणु में कोई इलेक्ट्रॉन बिना विकिरण ऊर्जा के उत्सर्जन के निश्चित कक्षाओं (जिन्हें स्थायी कक्षा कहते हैं) में परिक्रमण करते हैं।
   (b) स्थायी कक्षा वे हैं जिनके लिए कोणीय संवेग $h/2\pi$ का कोई पूर्णांक गुणज होता है (बोर का क्वांटमीकृत प्रतिबंध)। अर्थात $L = nh/2\pi$, जहाँ n एक पूर्णांक है जिसे क्वांटम संख्या कहते हैं।
   (c) तीसरे अभिगृहीत के अनुसार कोई इलेक्ट्रॉन अपनी एक विनिर्दिष्ट अविकरणी कक्षा से अन्य निम्नतर ऊर्जा की कक्षा में संक्रमण कर सकता है। ऐसा करने में एक फोटॉन उत्सर्जित होता है जिसकी ऊर्जा प्रारंभिक और अंतिम अवस्थाओं की ऊर्जाओं के अंतर के बराबर होती है। उत्सर्जित फोटॉन की आवृत्ति (ν) निम्न संबंध द्वारा दी गई है :

   $h\nu = E_i - E_f$

   कोई परमाणु उसी आवृत्ति के विकिरण को अवशोषित करता है जिसे वह परमाणु उत्सर्जित करता है, इस स्थिति में इलेक्ट्रॉन n से उच्च मान की कक्षा में अंतरित होता है।

   $E_i + h\nu = E_f$

8. कोणीय संवेग के क्वांटमीकरण प्रतिबंध के परिणामस्वरूप, इलेक्ट्रॉन नाभिक की परिक्रमा केवल विशिष्ट त्रिज्याओं की कक्षाओं में ही करता है। हाइड्रोजन परमाणु के लिए इसका मान है

$$r_n = \left(\frac{n^2}{m}\right)\left(\frac{h}{2\pi}\right)^2 \frac{4\pi\varepsilon_0}{e^2}$$

कुल ऊर्जा भी क्वांटित है :

$$E_n = \frac{me^4}{8n^2\varepsilon_0^2h^2}$$

$$= -13.6 \text{ eV}/n^2$$

तब, $n = 1$ अवस्था, निम्नतम अवस्था कहलाती है। हाइड्रोजन परमाणु में निम्नतम अवस्था ऊर्जा का मान -13.6 eV है। n के बड़े मान $(n > 1)$ उत्तेजित अवस्थाओं के संगत हैं। परमाणु इन उत्तेजित अवस्थाओं में, दूसरे परमाणुओं या इलेक्ट्रॉनों से संघट्ट द्वारा अथवा उचित आवृत्ति के फोटॉन को अवशोषित करके, पहुँचते हैं।

9. दे ब्रॉग्ली की परिकल्पना, कि इलेक्ट्रॉन की तरंगदैर्घ्य $\lambda = h/mv$ होती है, ने तरंग-कण के द्वैती संबंध का उपयोग करके बोर की क्वांटित कक्षाओं की व्याख्या की। कक्षाएँ वृत्ताकार अप्रगामी तरंगों के संगत हैं जिनकी कक्षा की परिधि तरंगदैर्घ्यों के पूर्ण गुणजों के बराबर है।
10. बोर मॉडल हाइड्रोजनसम परमाणुओं (एकल इलेक्ट्रॉन) के लिए ही उपयुक्त है। इसे द्वि-इलेक्ट्रॉन परमाणु जैसे हीलियम के लिए भी विस्तारित नहीं किया जा सकता। यह मॉडल हाइड्रोजनसम परमाणुओं की आवृत्तियों की आपेक्षिक तीव्रताओं की भी व्याख्या नहीं कर पाता।

विचारणीय विषय

1. टामसन मॉडल और रदरफोर्ड मॉडल दोनों ही अस्थायी तंत्र बनाते हैं। टॉमसन मॉडल स्थिर वैद्युत रूप से अस्थायी है, जबकि रदरफोर्ड मॉडल कक्षीय इलेक्ट्रॉनों के वैद्युतचुंबकीय विकिरण के कारण अस्थायी होता है।
2. बोर ने कोणीय संवेग (द्वितीय अभिगृहीत) का ही क्वांटमीकरण क्यों किया, किसी और राशि का क्यों नहीं? ध्यान दें कि h तथा कोणीय संवेग की विमा एक ही होती है, और वृत्ताकार कक्षाओं के लिए कोणीय संवेग एक बहुत प्रासंगिक राशि है। अतः द्वितीय अभिगृहीत स्वाभाविक ही है।
3. हाइड्रोजन परमाणु में बोर मॉडल में कक्षीय चित्रण, *अनिश्चितता सिद्धांत* के साथ असंगत था। यह आधुनिक क्वांटम यांत्रिकी द्वारा प्रतिस्थापित कर दिया गया था जिसमें बोर की कक्षाएँ वे क्षेत्र हैं जहाँ इलेक्ट्रॉन के पाए जाने की प्रायिकता बहुत अधिक हो सकती है।
4. सौर परिवार की स्थिति से भिन्न, जहाँ ग्रह-ग्रह के बीच गुरुत्वाकर्षण बल, सूर्य और प्रत्येक ग्रह के बीच गुरुत्वाकर्षण बल (क्योंकि सूर्य का द्रव्यमान किसी भी ग्रह के द्रव्यमान से बहुत अधिक है) की अपेक्षा बहुत कम है, इलेक्ट्रॉन-इलेक्ट्रॉन की अन्योन्य क्रिया के कारण वैद्युत बल का परिमाण इलेक्ट्रॉन-नाभिक वैद्युत बल के तुल्य है, क्योंकि आवेश तथा दूरियाँ परिमाण में समान कोटि की हैं। यही कारण है कि ग्रह सदृश इलेक्ट्रॉन की मान्यता वाला बोर मॉडल बहु-इलेक्ट्रॉन परमाणुओं के लिए उपयुक्त नहीं है।
5. कुछ विशिष्ट कक्षों की परिकल्पना करके जिनमें इलेक्ट्रॉन विकिरित नहीं करते, बोर ने क्वांटम सिद्धांत की नींव रखी। बोर के मॉडल में केवल एक क्वांटम संख्या n सम्मिलित है। नया सिद्धांत जिसे क्वांटम यांत्रिकी कहते हैं, बोर के अभिगृहीत की पुष्टि करता है। तथापि

क्वांटम यांत्रिकी (अधिक व्यापक रूप से मान्य) में, कोई विशेष ऊर्जा स्तर सदैव एक ही क्वांटम अवस्था के संगत नहीं होता। उदाहरण के लिए, कोई अवस्था चार क्वांटम संख्याओं (n, l, m, तथा s) से अभिलक्षणित है, लेकिन शुद्ध कूलॉम विभव के लिए (हाइड्रोजन परमाणु की भांति) ऊर्जा केवल n पर निर्भर करती है।

6. साधारण क्लासिकी अपेक्षाओं के प्रतिकूल, बोर मॉडल में किसी इलेक्ट्रॉन के अपनी कक्षा में परिक्रमण की आवृत्ति का स्पेक्ट्रमी रेखा की आवृत्ति से कोई संबंध नहीं है। स्पेक्ट्रमी रेखा की आवृत्ति h द्वारा विभाजित दो कक्षीय ऊर्जाओं का अंतर होता है। बड़ी क्वांटम संख्याओं (n से $n-1$ तक, n बहुत बड़ा लेने पर) के मध्य संक्रमणों में दोनों के मान समान हो जाते हैं जैसा कि अपेक्षित है।

7. बोर का सेमीक्लासिकी मॉडल जो कुछ तो क्लासिकी भौतिकी के पहलुओं पर तथा कुछ आधुनिक भौतिकी के पहलुओं पर आधारित है, सरलतम हाइड्रोजनसम परमाणुओं का भी सही चित्रण नहीं करता। सही चित्र वास्तव में क्वांटम यांत्रिकी से प्राप्त होता है जो बोर मॉडल से अनेक मूलभूत रूपों में भिन्न है। फिर यदि बोर मॉडल पूर्ण रूप से ठीक नहीं है तो हम इसके बारे में चिंतित क्यों होते हैं? तथापि बोर मॉडल को उपयोगी बनाने वाले कुछ कारण हैं :

   (i) यह मॉडल केवल तीन अभिगृहीतों पर आधारित है लेकिन फिर भी हाइड्रोजन स्पेक्ट्रम की लगभग सभी विशेषताओं की व्याख्या करता है।

   (ii) हमने क्लासिकी भौतिकी की जिन संकल्पनाओं को सीखा है उनका इस मॉडल में समावेश है।

   (iii) मॉडल दर्शाता है कि कुछ भविष्यवाणियों की आशा में, किस प्रकार किसी सैद्धांतिक भौतिकविज्ञानी को, कभी-कभी कुछ सदृश समस्याओं की अक्षरशः उपेक्षा कर देनी चाहिए। यदि सिद्धांत या मॉडल की भविष्यवाणी प्रयोग से मेल खाती है तो वैज्ञानिक को उपेक्षित की गई समस्याओं की व्याख्या करने का प्रयत्न करना चाहिए।

अभ्यास

12.1 प्रत्येक कथन के अंत में दिए गए संकेतों में से सही विकल्प का चयन कीजिए :

(a) टॉमसन मॉडल में परमाणु का साइज़, रदरफोर्ड मॉडल में परमाणवीय साइज़ से ..... होता है।

(अपेक्षाकृत काफ़ी अधिक, भिन्न नहीं, अपेक्षाकृत काफ़ी कम)

(b) ..... में निम्नतम अवस्था में इलेक्ट्रॉन स्थायी साम्य में होते हैं जबकि ..... में इलेक्ट्रॉन, सदैव नेट बल अनुभव करते हैं।

(c) ..... पर आधारित किसी क्लासिकी परमाणु का नष्ट होना निश्चित है।

(टॉमसन मॉडल, रदरफोर्ड मॉडल)

(d) किसी परमाणु के द्रव्यमान का ..... में लगभग संतत वितरण होता है लेकिन ..... में अत्यंत असमान द्रव्यमान वितरण होता है।

(टॉमसन मॉडल, रदरफोर्ड मॉडल)

(e) ..... में परमाणु के धनावेशित भाग का द्रव्यमान सर्वाधिक होता है।

(रदरफोर्ड मॉडल, दोनों मॉडलों)

12.2 मान लीजिए कि स्वर्ण पन्नी के स्थान पर ठोस हाइड्रोजन की पतली शीट का उपयोग करके आपको ऐल्फ़ा-कण प्रकीर्णन प्रयोग दोहराने का अवसर प्राप्त होता है। (हाइड्रोजन 14 K से नीचे ताप पर ठोस हो जाती है।) आप किस परिणाम की अपेक्षा करते हैं?

12.3 पाशन श्रेणी में विद्यमान स्पेक्ट्रमी रेखाओं की लघुतम तरंगदैर्घ्य क्या है?

12.4 2.3 eV ऊर्जा अंतर किसी परमाणु में दो ऊर्जा स्तरों को पृथक कर देता है। उत्सर्जित विकिरण की आवृत्ति क्या होगी यदि परमाणु में इलेक्ट्रॉन उच्च स्तर से निम्न स्तर में संक्रमण करता है?

12.5 हाइड्रोजन परमाणु की निम्नतम अवस्था में ऊर्जा –13.6 eV है। इस अवस्था में इलेक्ट्रॉन की गतिज और स्थितिज ऊर्जाएँ क्या होंगी?

12.6 निम्नतम अवस्था में विद्यमान एक हाइड्रोजन परमाणु एक फोटॉन को अवशोषित करता है जो इसे $n = 4$ स्तर तक उत्तेजित कर देता है। फोटॉन की तरंगदैर्घ्य तथा आवृत्ति ज्ञात कीजिए।

12.7 (a) बोर मॉडल का उपयोग करके किसी हाइड्रोजन परमाणु में $n = 1, 2,$ तथा 3 स्तरों पर इलेक्ट्रॉन की चाल परिकलित कीजिए। (b) इनमें से प्रत्येक स्तर के लिए कक्षीय अवधि परिकलित कीजिए।

12.8 हाइड्रोजन परमाणु में अंतरतम इलेक्ट्रॉन-कक्षा की त्रिज्या 5.3×10^{-11} m है। कक्षा $n = 2$ और $n = 3$ की त्रिज्याएँ क्या हैं?

12.9 कमरे के ताप पर गैसीय हाइड्रोजन पर किसी 12.5 eV की इलेक्ट्रॉन पुंज की बमबारी की गई। किन तरंगदैर्घ्यों की श्रेणी उत्सर्जित होगी?

12.10 बोर मॉडल के अनुसार सूर्य के चारों ओर 1.5×10^{11} m त्रिज्या की कक्षा में, 3×10^4 m/s के कक्षीय वेग से परिक्रमा करती पृथ्वी की अभिलाक्षणिक क्वांटम संख्या ज्ञात कीजिए (पृथ्वी का द्रव्यमान = 6.0×10^{24} kg)।

अतिरिक्त अभ्यास

12.11 निम्नलिखित प्रश्नों के उत्तर दीजिए जो आपको टॉमसन मॉडल और रदरफोर्ड मॉडल में अंतर समझने हेतु अच्छी तरह से सहायक हैं।

(a) क्या टॉमसन मॉडल में पतले स्वर्ण पन्नी से प्रकीर्णित α-कणों का पूर्वानुमानित औसत विक्षेपण कोण, रदरफोर्ड मॉडल द्वारा पूर्वानुमानित मान से अत्यंत कम, लगभग समान अथवा अत्यधिक बड़ा है?

(b) टॉमसन मॉडल द्वारा पूर्वानुमानित पश्च प्रकीर्णन की प्रायिकता (अर्थात α-कणों का 90° से बड़े कोणों पर प्रकीर्णन) रदरफोर्ड मॉडल द्वारा पूर्वानुमानित मान से अत्यंत कम, लगभग समान अथवा अत्यधिक है?

(c) अन्य कारकों को नियत रखते हुए, प्रयोग द्वारा यह पाया गया है कि कम मोटाई t के लिए, मध्यम कोणों पर प्रकीर्णित α -कणों की संख्या t के अनुक्रमानुपातिक है। t पर यह रैखिक निर्भरता क्या संकेत देती है?

(d) किस मॉडल में α-कणों के पतली पन्नी से प्रकीर्णन के पश्चात औसत प्रकीर्णन कोण के परिकलन हेतु बहुप्रकीर्णन की उपेक्षा करना पूर्णतया गलत है?

12.12 हाइड्रोजन परमाणु में इलेक्ट्रॉन एवं प्रोटॉन के मध्य गुरुत्वाकर्षण, कूलॉम-आकर्षण से लगभग 10^{-40} के गुणक से कम है। इस तथ्य को देखने का एक वैकल्पिक उपाय यह है कि यदि इलेक्ट्रॉन एवं प्रोटॉन गुरुत्वाकर्षण द्वारा आबद्ध हों तो किसी हाइड्रोजन परमाणु में प्रथम बोर कक्षा की त्रिज्या का अनुमान लगाइए। आप मनोरंजक उत्तर पाएँगे।

12.13 जब कोई हाइड्रोजन परमाणु स्तर n से स्तर $(n-1)$ पर व्युत्तेजित होता है तो उत्सर्जित विकिरण की आवृत्ति हेतु व्यंजक प्राप्त कीजिए। n के अधिक मान हेतु, दर्शाइए कि यह आवृत्ति, इलेक्ट्रॉन की कक्षा में परिक्रमण की क्लासिकी आवृत्ति के बराबर है।

12.14 क्लासिकी रूप में किसी परमाणु में इलेक्ट्रॉन नाभिक के चारों ओर किसी भी कक्षा में हो सकता

है। तब प्ररूपी परमाण्वीय साइज़ किससे निर्धारित होता है? परमाणु अपने प्ररूपी साइज़ की अपेक्षा दस हज़ार गुना बड़ा क्यों नहीं है? इस प्रश्न ने बोर को अपने प्रसिद्ध परमाणु मॉडल, जो आपने पाठ्यपुस्तक में पढ़ा है, तक पहुँचने से पहले बहुत उलझन में डाला था। अपनी खोज से पूर्व उन्होंने क्या किया होगा, इसका अनुकरण करने के लिए हम मूल नियतांकों की प्रकृति के साथ निम्न गतिविधि करके देखें कि क्या हमें लंबाई की विमा वाली कोई राशि प्राप्त होती है, जिसका साइज़, लगभग परमाणु के ज्ञात साइज़ ($\sim 10^{-10}$ m) के बराबर है।

(a) मूल नियतांकों e, m_e, और c से लंबाई की विमा वाली राशि की रचना कीजिए। उसका संख्यात्मक मान भी निर्धारित कीजिए।

(b) आप पाएँगे कि (a) में प्राप्त लंबाई परमाण्वीय विमाओं के परिमाण की कोटि से काफ़ी छोटी है। इसके अतिरिक्त इसमें c सम्मिलित है। परंतु परमाणुओं की ऊर्जा अधिकतर अनापेक्षिकीय क्षेत्र (non-relativisitic domain) में है जहाँ c की कोई अपेक्षित भूमिका नहीं है। इसी तर्क ने बोर को c का परित्याग कर सही परमाण्वीय साइज़ को प्राप्त करने के लिए 'कुछ अन्य' देखने के लिए प्रेरित किया। इस समय प्लांक नियतांक h का कहीं और पहले ही आविर्भाव हो चुका था। बोर की सूक्ष्मदृष्टि ने पहचाना कि h, m_e और e के प्रयोग से ही सही परमाणु साइज़ प्राप्त होगा। अत: h, m_e और e से ही लंबाई की विमा वाली किसी राशि की रचना कीजिए और पुष्टि कीजिए कि इसका संख्यात्मक मान, वास्तव में सही परिमाण की कोटि का है।

12.15 हाइड्रोजन परमाणु की प्रथम उत्तेजित अवस्था में इलेक्ट्रॉन की कुल ऊर्जा लगभग – 3.4 eV है।

(a) इस अवस्था में इलेक्ट्रॉन की गतिज ऊर्जा क्या है?

(b) इस अवस्था में इलेक्ट्रॉन की स्थितिज ऊर्जा क्या है?

(c) यदि स्थितिज ऊर्जा के शून्य स्तर के चयन में परिवर्तन कर दिया जाए तो ऊपर दिए गए उत्तरों में से कौन-सा उत्तर परिवर्तित होगा?

12.16 यदि बोर का क्वांटमीकरण अभिगृहीत (कोणीय संवेग = $nh/2\pi$) प्रकृति का मूल नियम है तो यह ग्रहीय गति की दशा में भी लागू होना चाहिए। तब हम सूर्य के चारों ओर ग्रहों की कक्षाओं के क्वांटमीकरण के विषय में कभी चर्चा क्यों नहीं करते?

12.17 प्रथम बोर-त्रिज्या और *म्यूओनिक हाइड्रोजन परमाणु* [अर्थात कोई परमाणु जिसमें लगभग 207 m_e द्रव्यमान का ऋणावेशित म्यूऑन (μ) प्रोटॉन के चारों ओर घूमता है] की निम्नतम अवस्था ऊर्जा को प्राप्त करने का परिकलन कीजिए।

अध्याय 13

नाभिक

13.1 भूमिका

पिछले अध्याय में हमने पढ़ा है कि प्रत्येक परमाणु का धनावेश घनीभूत होकर इसके केंद्र में संकेंद्रित हो जाता है और परमाणु का नाभिक बनाता है। नाभिक का कुल साइज़ परमाणु के साइज़ की तुलना में काफ़ी कम होता है। α-कणों के प्रकीर्णन संबंधी प्रयोगों ने यह प्रदर्शित किया है कि नाभिक की त्रिज्या, परमाणु की त्रिज्या की तुलना में 10^4 गुने से भी कम होनी चाहिए। इसका अर्थ है कि नाभिक का आयतन परमाणु के आयतन के 10^{-12} गुने के लगभग है। दूसरे शब्दों में कहें तो परमाणु में अधिकांशत: रिक्त स्थान ही है। यदि हम परमाणु का साइज़ बढ़ाकर कक्षा के कमरे के बराबर कर दें तो नाभिक इसमें एक पिन के शीर्ष के साइज़ का दिखाई देगा। तथापि, परमाणु का लगभग संपूर्ण द्रव्यमान (99.9% से अधिक) नाभिक में ही समाहित होता है।

परमाणु की संरचना के समरूप क्या नाभिक की भी कोई संरचना है? यदि ऐसा है तो इसके अवयव क्या-क्या हैं? वे परस्पर किस प्रकार जुड़े हैं? इस अध्याय में हम इस प्रकार के प्रश्नों के उत्तर खोजने का प्रयास करेंगे। हम नाभिकों के विशिष्ट गुणों, जैसे–उनके साइज़, द्रव्यमान तथा स्थायित्व की चर्चा के साथ इनसे संबद्ध रेडियोऐक्टिवता, विखंडन एवं संलयन जैसी नाभिकीय परिघटनाओं की भी विवेचन करेंगे।

13.2 परमाणु द्रव्यमान एवं नाभिक की संरचना

परमाणु का द्रव्यमान किलोग्राम की तुलना में बहुत कम होता है। उदाहरण के लिए, कार्बन के परमाणु ^{12}C का द्रव्यमान 1.992647×10^{-26} kg है। इतनी छोटी राशियों को मापने के लिए

किलोग्राम बहुत सुविधाजनक मात्रक नहीं है। अत: परमाणु द्रव्यमानों को व्यक्त करने के लिए द्रव्यमान का एक अन्य मात्रक प्रस्तुत किया गया। इस मात्रक को परमाणु द्रव्यमान मात्रक (u) कहते हैं। इसको ^{12}C परमाणु के द्रव्यमान के बारहवें $1/12^{th}$ भाग से व्यक्त करते हैं।

अत: इस परिभाषा के अनुसार

$$1u = \frac{^{12}C \text{ परमाणु का द्रव्यमान}}{12}$$

$$= \frac{1.992647 \times 10^{-26} \text{ kg}}{12}$$

$$= 1.660539 \times 10^{-27} \text{ kg} \qquad (13.1)$$

परमाणु द्रव्यमान मात्रक (u) में व्यक्त करने पर विभिन्न तत्वों के परमाणु द्रव्यमान, हाइड्रोजन परमाणु के द्रव्यमान के पूर्ण गुणज के निकट पाए जाते हैं। परंतु इस नियम के अनेक प्रभावशाली अपवाद भी हैं। उदाहरण के लिए, क्लोरीन का परमाणु द्रव्यमान 35.46 u है।

परमाणु द्रव्यमानों का यथार्थ मापन, द्रव्यमान वर्णक्रममापी (स्पेक्ट्रोमीटर) द्वारा किया जाता है। परमाणु द्रव्यमानों के मापन से पता चलता है कि एक ही तत्व के विभिन्न प्रकार के ऐसे परमाणुओं का अस्तित्व है जिनके रासायनिक गुण तो समान होते हैं पर इनके द्रव्यमानों में अंतर होता है। एक ही तत्व की ऐसी *परमाणु प्रजातियाँ* जिनके द्रव्यमानों में अंतर होता है, *समस्थानिक* कहलाती हैं (यूनानी शब्द आइसोटॉप का अर्थ हिंदी में समस्थानिक है, यह नाम इन्हें इसलिए दिया गया है क्योंकि तत्वों की आवर्त सारणी में ये सभी एक ही स्थान पर पाए जाते हैं)। शोध से पता चला कि प्रत्येक तत्व व्यावहारिक रूप से कई समस्थानिकों का मिश्रण है। विभिन्न समस्थानिकों की सापेक्ष बहुलता तत्व बदलने के साथ बदलती है।

उदाहरण के लिए, क्लोरीन के दो समस्थानिक हैं जिनके द्रव्यमान क्रमश: 34.98 u एवं 36.98 u हैं, जो कि हाइड्रोजन परमाणु द्रव्यमान के पूर्ण गुणज के सन्निकट हैं। इन समस्थानिकों की सापेक्ष बहुलता क्रमश: 75.4 एवं 24.6% है। इस प्रकार, प्राकृतिक क्लोरीन परमाणु का द्रव्यमान इन समस्थानिकों का *भारित-औसत* है। अत:, प्राकृतिक क्लोरीन परमाणु का द्रव्यमान,

$$= \frac{75.4 \times 34.98 + 24.6 \times 36.98}{100}$$

$$= 35.47 \text{ u}$$

वही मान है जो क्लोरीन का परमाणु द्रव्यमान है।

यहाँ तक कि सबसे हलके तत्व हाइड्रोजन के भी तीन समस्थानिक हैं जिनके द्रव्यमान 1.0078 u, 2.0141 u एवं 3.0160 u हैं। सबसे हलके हाइड्रोजन परमाणु जिसकी सापेक्ष बहुलता 99.985 % है, का नाभिक, प्रोटॉन कहलाता है। एक प्रोटॉन का द्रव्यमान है,

$$m_p = 1.00727 \text{ u} = 1.67262 \times 10^{-27} \text{ kg} \qquad (13.2)$$

यह हाइड्रोजन परमाणु के द्रव्यमान 1.00783 u में से, इसमें विद्यमान एक इलेक्ट्रॉन के द्रव्यमान $m_e = 0.00055$ u को घटाने से प्राप्त द्रव्यमान के बराबर है। हाइड्रोजन के दूसरे दो समस्थानिक ड्यूटीरियम एवं ट्राइटियम कहलाते हैं। ट्राइटियम नाभिक अस्थायी होने के कारण प्रकृति में नहीं पाए जाते और कृत्रिम विधियों द्वारा प्रयोगशालाओं में निर्मित किए जाते हैं।

नाभिक में धन आवेश प्रोटॉनों का ही होता है। प्रोटॉन पर एकांक मूल आवेश होता है और यह स्थायी कण है। पहले यह विचार था कि नाभिक में इलेक्ट्रॉन होते हैं पर क्वांटम सिद्धांत पर आधारित तर्कों के कारण इस मान्यता को नकार दिया गया। किसी परमाणु के सभी इलेक्ट्रॉन उसके नाभिक के बाहर होते हैं। हम जानते हैं कि किसी परमाणु के नाभिक के बाहर इन इलेक्ट्रॉनों की संख्या

उसके परमाणु क्रमांक Z, के बराबर होती है। अत: परमाणु में इलेक्ट्रॉनों का कुल आवेश ($-Ze$) उसके नाभिक के कुल आवेश ($+Ze$) के बराबर होता है, क्योंकि परमाणु विद्युतीय रूप से उदासीन होता है। इसलिए किसी परमाणु के नाभिक में प्रोटॉनों की संख्या, तथ्यत: इसका परमाणु क्रमांक, Z होती है।

न्यूट्रॉन की खोज

क्योंकि ड्यूटीरियम एवं ट्राइटियम हाइड्रोजन के ही समस्थानिक हैं, इनमें से प्रत्येक के नाभिक में एक प्रोटॉन होना चाहिए। लेकिन हाइड्रोजन, ड्यूटीरियम एवं ट्राइटियम के नाभिकों के द्रव्यमानों में अनुपात 1 : 2 : 3 है। इसलिए ड्यूटीरियम एवं ट्राइटियम के नाभिकों में प्रोटॉन के अतिरिक्त कुछ उदासीन द्रव्य भी होना चाहिए। इन समस्थानिकों के नाभिकों में विद्यमान उदासीन अनाविष्ट द्रव्य की मात्रा को प्रोटॉन-द्रव्यमान के मात्रकों में व्यक्त करें तो क्रमश: एक एवं दो मात्रकों के लगभग होता है। यह तथ्य इंगित करता है कि परमाणुओं के नाभिकों में प्रोटॉनों के अतिरिक्त विद्यमान रहने वाला यह उदासीन द्रव्य भी एक मूल मात्रक के गुणजों के रूप में ही होता है। इस परिकल्पना की पुष्टि, 1932 में, जेम्स चैडविक द्वारा की गई जिन्होंने देखा कि जब बेरिलियम नाभिकों पर ऐल्फ़ा कणों (ऐल्फ़ा कण, हीलियम नाभिक होते हैं जिनके विषय में हम अगले अनुभाग में चर्चा करेंगे) की बौछार की जाती है, तो इनसे कुछ उदासीन विकिरण उत्सर्जित होते हैं। यह भी पाया गया कि ये उदासीन विकिरण, हीलियम, कार्बन एवं नाइट्रोजन जैसे हलके नाभिकों से टकराकर उनसे प्रोटॉन बाहर निकालते हैं। उस समय तक ज्ञात एक मात्र उदासीन विकिरण फोटॉन (विद्युत चुंबकीय विकिरण) ही थे। ऊर्जा एवं संवेग संरक्षण के नियमों का प्रयोग करने पर पता चला कि यदि ये उदासीन विकिरण फोटॉनों के बने होते तो इनकी ऊर्जा उन विकिरणों की तुलना में बहुत अधिक होती जो बेरिलियम नाभिकों पर ऐल्फ़ा कणों की बौछार से प्राप्त होते हैं। इस समस्या के समाधान का सूत्र, जिसे चैडविक ने संतोषजनक ढंग से हल किया, इस कल्पना में समाहित था कि उदासीन विकिरणों में एक नए प्रकार के उदासीन कण होते हैं जिन्हें *न्यूट्रॉन* कहते हैं। ऊर्जा एवं संवेग संरक्षण नियमों का उपयोग कर, उन्होंने इस नए कण का द्रव्यमान ज्ञात करने में सफलता प्राप्त की, जिसे प्रोटॉन के द्रव्यमान के लगभग बराबर पाया गया।

अब हम न्यूट्रॉन का द्रव्यमान अत्यधिक यथार्थता से जानते हैं। यह है,

$$m_n = 1.00866\ \text{u} = 1.6749\times10^{-27}\ \text{kg} \qquad (13.3)$$

न्यूट्रॉन की खोज के लिए चैडविक को 1935 के नोबेल पुरस्कार से सम्मानित किया गया। एक मुक्त प्रोटॉन के विपरीत एक मुक्त न्यूट्रॉन अस्थायी होता है। यह एक प्रोट्रॉन, एक इलेक्ट्रॉन एवं एक प्रतिन्यूट्रिनो (अन्य मूल कण) के रूप में क्षयित हो जाता है। इसकी औसत आयु लगभग 1000 s होती है। तथापि, नाभिक के भीतर यह स्थायी होता है।

अब, नाभिक की संरचना निम्नलिखित पदों एवं संकेत चिह्नों का उपयोग करके समझायी जा सकती है।

Z - *परमाणु क्रमांक* = प्रोटॉनों की संख्या [13.4(a)]

N - *न्यूट्रान संख्या* = न्यूट्रॉनों की संख्या [13.4(b)]

A - *द्रव्यमान संख्या* $= Z + N$

= न्यूट्रॉनों एवं प्रोटॉनों की कुल संख्या [13.4(c)]

प्रोटॉन एवं न्यूट्रॉन के लिए *न्यूक्लियॉन* शब्द का भी उपयोग किया जा सकता है। अत: किसी परमाणु में न्यूक्लियॉन संख्या उसकी द्रव्यमान संख्या A होती है।

किसी नाभिकीय प्रजाति या नाभिक को संकेत चिह्न ${}^{A}_{Z}\text{X}$ द्वारा प्रदर्शित किया जाता है। जहाँ X उस प्रजाति का रासायनिक चिह्न है। उदाहरण के लिए, स्वर्ण-नाभिक को संकेत ${}^{197}_{79}\text{Au}$ द्वारा व्यक्त करते हैं। इसमें 197 न्यूक्लियॉन होते हैं जिनमें 79 प्रोटॉन एवं 118 न्यूट्रॉन होते हैं।

अब किसी तत्व के समस्थानिकों की संरचना को सरलता से समझाया जा सकता है। किसी दिए गए तत्व के समस्थानिकों के नाभिकों में प्रोटॉनों की संख्या तो समान होती है, परंतु वे एक-दूसरे से न्यूट्रॉनों की संख्या की दृष्टि से भिन्न होते हैं। ड्यूटीरियम ${}_{1}^{2}\mathrm{H}$ जो हाइड्रोजन का एक समस्थानिक है, इसमें एक प्रोटॉन एवं एक न्यूट्रॉन होता है। इसके दूसरे समस्थानिक ट्राइटियम ${}_{1}^{3}\mathrm{H}$ में एक प्रोटॉन एवं दो न्यूट्रॉन होते हैं। तत्व स्वर्ण के 32 समस्थानिक होते हैं जिनकी द्रव्यमान संख्याओं का परास A =173 से A = 204 तक होता है। यह हम पहले ही बता चुके हैं कि तत्वों के रासायनिक गुण उनके इलेक्ट्रॉनिक विन्यास पर निर्भर करते हैं। चूँकि, समस्थानिक परमाणुओं के इलेक्ट्रॉनिक विन्यास समान होते हैं उनका रासायनिक व्यवहार भी एक जैसा होता है और इसलिए उनको आवर्त सारणी में एक ही स्थान पर रखा जाता है।

ऐसे सभी नाभिक जिनकी द्रव्यमान संख्या A समान होती है *समभारिक* कहलाते हैं। उदाहरणार्थ, नाभिक ${}_{1}^{3}\mathrm{H}$ एवं ${}_{2}^{3}\mathrm{He}$ समभारिक हैं। ऐसे नाभिक जिनकी न्यूट्रॉन संख्या N समान हो लेकिन परमाणु क्रमांक Z भिन्न हो *समन्यूट्रॉनिक* कहलाते हैं। उदाहरणार्थ, ${}_{80}^{198}\mathrm{Hg}$ एवं ${}_{79}^{197}\mathrm{Au}$ समन्यूट्रॉनिक हैं।

13.3 नाभिक का साइज़

जैसा हमने अध्याय 12 में देखा है, रदरफोर्ड वह अग्रणी वैज्ञानिक थे जिन्होंने परमाणु नाभिक के अस्तित्व की परिकल्पना एवं स्थापना की। रदरफोर्ड के सुझाव पर गीगर एवं मार्सडन ने स्वर्ण के वर्क पर ऐल्फ़ा कणों के प्रकीर्णन से संबंधित प्रसिद्ध प्रयोग किया। उनके प्रयोगों से यह स्पष्ट हुआ कि 5.5 MeV गतिज ऊर्जा के ऐल्फ़ा कणों की स्वर्ण नाभिकों के निकटस्थ पहुँच की दूरी लगभग $4.0 \times 10^{-14}\,\mathrm{m}$ है। स्वर्ण की परत से α-कणों के प्रकीर्णन को रदरफोर्ड ने यह मानकर समझाया कि प्रकीर्णन के लिए केवल कूलॉम का प्रतिकर्षण बल ही उत्तरदायी है। चूँकि, धनात्मक आवेश नाभिक में निहित होता है, नाभिक का वास्तविक साइज़ $4.0 \times 10^{-14}\,\mathrm{m}$ से कम होना चाहिए।

यदि हम 5.5 MeV से अधिक ऊर्जा के α-कण प्रयोग करें तो इनके स्वर्ण नाभिकों के निकटस्थ पहुँच की दूरी और कम हो जाएगी और तब प्रकीर्णन अल्प परास नाभिकीय बलों से प्रभावित होने लगेगा और रदरफोर्ड द्वारा किए गए परिकलनों से प्राप्त मान बदल जाएँगे। रदरफोर्ड के परिकलन ऐल्फ़ा कणों एवं स्वर्ण नाभिकों के धनावेश युक्त कणों के बीच लगने वाले शुद्ध कूलॉम प्रतिकर्षण बल पर आधारित हैं। उस दूरी के द्वारा जिस पर रदरफोर्ड के परिकलनों में आने वाले अंतर स्पष्ट होने लगते हैं, नाभिकीय साइज़ों के विषय में निष्कर्ष निकाला जा सकता है।

ऐसे प्रकीर्णन प्रयोग करके जिनमें α-कणों के स्थान पर तीव्र गति इलेक्ट्रॉनों की विभिन्न तत्वों के ऊपर बौछार की गई हो, इन तत्वों के नाभिकीय साइज़ अत्यंत परिशुद्धता से ज्ञात किए गए।

यह पाया गया कि A द्रव्यमान संख्या के नाभिक की त्रिज्या है :

$$R = R_0 A^{1/3} \qquad (13.5)$$

जहाँ $R_0 = 1.2 \times 10^{-15}\,\mathrm{m}$। इसका अर्थ है कि नाभिक का आयतन (जो R^3 के अनुक्रमानुपाती है) द्रव्यमान संख्या A के अनुक्रमानुपाती होता है। अत: नाभिक का घनत्व नियत होता है, अर्थात, सभी नाभिकों के लिए इसका मान A पर निर्भर नहीं करता है। विभिन्न नाभिक इस नियत घनत्व के द्रव की बूँद की तरह होते हैं। नाभिकीय द्रव्य का घनत्व $2.3 \times 10^{17}\,\mathrm{kg\,m^{-3}}$ के सन्निकट होता है। सामान्य पदार्थों की तुलना में घनत्व का यह मान बहुत अधिक होता है, जैसे जल के लिए घनत्व केवल $10^3\,\mathrm{kg\,m^{-3}}$ ही होता है। इस तथ्य को आसानी से समझा भी जा सकता है, क्योंकि यह हम पहले ही देख चुके हैं कि परमाणु अधिकांशत: भीतर से रिक्त होता है। सामान्य परमाणुओं से बने द्रव्य में बड़ी मात्रा में रिक्त स्थान होता है।

उदाहरण 13.1

उदाहरण 13.1 लोहे के नाभिक का द्रव्यमान 55.85u एवं A=56 है, इसका नाभिकीय घनत्व ज्ञात कीजिए।

हल

$m_{Fe} = 55.85$

$u = 9.27 \times 10^{-26}$ kg

$$\text{नाभिकीय घनत्व} = \frac{\text{द्रव्यमान}}{\text{आयतन}} = \frac{9.27 \times 10^{-26}}{(4\pi/3)(1.2 \times 10^{-15})^3} \times \frac{1}{56}$$

$$= 2.29 \times 10^{17} \text{ kg m}^{-3}$$

न्यूट्रॉन तारे (एक खगोल भौतिकीय पिंड) में पदार्थ का घनत्व इस घनत्व के साथ तुलनीय है। यह दर्शाता है कि इन तारों में द्रव्य इस सीमा तक संपीडित हो गया है कि न्यूट्रॉन तारे स्वयं एक बड़े नाभिक की तरह व्यवहार करते हैं।

13.4 द्रव्यमान-ऊर्जा तथा नाभिकीय बंधन-ऊर्जा

13.4.1 द्रव्यमान-ऊर्जा

आइंस्टाइन ने अपने विशिष्ट आपेक्षिकता सिद्धांत के आधार पर यह दर्शाया कि द्रव्यमान ऊर्जा का ही एक दूसरा रूप है। विशिष्ट आपेक्षिकता सिद्धांत से पहले यह माना जाता था कि किसी अभिक्रिया में द्रव्यमान एवं ऊर्जा अलग-अलग संरक्षित होते हैं। परंतु आइंस्टाइन ने यह दर्शाया कि द्रव्यमान केवल ऊर्जा का दूसरा रूप है और हम द्रव्यमान-ऊर्जा को ऊर्जा के अन्य रूपों, जैसे–गतिज ऊर्जा में, परिवर्तित कर सकते हैं तथा विपरीत प्रक्रम अर्थात ऊर्जा को द्रव्यमान में रूपांतरित करना भी संभव है।

इसके लिए आइंस्टाइन ने जो प्रसिद्ध द्रव्यमान-ऊर्जा समतुल्यता संबंध दिया वह है :

$$E = mc^2 \qquad (13.6)$$

यहाँ E, द्रव्यमान m के समतुल्य ऊर्जा है एवं c निर्वात में प्रकाश का वेग है जिसका सन्निकट मान 3×10^8 m s^{-1} है।

उदाहरण 13.2

उदाहरण 13.2 1 g पदार्थ के समतुल्य ऊर्जा को परिकलित कीजिए।

हल

ऊर्जा $E = 10^{-3} \times (3 \times 10^8)^2$ J

$$E = 10^{-3} \times 9 \times 10^{16} \text{ J} = 9 \times 10^{13} \text{ J}$$

इस प्रकार, यदि एक ग्राम पदार्थ को भी ऊर्जा में रूपांतरित किया जाए तो इससे ऊर्जा की विशाल मात्रा मुक्त होती है।

आइंस्टाइन के द्रव्यमान-ऊर्जा संबंध की प्रायोगिक पुष्टि, न्यूक्लियॉनों, नाभिकों, इलेक्ट्रॉनों एवं अन्य हाल ही में खोजे गए कणों के बीच होने वाली नाभिकीय अभिक्रियाओं के अध्ययन में हो चुकी है। किसी अभिक्रिया में ऊर्जा संरक्षण नियम से अभिप्राय है कि यदि द्रव्यमान से संबद्ध ऊर्जा को भी परिकलनों में सम्मिलित करें तो प्रारंभिक ऊर्जा अंतिम ऊर्जा के बराबर होती है। यह संकल्पना, नाभिकों की पारस्परिक अन्योन्य क्रियाओं एवं नाभिकीय द्रव्यमानों को समझने के लिए महत्वपूर्ण है। यही अगले कुछ अनुभागों की विषय-वस्तु है।

13.4.2 नाभिकीय बंधन-ऊर्जा

अनुभाग 13.2 में हमने देखा कि नाभिक न्यूट्रॉन एवं प्रोटॉन का बना है। अतः यह अपेक्षित है कि नाभिक का द्रव्यमान, इसमें विद्यमान न्यूट्रॉनों एवं प्रोटॉनों के द्रव्यमानों के कुल योग Σm के बराबर होगा। लेकिन, नाभिकीय द्रव्यमान M, सदैव Σm से कम पाया जाता है। उदाहरण के लिए, आइए

$^{16}_{8}O$ को लें। इसमें 8 प्रोटॉन एवं 8 न्यूट्रॉन हैं। अत:,

8 न्यूट्रॉनों का द्रव्यमान $= 8 \times 1.00866$ u

8 प्रोटॉनों का द्रव्यमान $= 8 \times 1.00727$ u

8 इलेक्ट्रॉनों का द्रव्यमान $= 8 \times 0.00055$ u

इसलिए $^{16}_{8}O$ के नाभिक का अपेक्षित द्रव्यमान $= 8 \times 2.01593$ u $= 16.12744$ u

द्रव्यमान वर्णक्रममापी के प्रयोगों द्वारा प्राप्त $^{16}_{8}O$ का परमाणु द्रव्यमान 15.99493 u है। इसमें से 8 इलेक्ट्रॉनों का द्रव्यमान $(8 \times 0.00055$ u) घटाने पर $^{16}_{8}O$ के नाभिक का प्रायोगिक मान 15.99053 u है।

अत: हम पाते हैं कि ऑक्सीजन $^{16}_{8}O$ नाभिक का द्रव्यमान, इसके घटकों के कुल द्रव्यमान से 0.13691u कम है। नाभिक के द्रव्यमान एवं इसके घटकों के द्रव्यमान के अंतर ΔM, को *द्रव्यमान क्षति* कहते हैं, और इसका मान इस प्रकार व्यक्त किया जाता है :

$$\Delta M = [Zm_p + (A - Z)m_n] - M \qquad (13.7)$$

द्रव्यमान-क्षति का अर्थ क्या है? यहीं पर आइंस्टाइन का द्रव्यमान-ऊर्जा समतुल्यता सिद्धांत अपनी भूमिका निभाता है। चूँकि, ऑक्सीजन नाभिक का द्रव्यमान इसके घटकों के द्रव्यमानों के योग (अबंधित अवस्था में 8 प्रोटॉन एवं 8 न्यूट्रॉन का) से कम होता है, ऑक्सीजन नाभिक की समतुल्य ऊर्जा इसके घटकों की समतुल्य ऊर्जाओं के योग से कम होती है। यदि आप ऑक्सीजन नाभिक को 8 प्रोटॉनों एवं 8 न्यूट्रॉनों में विखंडित करना चाहें तो आपको यह अतिरिक्त ऊर्जा, $\Delta M c^2$, इस नाभिक को प्रदान करनी होगी। इसके लिए आवश्यक यह ऊर्जा E_b, द्रव्यमान क्षति से निम्नलिखित समीकरण द्वारा संबंधित होती है :

$$E_b = \Delta M c^2 \qquad (13.8)$$

उदाहरण 13.3 एक परमाणु द्रव्यमान मात्रक के समतुल्य ऊर्जा का मान पहले जूल और फिर MeV में ज्ञात कीजिए। इसका उपयोग करके $^{16}_{8}O$ की द्रव्यमान क्षति MeV/c^2 में व्यक्त कीजिए।

हल

$1u = 1.6605 \times 10^{-27}$ kg

इसको ऊर्जा के मात्रकों में परिवर्तित करने के लिए हम इसको c^2 से गुणा करते हैं एवं पाते हैं कि इसके

समतुल्य ऊर्जा $= 1.6605 \times 10^{-27} \times (2.9979 \times 10^8)^2$ kg m^2/s^2

$= 1.4924 \times 10^{-10}$ J

$= \dfrac{1.4924 \times 10^{-10}}{1.602 \times 10^{-19}}$ eV

$= 0.9315 \times 10^9$ eV

$= 931.5$ MeV

अथवा $1u = 931.5$ MeV/c^2

$^{16}_{8}O$ के लिए $\Delta M = 0.13691$ u $= 0.13691 \times 931.5$ MeV/c^2

$= 127.5$ MeV/c^2

$\therefore$ $^{16}_{8}O$ को इसके घटकों में विभाजित करने के लिए आवश्यक ऊर्जा 127.5 MeV/c^2 है।

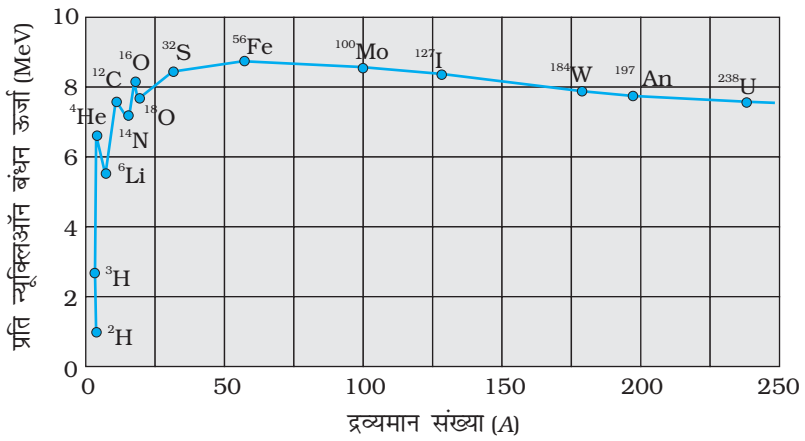
उदाहरण 13.3

यदि कुछ न्यूट्रॉनों एवं प्रोटॉनों को पास-पास लाकर, निश्चित आवेश एवं द्रव्यमान वाला एक नाभिक बनाया जाए तो इस प्रक्रिया में ΔE_b ऊर्जा मुक्त होगी। यह ऊर्जा ΔE_b नाभिक की

बंधन-ऊर्जा कहलाती है। यदि हमें किसी नाभिक के नाभिक-कणों को अलग-अलग करना हो तो हमें इन कणों को कुल ऊर्जा E_b प्रदान करनी होगी। यद्यपि नाभिक को हम इस प्रकार तोड़ नहीं सकते, फिर भी, नाभिक की बंधन-ऊर्जा यह तो बताती ही है कि किसी नाभिक में न्यूक्लियॉन परस्पर कितनी अच्छी तरह से जुड़े हैं। नाभिक के कणों की बंधन शक्ति का एक और अधिक उपयोगी माप *बंधन-ऊर्जा प्रति न्यूक्लियॉन*, E_{bn} है; जो कि नाभिक की बंधन-ऊर्जा, E_b एवं इसमें विद्यमान न्यूक्लिऑनों की संख्या A का अनुपात है।

$$\Delta E_{bn} = \Delta E_b / A \qquad (13.9)$$

हम प्रति न्यूक्लियॉन बंधन-ऊर्जा को ऐसा मान सकते हैं कि यह किसी नाभिक को इसके न्यूक्लिऑनों में पृथक्कृत करने के लिए आवश्यक औसत ऊर्जा है।



चित्र 13.1 द्रव्यमान संख्या के फलन के रूप में प्रति न्यूक्लियॉन बंधन-ऊर्जा।

चित्र 13.1 में बहुत से नाभिकों के लिए प्रति न्यूक्लियॉन बंधन ऊर्जा E_{bn} एवं द्रव्यमान संख्या A में ग्राफ दिखाया गया है। इस ग्राफ में हमें निम्नलिखित लक्षण पर विशेष दृष्टिगोचर होते हैं –

(i) मध्यवर्ती द्रव्यमान संख्याओं ($30 < A < 170$) के लिए, प्रति न्यूक्लियॉन बंधन-ऊर्जा, E_{bn}, का मान व्यावहारिक रूप में नियत रहता है, अर्थात परमाणु क्रमांक के साथ परिवर्तित नहीं होता है। वक्र $A = 56$ के लिए लगभग 8.75 MeV का अधिकतम मान एवं $A = 238$ के लिए 7.6 MeV दर्शाता है।

(ii) हलके नाभिकों ($A < 30$) एवं भारी नाभिकों ($A > 170$) दोनों के लिए ही E_{bn} का मान मध्यवर्ती परमाणु क्रमांक के नाभिकों की तुलना में अपेक्षाकृत कम होता है।

इस प्रकार निम्न निष्कर्षों पर पहुँच सकते हैं :

(i) यह बल आकर्षी है तथा प्रति न्यूक्लियॉन कुछ MeV बंधन उत्पन्न करने के लिए पर्याप्त प्रबल है।

(ii) $30 < A < 170$ के परास में बंधन-ऊर्जा की अचरता इस तथ्य का परिणाम है कि *नाभिकीय बल लघु परासी बल* होते हैं। बड़े नाभिक के भीतर स्थित किसी न्यूक्लियॉन पर विचार कीजिए। यह अपने पास-पड़ोस के केवल उन न्यूक्लिऑनों से प्रभावित होगा जो इसके नाभिकीय बल के परिसर में आते हैं। यदि कोई अन्य न्यूक्लियॉन इस विशिष्ट न्यूक्लियॉन के नाभिकीय बल के परिसर से अधिक दूरी पर है, तो यह विचाराधीन नाभिक की बंधन-ऊर्जा को तनिक भी प्रभावित नहीं करेगा। यदि किसी नाभिक के नाभिकीय बल के परिसर में अधिकतम p न्यूक्लियॉन हो सकते हों, तो इसकी बंधन-ऊर्जा p के अनुक्रमानुपाती होगी। माना कि किसी नाभिक की बंधन-ऊर्जा pk है, जहाँ k एक नियतांक है जिसकी विमाएँ वही हैं जो ऊर्जा की होती हैं। अब यदि हम न्यूक्लियॉनों की संख्या बढ़ाकर A का मान बढ़ाएँ, तो इससे नाभिक के भीतर न्यूक्लियॉनों की बंधन-ऊर्जा प्रभावित नहीं होगी। क्योंकि, किसी भी बड़े नाभिक में अधिकांश न्यूक्लियॉन इसके भीतर रहते हैं तथा पृष्ठ की अपेक्षा, नाभिक की बंधन-ऊर्जा पर A की वृद्धि का कुल प्रभाव नगण्य रहता है। अतः प्रति न्यूक्लियॉन बंधन-ऊर्जा नियत रहती

है और इसका सन्निकट मान pk के बराबर होता है। नाभिकों का वह गुण जिसके कारण कोई नाभिक केवल अपने निकट के नाभिकों को ही प्रभावित करता है, *नाभिकीय बलों का संतृप्ति गुण कहलाता* है।

(iii) एक अत्यधिक भारी नाभिक, जैसे $A = 240$, की प्रति न्यूक्लियॉन बंधन-ऊर्जा, $A = 120$ के नाभिक की तुलना में कम होती है। अतः, यदि $A = 240$ का कोई नाभिक, $A = 120$ के दो नाभिकों में टूटता है तो, इनमें न्यूक्लियॉन अधिक दृढ़ता से परिबद्ध होंगे। यह इंगित करता है कि इस प्रक्रिया में ऊर्जा विमुक्त होगी। यह *विखंडन* द्वारा ऊर्जा विमुक्त होने की महत्वपूर्ण संभावना को अभिव्यक्त करता है जिसके विषय में हम अनुभाग 13.7.1 में चर्चा करेंगे।

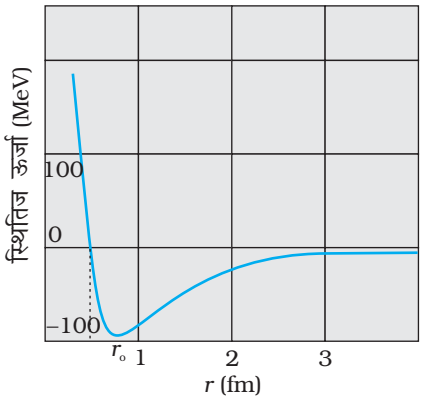
(iv) कल्पना कीजिए कि दो हलके नाभिक ($A \leq 10$) संलयित होकर एक भारी नाभिक बनाते हैं। संलयन द्वारा बने इस भारी नाभिक की प्रति न्यूक्लियॉन बंधन-ऊर्जा, हलके नाभिकों की प्रति न्यूक्लियॉन बंधन ऊर्जा से अधिक होती है। इसका अर्थ यह हुआ कि अंतिम निकाय में कण प्रारंभिक निकाय की तुलना में अधिक दृढ़ता से बंधित हैं। यहाँ *संलयन* की इस प्रक्रिया में भी ऊर्जा विमुक्त होगी। यही सूर्य की ऊर्जा का स्रोत है जिसके विषय में हम अनुभाग 13.7.3 में चर्चा करेंगे।

13.5 नाभिकीय बल

वह बल जो परमाणु में इलेक्ट्रॉनों की गति नियंत्रित करता है हमारा सुपरिचित कूलॉम बल है। अनुभाग 13.4 में हमने देखा कि औसत द्रव्यमान के नाभिक के लिए प्रति न्यूक्लियॉन बंधन-ऊर्जा लगभग 8 MeV है जो परमाणु की बंधन-ऊर्जा की तुलना में बहुत अधिक है। अतः नाभिक में कणों को परस्पर बाँधे रखने के लिए एक भिन्न प्रकार के शक्तिशाली आकर्षण बल की आवश्यकता है। यह बल इतना अधिक शक्तिशाली होना चाहिए कि (धनावेशित) प्रोटॉनों के बीच लगे प्रतिकर्षण बलों से अधिक प्रभावी होकर प्रोटॉनों एवं न्यूट्रॉनों दोनों को नाभिक के सूक्ष्म आयतन में बाँधे रख सके। हम यह पहले ही देख चुके हैं कि प्रति न्यूक्लियॉन बंधन ऊर्जा की अचरता को इन बलों की लघु परासी प्रकृति से समझा जा सकता है। नाभिकीय बंधन बलों के कुछ अभिलक्षणों को संक्षेप में नीचे दिया गया है। यह ज्ञान 1930 से 1950 के बीच किए गए विभिन्न प्रयोगों द्वारा प्राप्त हुआ है।

(i) नाभिकीय बल, आवेशों के बीच लगने वाले कूलॉम बल एवं द्रव्यमानों के बीच लगने वाले गुरुत्वाकर्षण बल की तुलना में अत्यधिक शक्तिशाली होता है। नाभिकीय बंधन बल को, नाभिक के भीतर प्रोटॉनों के बीच लगने वाले कूलॉम प्रतिकर्षण बल पर आधिपत्य करना होता है। यह इसीलिए संभव हो पाता है, क्योंकि नाभिकीय बल कूलॉम बलों की तुलना में अत्यधिक प्रबल होते हैं। गुरुत्वाकर्षण बल तो कूलॉम बल की तुलना में भी अत्यंत दुर्बल होता है।

(ii) न्यूक्लिऑनों के बीच दूरी बढ़ाकर कुछ फेम्टोमीटर से अधिक करने पर उनके बीच लगने वाला नाभिकीय बल तेज़ी से घटकर शून्य हो जाता है। इस कारण, औसत अथवा बड़े साइज़ के नाभिकों में 'बलों की संतृप्तता' की स्थिति आ जाती है जिसके परिणामस्वरूप प्रति न्यूक्लियॉन बंधन-ऊर्जा नियत हो जाती है। दो नाभिकों की स्थितिज ऊर्जा और उनके बीच की दूरी में संबंध दर्शाने वाला एक अपरिष्कृत आरेख चित्र 13.2 में दर्शाया गया है। लगभग 0.8 fm की दूरी r_0 पर स्थितिज ऊर्जा का मान न्यूनतम होता है। इसका अर्थ यह हुआ कि यदि नाभिकों के बीच दूरी 0.8 fm से अधिक होती है तो ये बल आकर्षण बल होते हैं और 0.8 fm से कम दूरियों के लिए ये प्रतिकर्षण बल होते हैं।



चित्र 13.2 एक नाभिकीय युग्म की स्थितिज ऊर्जा उनके बीच की दूरी के फलन के रूप में। r_0 से अधिक दूरी होने पर बल आकर्षण बल होता है एवं r_0 से कम दूरी पर तीव्र प्रतिकर्षण बल। आकर्षण बल सर्वाधिक प्रबल तब होता है जब नाभिकों के बीच की दूरी r_0 होती है।

(iii) न्यूट्रॉन–न्यूट्रॉन, न्यूट्रॉन–प्रोटॉन एवं प्रोटॉन–प्रोटॉन के बीच लगने वाले नाभिकीय बल लगभग समान परिमाण के होते हैं। नाभिकीय बल विद्युत आवेशों पर निर्भर नहीं करते।

कूलॉम के नियम अथवा न्यूटन के गुरुत्वीय नियम की भाँति नाभिकीय बलों का कोई सरल गणितीय रूप नहीं है।

13.6 रेडियोऐक्टिवता

रेडियोऐक्टिवता की खोज ए.एच. बैकेरल ने सन् 1896 में संयोगवश की। यौगिकों को दृश्य प्रकाश से विकीर्णित करके उनकी *प्रतिदीप्ति* एवं *स्फुरदीप्ति* का अध्ययन करते हुए बैकेरल ने एक रोचक परिघटना देखी। यूरेनियम–पोटैशियम सल्फेट के कुछ टुकड़ों पर दृश्य प्रकाश डालने के बाद उसने उनको काले कागज़ में लपेट दिया। इस पैकेट और फ़ोटोग्राफ़िक प्लेट के बीच एक चाँदी का टुकड़ा रखा। इसी प्रकार कई घंटे तक रखने के बाद जब फ़ोटोग्राफ़िक प्लेट को डेवेलप किया गया तो यह पाया गया कि यह प्लेट काली पड़ चुकी थी। यह किसी ऐसी चीज़ के कारण हुआ होगा जो यौगिक से उत्सर्जित हुई होगी तथा काले कागज़ और चाँदी दोनों को भेद कर फ़ोटोग्राफ़िक प्लेट तक पहुँच गई होगी।

बाद में किए गए प्रयोगों ने दर्शाया कि रेडियोऐक्टिवता एक नाभिकीय परिघटना है जिसमें अस्थायी नाभिक क्षयित होता है। इसे *रेडियोऐक्टिव क्षय* कहते हैं। प्रकृति में तीन प्रकार के रेडियोऐक्टिव क्षय होते हैं :

(i) α-क्षय, जिसमें हीलियम नाभिक ($^4_2\mathrm{He}$) उत्सर्जित होते हैं,

(ii) β-क्षय, जिसमें इलेक्ट्रॉन अथवा पॉजीट्रॉन (ऐसे कण जिसका द्रव्यमान तो इलेक्ट्रॉन के बराबर ही होता है पर आवेश ठीक इलेक्ट्रॉन के विपरीत होता है) उत्सर्जित होते हैं।

(iii) γ-क्षय, जिसमें उच्च ऊर्जा (100 keV अथवा अधिक) फोटॉन उत्सर्जित होते हैं।

इनमें प्रत्येक प्रकार के क्षय पर आगामी उपअनुभागों में विचार किया जाएगा।

13.6.1 रेडियोऐक्टिव क्षयता का नियम

किसी रेडियोऐक्टिव नमूने में जिसमें α, β अथवा γ-क्षय हो रहा हो, यह पाया जाता है कि एकांक समय में क्षयित होने वाले नाभिकों की संख्या, नमूने में विद्यमान कुल नाभिकों की संख्या के अनुक्रमानुपाती होती है। यदि दिए गए नमूने में नाभिकों की संख्या N हो और Δt समय में ΔN नाभिक क्षयित हो रहे हों तो

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} \propto N$$

अथवा, $\Delta N/\Delta t = \lambda N$ (13.10)

जहाँ λ *रेडियोऐक्टिव क्षय-स्थिरांक* अथवा *विघटन-स्थिरांक* है।

Δt समय में दिए गए नमूने* में नाभिकों की संख्या में हुआ परिवर्तन है $dN = -\Delta N$। अतः, (जब $\Delta t \to 0$) तो N में परिवर्तन की दर है–

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

* ΔN क्षयित नाभिकों की संख्या है, अतः इसका मान सदैव धनात्मक होता है। dN, N में परिवर्तन है और इसका कोई भी चिह्न हो सकता है। यहाँ यह ऋणात्मक है क्योंकि, मूल N नाभिकों में ΔN क्षयित हो जाते हैं और $(N-\Delta N)$ शेष रहते हैं।

अथवा, $\frac{dN}{N} = -\lambda dt$

इस समीकरण का दोनों ओर समाकलन करने पर,

$$\int_{N_0}^{N} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_{t_0}^{t} dt \qquad (13.11)$$

अथवा $\ln N - \ln N_0 = -\lambda (t - t_0)$ (13.12)

यहाँ N_0, किसी यादृच्छिक क्षण t_0 पर रेडियोऐक्टिव नाभिकों की संख्या है। $t_0 = 0$ रखकर समीकरण (13.12) को पुनर्व्यवस्थित करने पर,

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \qquad (13.13)$$

जिससे हमें प्राप्त होता है,

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \qquad (13.14)$$

ध्यान देने योग्य बात यह है कि विद्युत बल्ब ऐसे किसी चर घातांकी क्षय नियम का पालन नहीं करता। यदि हम 1000 बल्बों की आयु (वह काल विस्तृति जिसके बाद वे फ्यूज़ होंगे) का परीक्षण करें तो हम यह आशा करेंगे कि ये सभी लगभग एक साथ क्षयित (फ्यूज़) हो जाएँगे। रेडियो नाभिकों का क्षय एक पूर्णत: भिन्न नियम, उस *रेडियोऐक्टिव-क्षयता नियम* के अनुसार होता है, जो समीकरण (13.14) द्वारा व्यक्त किया गया है।

किसी नमूने की क्षयता दर R प्रति एकांक समय में क्षयित होने वाले नाभिकों की संख्या होती है। माना कि dt समयांतराल में क्षयित होने वाले नाभिकों की संख्या ΔN है, तो $dN = -\Delta N$। धनात्मक राशि R की निम्न व्याख्या होती है:

$$R = -\frac{dN}{dt}$$

समीकरण (13.14) का अवकलन करने पर,

$$R = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

अथवा $R = R_0 e^{-\lambda t}$ (13.15)

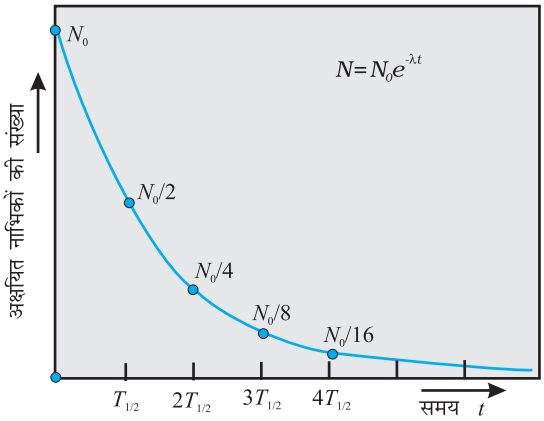
यह *रेडियोऐक्टिव क्षयता* नियम के समान है [क्योंकि समी. (13.15) का समाकलन करने पर समी. (13.14) प्राप्त होगा] स्पष्टत: $R_0 = \lambda N_0$, $t = 0$ पर क्षयता दर है। किसी निश्चित समय t पर क्षयता दर R, उस समय अक्षयित नाभिकों की संख्या N से निम्न रूप में संबंधित होती है:

$$R = \lambda N \qquad (13.16)$$

रेडियोऐक्टिव नाभिकों की संख्या की तुलना में, किसी नमूने की क्षयता दर अधिक प्रायोगिक मापन राशि है तथा इसका एक निश्चित नाम *सक्रियता* (*ऐक्टिवता*) है। इसका SI मात्रक *बैकेरल* (प्रतीक Bq) है जो रेडियोऐक्टिवता के अन्वेषक हेनरी बैकेरल की स्मृति में निश्चित किया गया है।

1 बैकेरल का अर्थ 1 क्षय प्रति सेकंड है। एक दूसरा मात्रक *क्यूरी* (प्रतीक Ci) भी सामान्य प्रचलन में है जो SI मात्रक Bq से निम्न रूप से संबंधित है:

1 क्यूरी = 1 Ci = 3.7×10^{10} क्षय प्रति सेकंड = 3.7×10^{10} Bq



चित्र 13.3 रेडियोऐक्टिव प्रजातियों का चरघातांकी क्षय। प्रत्येक $T_{1/2}$ समय के पश्चात दी गई प्रजाति की संख्या आधी रह जाती है।

विभिन्न रेडियो-नाभिकों की क्षयता दर में अधिक भिन्नता होती है। इस गुण को अर्ध-आयु के आधार पर मापा जा सकता है। किसी रेडियो-नाभिक की अर्ध-आयु ($T_{1/2}$) वह समय है, जिसमें इसकी संख्या, प्रारंभिक संख्या (माना कि N_0) की आधी (अर्थात् $N_0/2$) रह जाय। समी. (13.14) में, समय $t = T_{1/2}$ तथा $N = N_0/2$ रखने पर:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \qquad (13.17)$$

समी. (13.16) के अनुसार, स्पष्टत: यदि संख्या N_0, $T_{1/2}$ समय में आधी हो जाती है तो सक्रियता R_0 भी इसी समय में आधी रह जाएगी।

एक और संबंधित मापदंड औसत-आयु (τ) है। इसका मान भी समी. (13.14) से प्राप्त किया जा सकता है। किसी समयांतराल t से $t + \Delta t$ में क्षयित नाभिक $R(t)\Delta t = (\lambda N_0 e^{-\lambda t}\Delta t)$ हैं। इनमें से सभी t समय तक जीवित रहते हैं। अत: इन सभी नाभिकों का कुल जीवन $t\lambda N_0 e^{-\lambda t}$ होगा। यह स्पष्ट है कि कुछ नाभिकों का जीवन काल कम तथा कुछ नाभिकों का जीवन काल अधिक होता है। अत: औसत आयु का मान प्राप्त करने के लिए उक्त व्युक्ति का हमें कुल समय 0 से ∞ तक के लिए योग (अथवा समाकलन) कर समय $t = 0$ पर उपलब्ध नाभिकों की संख्या N_0 से भाग देना होगा। अत:

$$\tau = \frac{\lambda N_0 \int_0^\infty t e^{-\lambda t} dt}{N_0} = \lambda \int_0^\infty t e^{-\lambda t} dt$$

इस समाकलन को करने पर

$\tau = 1/\lambda$

प्राप्त होगा।

उपरोक्त परिणामों को हम संक्षेप में इस प्रकार प्रकट कर सकते हैं:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2 \qquad (13.18)$$

ऐसे रेडियोऐक्टिव तत्व (जैसे कि ट्राइटियम एवं प्लूटोनियम) जिनकी अर्ध-आयु विश्व की आयु (लगभग 15 अरब वर्ष) की तुलना में बहुत कम है, काफी समय पहले ही विघटित हो चुके हैं तथा प्रकृति में उपलब्ध नहीं हैं। हालाँकि, इनका नाभिकीय अभिक्रियाओं में अप्राकृतिक रूप से उत्पादन किया जा सकता है।

मैरी स्क्लाडोवका क्यूरी (1867-1934)



मैरी स्क्लाडोवका क्यूरी (1867-1934) पोलैंड में जन्मी। भौतिकविज्ञानी एवं रसायनज्ञ दोनों रूपों में पहचान मिली। 1896 में हेनरी बैकेरल द्वारा रेडियोऐक्टिवता की खोज ने मैरी और उनके पति पियरे क्यूरी को उनके अनुसंधानों एवं विश्लेषणों के लिए प्रेरित किया, जिसके फलस्वरूप तत्वों– रेडियम एवं पोलोनियम– का पृथक्करण संभव हुआ। वह प्रथम वैज्ञानिक थीं जिन्हें दो नोबेल पुरस्कार प्राप्त हुए : पहला 1903 में भौतिकी के लिए और दूसरा 1911 में रसायनविज्ञान के लिए।

उदाहरण 13.4

उदाहरण 13.4 क्षयित हो रहे $^{238}_{92}U$ की, α-क्षय के लिए अर्ध-आयु 4.5×10^9 वर्ष है। $^{238}_{92}U$ के 1 g नमूने की ऐक्टिवता क्या है?

हल

$T_{1/2} = 4.5 \times 10^9 \text{ y}$

$= 4.5 \times 10^9 \text{ y} \times 3.16 \times 10^7 \text{ s/y}$

उदाहरण 13.4

$= 1.42 \times 10^{17}$ s

किसी समस्थानिक के 1 kmol में आवोगाद्रो संख्या के बराबर परमाणु होते हैं। अत: 1g, $^{238}_{92}U$ में परमाणुओं की संख्या, $\frac{1}{238 \times 10^{-3}}$ kmol $\times 6.025 \times 10^{26}$ परमाणु/kmol $= 25.3 \times 10^{20}$ है।

$\therefore$ क्षयता दर R है,

$$R = \lambda N$$

$$= \frac{0.693}{T_{1/2}} N = \frac{0.693 \times 25.3 \times 10^{20}}{1.42 \times 10^{17}} \text{ s}^{-1}$$

$$= 1.23 \times 10^{4} \text{ s}^{-1}$$

$$= 1.23 \times 10^{4} \text{ Bq}$$

उदाहरण 13.5

उदाहरण 13.5 β-क्षय द्वारा, ट्राइटियम की अर्ध-आयु 12.5 वर्ष है। 25 वर्ष बाद शुद्ध ट्राइटियम के एक नमूने का कितना अंश अविघटित रहेगा?

हल परिभाषा के अनुसार 12.5 वर्ष बाद ट्राइटियम के नमूने का ½ भाग बचेगा। अगले 12.5 वर्ष में इस आधे का फिर आधा यानी ¼ भाग बचेगा। अत: 25 साल बाद शुद्ध ट्राइटियम के किसी नमूने का ¼ अविघटित भाग रहेगा।

13.6.2 ऐल्फ़ा-क्षय

$^{238}_{92}U$ का $^{234}_{90}Th$ में क्षय ऐल्फ़ा-क्षय का एक प्रचलित उदाहरण है। इस प्रक्रिया में हीलियम नाभिक ($^{4}_{2}He$) उत्सर्जित होता है:

$$^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He \qquad (13.19)$$

ऐल्फ़ा-क्षय में, उत्पादित विघटनज नाभिक की द्रव्यमान-संख्या क्षय होने वाले मूल नाभिक की तुलना में 4 कम होती है तथा परमाणु क्रमांक 2 कम होता है। सामान्यत: किसी मूल नाभिक $^{A}_{Z}X$ के विघटनज नाभिक $^{A-4}_{Z-2}Y$ में रूपांतरण को इस प्रकार व्यक्त करते हैं

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He \qquad (13.20)$$

आइंस्टाइन के द्रव्यमान-ऊर्जा समतुल्यता संबंध [समी. (13.6)] तथा ऊर्जा संरक्षण से यह स्पष्ट है कि ऐसा स्वत: क्षय केवल क्षय उत्पादों का कुल द्रव्यमान प्रारंभिक नाभिक के द्रव्यमान से कम होने की स्थिति में ही संभव है। द्रव्यमान में यह अंतर उत्पादों की गतिज ऊर्जा के रूप में अवतरित होता है। नाभिकीय द्रव्यमानों की सूची से यह ज्ञात किया जा सकता है कि $^{234}_{90}Th$ तथा $^{4}_{2}He$ का कुल द्रव्यमान वास्तव में $^{238}_{92}U$ के द्रव्यमान से कम होता है।

प्रारंभिक द्रव्यमान-ऊर्जा एवं क्षय उत्पादों की कुल द्रव्यमान-ऊर्जा का अंतर इस प्रक्रिया का Q-मान अथवा *विघटनज ऊर्जा* कहलाता है। ऐल्फ़ा-क्षय में

$$Q = (m_X - m_Y - m_{He})\, c^2 \qquad (13.21)$$

ऊर्जा का यह मान इस प्रक्रिया में जनित कुल गतिज ऊर्जा अथवा उत्पादों की कुल गतिज ऊर्जा (यदि प्रारंभिक नाभिक X स्थिर हो) भी है। स्पष्टत: किसी ऊष्माक्षेपी प्रक्रिया (जैसे कि ऐल्फ़ा-क्षय) के लिए $Q > 0$।

उदाहरण 13.6

उदाहरण 13.6 हमें निम्नलिखित परमाणु द्रव्यमान दिए गए हैं :

$^{238}_{92}U$ = 238.05079 u $\quad$ $^{4}_{2}He$ = 4.00260 u

$^{234}_{90}Th$ = 234.04363 u $\quad$ $^{1}_{1}H$ = 1.00783 u

$^{237}_{91}Pa$ = 237.05121 u

यहाँ प्रतीक Pa तत्व प्रोटऐक्टिनियम ($Z = 91$) तत्व के लिए है।

(a) $^{238}_{92}U$ के α–क्षय में उत्सर्जित ऊर्जा परिकलित कीजिए।

(b) दर्शाइए कि $^{238}_{92}U$ स्वत: प्रोटॉन उत्सर्जन नहीं कर सकता।

हल

(a) $^{238}_{92}U$ का ऐल्फ़ा–क्षय समीकरण (13.20) के अनुसार होता है। इस प्रक्रिया में उत्सर्जित ऊर्जा के लिए सूत्र है :

$$Q = (M_U - M_{Th} - M_{He})\, c^2$$

प्रश्न में दिए गए आँकड़े उपरोक्त सूत्र में प्रतिस्थापित करने पर,

$$Q = (238.05079 - 234.04363 - 4.00260)\text{u} \times c^2$$
$$= (0.00456\ \text{u})\, c^2$$
$$= (0.00456\ \text{u})\ (931.5\ \text{MeV/u})$$
$$= 4.25\ \text{MeV}$$

(b) यदि $^{238}_{92}U$ से एक प्रोटॉन का स्वत: उत्सर्जन होता है तो क्षय-प्रक्रिया इस प्रकार लिखेंगे–

$$^{238}_{92}U \rightarrow {}^{237}_{91}Pa + {}^{1}_{1}H$$

यदि यह प्रक्रिया संभव हो तो इसके लिए,

$$= (M_U - M_{Pa} - M_H)\, c^2$$
$$= (238.05079 - 237.05121 - 1.00783)\ \text{u} \times c^2$$
$$= (-\ 0.00825\ \text{u})\, c^2$$
$$= -\ (0.00825\ \text{u})(931.5\ \text{MeV/u})$$
$$= -\ 7.68\ \text{MeV}$$

यहाँ प्रक्रिया का Q, क्योंकि, ऋणात्मक है; अत: इसका स्वत: क्षयित होना संभव नहीं है। $^{238}_{92}U$ नाभिक से एक प्रोटॉन उत्सर्जित करने के लिए हमें इसको 7.68 MeV ऊर्जा प्रदान करनी होगी।

13.6.3 बीटा-क्षय

बीटा–क्षय में किसी नाभिक से एक इलेक्ट्रॉन (β^-–क्षय) अथवा एक पॉजिट्रॉन (β^+–क्षय) का स्वत: उत्सर्जन होता है। β^-–क्षय तथा β^+–क्षय के सामान्य उदाहरण निम्न हैं:

$$^{32}_{15}P \rightarrow {}^{32}_{16}S + e^- + \bar{\nu} \qquad (13.22)$$

$$^{22}_{11}Na \rightarrow {}^{22}_{10}Na + e^+ + \nu \qquad (13.23)$$

ये क्षय समी. (13.14) तथा (13.15) के अनुसार ही हैं, जिससे कि यह प्रागुक्ति नहीं की जा सकती कि कौन सा नाभिक क्षयित होगा। परंतु इस क्षय को अर्ध-आयु ($T_{1/2}$) से दर्शाया जा सकता है। उदाहरण के लिए, उपरोक्त क्षयों के लिए अर्ध-आयु क्रमश: 14.3 दिन तथा 2.6 वर्ष हैं। β^-–क्षय में इलेक्ट्रॉन के उत्सर्जन के साथ ही एक एंटीन्यूट्रिनो ($\bar{\nu}$) का भी उत्सर्जन होता है। तथा β^+ –क्षय में पॉजिट्रॉन के साथ न्यूट्रिनो (ν) का उत्सर्जन होता है। न्यूट्रिनो इलेक्ट्रॉन की तुलना में बहुत कम द्रव्यमान (संभवत: शून्य) वाले अनावेशित कण होते हैं। ये अन्य कणों के साथ केवल क्षीण अन्योन्य क्रिया करते हैं। ये बिना क्रिया किये पदार्थ की बहुत बड़ी मात्रा (पृथ्वी भी) को पार कर सकते हैं। यही कारण है कि इनका संसूचन बहुत कठिन है।

β^-–तथा β^+–दोनों ही क्षयों में द्रव्यमान संख्या A नहीं बदलती है। β^-–क्षय में नाभिक का परमाणु क्रमांक Z, 1 अधिक हो जाता है, जबकि β^+–क्षय में 1 कम हो जाता है। β^-–क्षय में मूल नाभिकीय प्रक्रिया न्यूट्रॉन का प्रोटॉन में रूपांतरण है:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu} \qquad (13.24)$$

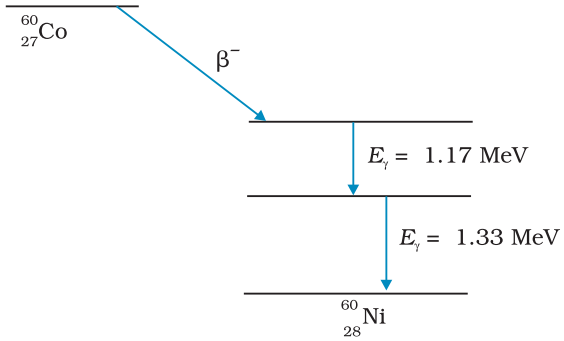
जबकि β^+–क्षय में प्रोटॉन का न्यूट्रॉन में रूपांतरण होता है:

$$p \rightarrow n + e^+ + \bar{\nu} \qquad (13.25)$$

प्रोटॉन का द्रव्यमान, न्यूट्रॉन के द्रव्यमान से कम है, अत: प्रोटॉन का न्यूट्रॉन में क्षय [समी. (13.25)] केवल नाभिक के अंदर ही संभव है, जबकि न्यूट्रॉन का प्रोटॉन में क्षय मुक्त अवस्था में भी संभव है [समी. (13.24)]।

13.6.4 गामा-क्षय

परमाणु के समान, नाभिक में भी विभिन्न ऊर्जा स्तर होते हैं– अनउत्तेजित अवस्था तथा उत्तेजित अवस्थाएँ। हालाँकि इनके ऊर्जा के मानों में अत्यधिक विभिन्नता होती है। परामाण्विक ऊर्जा स्तरों का कोटिमान eV का होता है, जबकि नाभिकीय ऊर्जा स्तरों में ऊर्जाओं का अंतर MeV के कोटिमान का होता है। जब कोई उत्तेजित नाभिक निम्न उत्तेजित अवस्था अथवा अनुत्तेजित अवस्था में संक्रमित होता है तो नाभिक के दोनों ऊर्जा स्तरों के अंतर के समान ऊर्जा का फोटॉन उत्सर्जित होता है। यही *गामा-क्षय* कहलाता है। यह ऊर्जा (MeV), कठोर X-किरणों के परिसर से कम तरंगदैर्घ्य वाले विकिरणों से संबंधित होती है।



चित्र 13.4 $^{60}_{27}$Co नाभिक के बीटा क्षय में उत्सर्जित γ-किरणों के उत्सर्जन को दर्शाने वाला ऊर्जा स्तर आरेख।

सामान्यत: किसी गामा किरण का उत्सर्जन, ऐल्फ़ा अथवा बीटा-क्षय में विघटनज नाभिक का उत्तेजित अवस्था में रहने की अवस्था में होता है। उत्तेजित नाभिक अनुत्तेजित अवस्था में आने की प्रक्रिया में एक फोटॉन अथवा एक से अधिक फोटॉनों (क्रमवार संक्रमण की अवस्था में) का उत्सर्जन करते हैं। 1.17 MeV तथा 1.33 MeV ऊर्जाओं की गामा किरणों के क्रमवार उत्सर्जन का सामान्य उदाहरण $^{60}_{27}$Co नाभिक के β^-–क्षय द्वारा $^{60}_{28}$Ni नाभिक में क्षयित होने की प्रक्रिया में प्रदर्शित होता है।

13.7 नाभिकीय ऊर्जा

चित्र 13.1 में दर्शाये गए प्रति न्यूक्लिऑन बंधन-ऊर्जा E_{bn} वक्र में $A = 30$ एवं $A = 170$ के बीच एक लंबा सपाट भाग है। इस भाग में प्रति न्यूक्लिऑन बंधन-ऊर्जा लगभग अचर (8.0MeV) है। हलके नाभिकों, $A > 30$, वाले भाग एवं भारी नाभिकों, $A > 170$, वाले भाग में, जैसा हम पहले ही देख चुके हैं, प्रति न्यूक्लिऑन बंधन-ऊर्जा 8.0 MeV से कम है। यदि बंधन-ऊर्जा अधिक हो तो उस बंधित निकाय जैसे नाभिक का कुल द्रव्यमान कम होगा। परिणामस्वरूप यदि कोई कम कुल बंधन-ऊर्जा वाला नाभिक किसी अधिक बंधन-ऊर्जा वाले नाभिक में रूपांतरित हो तो कुल ऊर्जा विमुक्त होगी। किसी भारी नाभिक के दो या दो से अधिक माध्यमिक द्रव्यमान खंडों (विखंडन) अथवा हलके नाभिकों का किसी भारी नाभिक में संयोजन (संलयन) की प्रक्रिया में ऐसा ही होता है।

कोयले एवं पेट्रोलियम जैसे पारंपरिक ऊर्जा स्रोतों में ऊष्माक्षेपी रासायनिक अभिक्रियाएँ होती हैं। यहाँ विमुक्त होने वाली ऊर्जा इलेक्ट्रॉन वोल्ट की कोटि की होती है। जबकि किसी नाभिकीय प्रक्रिया में, MeV कोटि की ऊर्जा विमुक्त होती है। अत: द्रव्य की समान मात्रा के लिए, रासायनिक स्रोतों की अपेक्षा नाभिकीय स्रोत लाखों गुना ऊर्जा विमुक्त करते हैं। उदाहरण के लिए, 1 kg यूरेनियम के विखंडन से लगभग 10^{14} J ऊर्जा प्राप्त होती है, जबकि 1 kg कोयले के दहन से 10^7 J ऊर्जा प्राप्त होती है।

13.7.1 विखंडन

प्राकृतिक रेडियोऐक्टिव क्षयों के अलावा नाभिकों पर अन्य नाभिकीय कणों जैसे प्रोटॉन, न्यूट्रॉन, ऐल्फा कण आदि के प्रकार से होने वाली नाभिकीय प्रक्रियाओं पर ध्यान देने से नई संभावनाएँ बनती हैं।

विखंडन एक महत्वपूर्ण न्यूट्रॉन-प्रेरक नाभिकीय प्रक्रिया है। विखंडन के उदाहरणत: जब किसी यूरेनियम समस्थानिक $^{235}_{92}U$ पर न्यूट्रॉन से प्रहार कराया जाता है तो वह दो माध्यमिक द्रव्यमान वाले नाभिकीय खंडों में विखंडित हो जाता है :

$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{144}_{56}Ba + ^{89}_{36}Kr + 3^{1}_{0}n \quad (13.26)$$

इसी क्रिया में माध्यमिक द्रव्यमान वाले नाभिकों के भिन्न युग्म भी उत्पन्न हो सकते हैं :

$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{133}_{51}Sb + ^{99}_{41}Nb + 4^{1}_{0}n \quad (13.27)$$

एक अन्य उदाहरण है :

$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \rightarrow ^{140}_{54}Xe + ^{94}_{38}Sr + 2^{1}_{0}n \quad (13.28)$$

ये विखंडित उत्पाद रेडियोऐक्टिव नाभिक होते हैं और इनमें तब तक β-क्षय का क्रम चलता रहता है जब तक कि अंत में स्थायी खंड प्राप्त न हो जाएँ।

यूरेनियम जैसे नाभिक की विखंडन अभिक्रिया में निर्मुक्त ऊर्जा (Q-मान) प्रति विखंडित नाभिक 200 MeV की कोटि की होती है। इसका आकलन हम निम्नवत करते हैं :

माना कि एक नाभिक का $A = 240$ है और यह $A = 120$ के दो खंडों में विखंडित होता है। तब

$A = 240$ नाभिक के लिए E_{bn} लगभग 7.6 MeV है (चित्र 13.1 देखें)।

$A = 120$ वाले विखंडित नाभिक के लिए E_{bn} लगभग 8.5 MeV है।

$\therefore$ प्रति न्यूक्लियॉन बंधन-ऊर्जा की लब्धि लगभग 0.9 MeV है।

अत: बंधन-ऊर्जा में कुल लब्धि 240×0.9 अथवा 216 MeV है।

विखंडन की घटनाओं की विघटन ऊर्जा पहले क्षय-उत्पादों तथा न्यूट्रॉनों की गतिज ऊर्जा के रूप में संलग्नित होती है। अंत में यह आसपास के द्रव्य को हस्तांतरित होकर ऊष्मा के रूप में परिणित हो जाती है। नाभिकीय रिएक्टरों में नाभिकीय विखंडन ऊर्जा से विद्युत उत्पादन होता है। परमाणु बम में विमुक्त होने वाली बृहत ऊर्जा अनियंत्रित नाभिकीय विखंडन से ही उत्पन्न होती है। अगले अनुभाग में हम कुछ विस्तार से यह चर्चा करेंगे कि नाभिकीय रिएक्टर कैसे कार्य करता है।

13.7.2 नाभिकीय रिएक्टर

समीकरणों (13.26) से (13.28) में वर्णित विखंडन से एक अति महत्वपूर्ण सत्य प्रतीत होता है। विखंडन क्रिया में एक अतिरिक्त न्यूट्रॉन की उत्पत्ति होती है। प्रति यूरेनियम विखंडन में औसतन 2.5 न्यूट्रॉनों की उत्पत्ति होती है। यह एक अनुपात है क्योंकि कुछ विखंडन घटनाओं में 2 न्यूट्रॉनों तथा कुछ में 3 न्यूट्रॉनों की उत्पत्ति होती है। ये अतिरिक्त न्यूट्रॉन अन्य विखंडन क्रियाओं की शुरुआत कर सकते हैं तथा और भी अधिक न्यूट्रॉनों की उत्पत्ति हो सकती है। इससे एक शृंखला अभिक्रिया की संभावना बनती है। यह विचार सर्वप्रथम एनरिको फर्मी ने रखा था। यदि इस शृंखला-अभिक्रिया को समुचित रूप से नियंत्रित किया जाए तो हमें एक स्थायी ऊर्जा निर्गत हो सकती है। नाभिकीय रिएक्टर में यही होता है। यदि शृंखला अभिक्रिया अनियंत्रित हो जाये तो इससे विखंडनकारी एवं विनाशकारी ऊर्जा निर्गत हो सकती है, जैसा कि किसी नाभिकीय बम में होता है।

हालांकि, किसी शृंखला अभिक्रिया को पोषित करने में एक और दुविधा है, जैसा कि यहाँ वर्णित है। प्रयोगों से हमें ज्ञात है कि मंद न्यूट्रॉनों (तापीय न्यूट्रॉन) द्वारा तीव्र न्यूट्रॉनों की अपेक्षा $^{235}_{92}U$ में

परमाणु ऊर्जा के क्षेत्र में भारत के बढ़ते कदम

भारत में परमाणु ऊर्जा कार्यक्रम की शुरुआत डॉ. होमी जहाँगीर भाभा (1909 – 1966) के नेतृत्व में लगभग स्वतंत्रता प्राप्ति के साथ ही की गई। एक प्रारंभिक, ऐतिहासिक उपलब्धि पहले भारतीय नाभिकीय रिएक्टर (अप्सरा नामक) की रचना एवं निर्माण था जिसने 4 अगस्त 1956 से अपना कार्य शुरू किया। इसमें संवर्धित यूरेनियम को ईंधन और जल को मंदक की तरह इस्तेमाल किया गया था। इसके बाद दूसरी बड़ी घटना 1960 में बना कनाडा इंडिया रिएक्टर (CIRUS) था। 40 MW के इस रिएक्टर में प्राकृतिक यूरेनियम ईंधन की तरह एवं भारी जल मंदक की तरह इस्तेमाल किया गया था। अप्सरा एवं साइरस ने मूल एवं प्रायोगिक नाभिकीय विज्ञान के विभिन्न क्षेत्रों में विस्तृत शोध को प्रोत्साहित किया। कार्यक्रम के पहले दो दशकों की विशिष्ट उपलब्धियों में एक था ट्रॉम्बे में स्वदेशी प्लूटोनियम संयंत्र की रचना एवं निर्माण, जिसने भारत में ईंधन पुनर्संसाधन तकनीकी (रिएक्टर के मुक्त शेष ईंधन से उपयोगी विखंडनीय एवं उर्वर नाभिकीय सामग्री को अलग करना) का मार्ग प्रशस्त किया। बाद में जो अन्य रिएक्टर शोध के लिए शुरू किए गए, उनमें शामिल हैं– एरलिना, पूर्णिमा (I, II एवं III), ध्रुव एवं कामिनी। कामिनी देश का पहला बड़ा शोध रिएक्टर है जिसमें U-233 को ईंधन की तरह इस्तेमाल किया गया है। जैसा नाम से स्पष्ट है शोध-रिएक्टर का प्राथमिक उद्देश्य शक्ति जनन नहीं है, वरन नाभिकीय विज्ञान एवं तकनीकी के विभिन्न पक्षों पर शोध के लिए सुविधा प्रदान करना है। शोध रिएक्टर विभिन्न समस्थानिकों के उत्पादन के भी श्रेष्ठ स्रोत हैं जिनके विभिन्न क्षेत्रों–उद्योग, औषधि, कृषि आदि में उपयोग हैं।

कार्यक्रम का मुख्य उद्देश्य शुरू से ही यह रहा है कि देश के सामाजिक एवं आर्थिक विकास के लिए सुरक्षित एवं विश्वसनीय विद्युत शक्ति प्रदान की जाए और नाभिकीय तकनीकी के सभी क्षेत्रों में आत्मनिर्भर बना जाए। पचास के दशक के शुरुआती वर्षों में, भारत में परमाण्विक खनिजों को ढूँढ़ने का जो कार्य हुआ, उससे यह संकेत मिले कि यहाँ यूरेनियम के भंडार तो बहुत सीमित हैं, पर थोरियम के भंडार पर्याप्त मात्रा में हैं। उसके अनुसार ही हमारे देश ने नाभिकीय शक्ति जनन की एक तीन चरणों में पूरी होने वाली योजना अपनायी। पहले चरण में प्राकृतिक यूरेनियम को ईंधन के रूप में एवं भारी जल को मंदक के रूप में प्रयुक्त किया जाना है। रिएक्टर के अपशिष्ट को पुनर्संसाधित करने पर प्राप्त प्लूटोनियम-239, दूसरे चरण में तीव्र रिएक्टर में ईंधन का काम करता है। इन रिएक्टरों को तीव्र प्रजनक रिएक्टर इसलिए कहते हैं क्योंकि इनमें शृंखला प्रक्रिया को बनाए रखने के लिए तीव्र न्यूट्रॉनों का उपयोग होता है (अत: मंदक की आवश्यकता नहीं होती) और ये शक्ति जनन के अतिरिक्त, जिस तरह का ईंधन खर्च करते हैं, उससे अधिक विखंडनशील पदार्थों (प्लूटोनियम) को जन्म भी देते हैं। तीसरा चरण, जो दीर्घकालिक योजना के हिसाब से सर्वाधिक महत्त्वपूर्ण है, ऐसे तीव्र प्रजनक रिएक्टरों के इस्तेमाल पर आधारित है जो थोरियम-232 को विखंडनशील यूरेनियम-233 में बदलेंगे और फिर इनके लिए विशेष रूप से बनाए गए शक्ति संयंत्रों में इस्तेमाल किए जाएँगे।

अभी भारत कार्यक्रम के दूसरे चरण से गुजर रहा है और थोरियम के उपयोग संबंधी तीसरे चरण के लिए भी काफ़ी कार्य हो चुका है। देश ने खनिज अनुसंधान एवं उत्खनन। ईंधन निर्माण, भारी जल उत्पादन, रिएक्टर की रचना, निर्माण एवं प्रचालन, तथा ईंधन पुनर्संसाधन आदि, संश्लिष्ट तकनीकों पर प्रभुत्व प्राप्त कर लिया है। संपीडित भारी जल रिएक्टर (PHWRs) जो देश में विभिन्न स्थानों पर बनाए गए हैं, पहले चरण की पूर्णता का संकेत देते हैं। भारत अब अपनी आवश्यकता से अधिक भारी जल का उत्पादन कर रहा है। रिएक्टरों की रचना एवं प्रचालन दोनों के संबंध में विस्तृत सुरक्षा प्रबंध तथा रेडियो विकिरणों से बचाव संबंधी प्रामाणिक निर्देशों का सख्ती से पालन, भारतीय परमाणु ऊर्जा कार्यक्रम की पहचान है।

विखंडन की ज्यादा प्रायिकता है। विखंडन में निकले तीव्र न्यूट्रॉन अन्य विखंडन प्रक्रिया करने की अपेक्षा बाहर भी निकल सकते हैं।

$^{235}_{92}U$ के विखंडन में उत्पादित न्यूट्रॉन की औसत ऊर्जा 2 MeV होती है। ये न्यूट्रॉन जब तक कि इनका मंदन न किया जाए, यूरेनियम नाभिकों से क्रिया किए बिना ही रिएक्टर से बाहर निकल जाते हैं। यूरेनियम नाभिकों से इन तीव्र न्यूट्रॉनों के लिए शृंखला क्रिया (chain reaction) को बनाए रखने में प्रयुक्त विखंडनीय पदार्थ की बहुत अधिक मात्रा की आवश्यकता होती है। तीव्र

न्यूट्रॉनों को हलके न्यूट्रॉनों के साथ प्रत्यास्थ संघट्ट द्वारा मंदित किया जाता है। वास्तव में, चैडविक के प्रयोगों ने दर्शाया कि हाइड्रोजन के साथ प्रत्यास्थ टक्कर में न्यूट्रॉन लगभग स्थिर हो जाते हैं तथा समस्त ऊर्जा प्रोटॉन द्वारा ले ली जाती है। यह स्थिति वैसी ही है जैसा कि किसी गतिमान काँच की गोली की अन्य स्थिर समान गोली के साथ आमने-सामने की टक्कर। अतः रिएक्टरों में, तीव्र न्यूट्रॉनों को मंदित करने के लिए विखंडनीय नाभिकों के साथ हलके नाभिकों [जिन्हें अवमंदक (moderator) कहते हैं] का प्रयोग किया जाता है। प्रायः प्रयुक्त होने वाले अवमंदक जल, भारी जल (D_2O) तथा ग्रैफाइट हैं। भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र (BARC), मुंबई के अप्सरा रिएक्टर में अवमंदक के रूप में जल का प्रयोग होता है। शक्ति उत्पादन के लिए प्रयुक्त भारत के अन्य रिएक्टरों में अवमंदक के रूप में भारी जल का उपयोग होता है।

अवमंदक के उपयोग के कारण, किसी स्तर पर निकले न्यूट्रॉनों के द्वारा विखंडनों की संख्या का उसके पिछले स्तर पर निकले न्यूट्रॉनों के द्वारा विखंडनों की संख्या के साथ अनुपात, K का मान एक से अधिक हो सकता है। इस अनुपात को *गुणन कारक* (multiplication factor) कहते हैं। यह रिएक्टर में न्यूट्रॉनों की वृद्धि दर को मापता है। $K = 1$, के लिए रिएक्टर की प्रवृत्ति *क्रांतिक* कहलाती है जो स्थिर शक्ति उत्पादन की प्रवृत्ति के लिए ऐच्छिक है। K का मान एक से अधिक होने पर क्रिया दर तथा रिएक्टर की शक्ति में चरघातांकी (exponentially) क्रम में वृद्धि होती है। K का मान एक की संख्या के आसपास न होने पर रिएक्टर *अतिक्रांतिक* हो जायेगा तथा रिएक्टर में विस्फोट भी हो सकता है। सन् 1986 में यूक्रेन के चेर्नोबिल रिएक्टर में हुआ विस्फोट इस दुखद तथ्य का स्मरण कराता है कि नाभिकीय रिएक्टर में कोई दुर्घटना कितनी विनाशकारी हो सकती है।

क्रिया दर नियंत्रण कैडमियम जैसे न्यूट्रॉन-अवशोषक पदार्थ से बनी *नियंत्रक छड़ों* (control rods) द्वारा किया जाता है। नियंत्रक छड़ों के अतिरिक्त रिएक्टरों में *रक्षक छड़ों* को भी प्रयुक्त किया जाता है। इन रक्षक छड़ों को आवश्यकता पड़ने पर रिएक्टर में निर्विष्ट करा कर K का मान शीघ्रता से एक से कम किया जा सकता है।

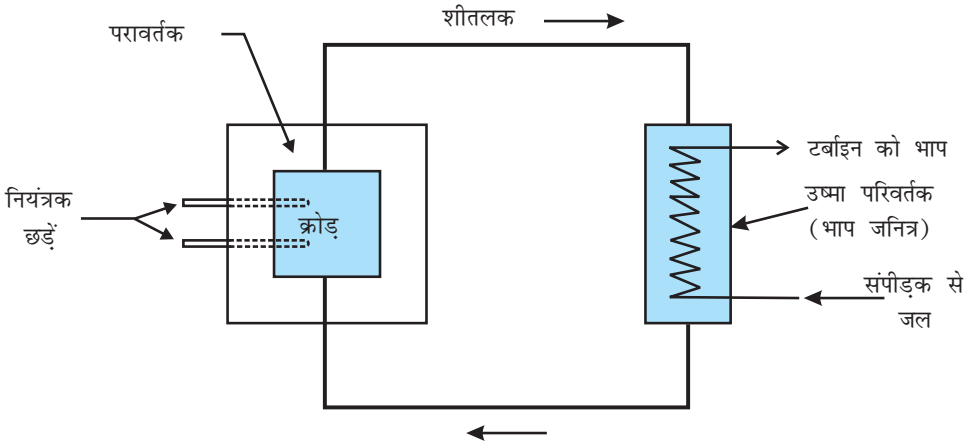
प्राकृतिक रूप में पाये जाने वाले यूरेनियम में प्रचुर $^{238}_{92}U$ समस्थानिक अ-विखंडनीय होता है। जब इसमें किसी न्यूट्रॉन का ग्रहण (capture) होता है, तो अत्यंत रेडियोऐक्टिव प्लूटोनियम का उत्पादन निम्न क्रियाओं से होता है:

$$^{238}_{92}U + n \rightarrow ^{239}_{92}U \rightarrow ^{239}_{93}Np + e^- + \bar{\nu}$$

$$^{239}_{93}Np \rightarrow ^{239}_{94}Pu + e^- + \bar{\nu} \qquad (13.29)$$

प्लूटोनियम में मंद न्यूट्रॉनों के प्रहार से विखंडन हो सकता है। चित्र 13.5 में तापीय न्यूट्रॉन विखंडन पर आधारित किसी नाभिकीय रिएक्टर का सरलीकृत प्रारूप दर्शाया गया है। रिएक्टर की क्रोड नाभिकीय विखंडन का क्षेत्र है। इसमें उपयुक्त सांचे हुए रूप में ईंधन तत्व रहते हैं। यह ईंधन, प्राकृतिक रूप से पाये जाने वाले यूरेनियम की अपेक्षा $^{235}_{92}U$ में प्रचुर बहुल यूरेनियम भी हो सकता है। क्रोड में न्यूट्रॉनों को मंद करने के लिए मंदक (moderator) लगे होते हैं। दरार में से छूटने (leakage) को रोकने के लिए क्रोड एक परावर्तक (reflector) से घिरी होती है। एक समुचित शीतलक द्वारा विखंडन में निकली ऊर्जा (उष्मा) को निरंतर हटाया जाता है। विखंडित रेडियोऐक्टिव उत्पादों के पलायन को रोकने के लिए पात्र लगे होते हैं। इस सारी व्यवस्था से हानिकारक विकिरणों को बाहर न आने देने के लिए एक कवच का उपयोग किया जाता है। न्यूट्रॉनों के अवशोषण की उच्च क्षमता वाली छड़ों (जैसे कि कैडमियम की बनी) के उपयोग से रिएक्टर को बंद किया जा सकता है। शीतलक से उष्मा एक कार्यकारी द्रव्य को स्थानान्तरित की जाती है जिससे कि भाप

भारत में नाभिकीय शक्ति संयंत्र http://www.npcil.nic.in/plantsInoperation.asp



चित्र 13.5 तापीय न्यूट्रॉन विखंडन पर आधारित किसी नाभिकीय रिएक्टर की सरलीकृत रूपरेखा

का उत्पादन होता है। इस भाप से टर्बाइन को घुमाकर विद्युत उत्पादन होता है। किसी अन्य शक्ति रिएक्टर की भांति ही नाभिकीय रिएक्टर से काफी मात्रा में निरर्थक उत्पाद निकलते हैं। परन्तु नाभिकीय निरर्थकों के निराकरण में विशेष ध्यान देना होता है क्योंकि ये रेडियोऐक्टिव तथा हानिकारक होते हैं। रिएक्टर के संचालन, उनके रख-रखाव तथा व्ययित ईंधन के लिए विस्तृत सुरक्षा प्रबंध किये जाते हैं। भारतीय परमाणु ऊर्जा कार्यक्रम में ये सुरक्षा प्रबंध विशिष्ट हैं। रेडियोऐक्टिव अपशिष्टों को कम सक्रिय तथा अल्पजीवी द्रव्यों में परिवर्तित करने की संभावनाओं के अध्ययन के लिए एक समुचित उपयुक्त योजना के विकास पर कार्य चल रहा है।

13.7.3 नाभिकीय संलयन-तारों में ऊर्जा जनन

चित्र 13.1 में दर्शाया गया बंधन-ऊर्जा वक्र यह भी दर्शाता है कि यदि दो हलके नाभिक मिलकर एक अपेक्षाकृत बड़ा नाभिक बनाएँ तो ऊर्जा निर्मुक्त होती है। इस प्रक्रिया को *नाभिकीय संलयन* कहते हैं। इस तरह की ऊर्जा विमोचक अभिक्रियाओं के कुछ उदाहरण नीचे दिए गए हैं :

$$ {}_1^1\mathrm{H} + {}_1^1\mathrm{H} \rightarrow {}_1^2\mathrm{H} + e^+ + \nu + 0.42\ \mathrm{MeV} \qquad [13.29(a)] $$

$$ {}_1^2\mathrm{H} + {}_1^2\mathrm{H} \rightarrow {}_2^3\mathrm{He} + n + 3.27\ \mathrm{MeV} \qquad [13.29(b)] $$

$$ {}_1^2\mathrm{H} + {}_1^2\mathrm{H} \rightarrow {}_1^3\mathrm{H} + {}_1^1\mathrm{H} + 4.03\ \mathrm{MeV} \qquad [13.29(c)] $$

अभिक्रिया 13.29 (a) में दो प्रोटॉन मिलकर एक ड्यूट्रॉन एवं एक पॉजिट्रॉन बनाते हैं और इस प्रक्रिया में 0.42 MeV ऊर्जा निकलती है। अभिक्रिया 13.29 (b) में दो ड्यूट्रॉन मिलकर हीलियम का हलका समस्थानिक बनाते हैं। अभिक्रिया 13.29 (c) में दो ड्यूट्रॉन मिलकर एक ट्रीटियम एवं एक प्रोटॉन बनाते हैं। संलयन के लिए दो नाभिकों का इतने अधिक पास आना आवश्यक है जिससे कि उनके बीच आकर्षित लघु-परासीय नाभिकीय बल कार्य कर सके। हालाँकि दोनों नाभिक धनात्मक आवेशित हैं, अत: उनके बीच कूलॉम प्रतिकर्षण होगा। अत: इनमें कूलॉम अवरोध पार करने के लिए समुचित ऊर्जा होनी आवश्यक है। इस कूलॉम अवरोध की ऊँचाई आवेशों एवं अन्योन्यक्रिया गत नाभिकों की त्रिज्याओं पर निर्भर करती है। उदाहरण के लिए, यह आसानी से दर्शाया जा सकता है कि दो प्रोटॉनों के लिए यह अवरोधतुंगता (barrier height) लगभग 400

नाभिकीय रिएक्टर का एक सरलीकृत ऑन-लाइन अनुकार
http://www.kernenergie.net/datf/en/interactive/reactor.php
भौतिकी

keV है। अधिक आवेशधारी नाभिकों के लिए अवरोधतुंगता और भी अधिक होगी। किसी प्रोटॉन गैस में प्रोटॉनों द्वारा कूलॉम अवरोध को पार करने के लिए पर्याप्त ऊर्जा $3\times10^9 K$ ताप पर प्राप्त हो सकती है। इस ताप का परिकलन, सूत्र $(3/2)kT = K$ में K का मान 400 keV रखने पर किया जा सकता है।

ऊर्जा की उपयोगी मात्रा उत्पन्न करने के लिए नाभिकीय संलयन स्थूल-द्रव्य में होना चाहिए। आवश्यकता बस इस बात की है कि द्रव्य का ताप तब तक बढ़ाया जाए जब तक कि इसके कण मात्र अपनी तापीय गति के कारण, कूलॉम अवरोध को पार न कर जाएँ। इस प्रक्रिया को *ताप नाभिकीय संलयन* कहते हैं।

तारों के अंत: पटल में निर्गत ऊर्जा का स्रोत ताप नाभिकीय संलयन है। सूर्य के क्रोड का ताप लगभग 1.5×10^7 K है, जो कि औसत ऊर्जा के कणों के संलयन के लिए आवश्यक अनुमानित ताप से काफी कम है। स्पष्टत: सूर्य में होने वाली संलयन प्रक्रियाओं में औसत ऊर्जाओं से बहुत अधिक ऊर्जा वाले प्रोटॉन भाग लेते हैं।

अत: ताप नाभिकीय संलयन बहुत उच्च ताप एवं दाब पर ही हो सकता है और ताप एवं दाब की ऐसी स्थितियाँ केवल तारों के अंतरंग में ही उपलब्ध हैं। तारों में ऊर्जा जनन ताप-नाभिकीय संलयन के माध्यम से ही होता है।

सूर्य में होने वाली संलयन अभिक्रिया एक बहुचरण प्रक्रिया है जिसमें हाइड्रोजन हीलियम में बदलती है। अत: सूर्य के क्रोड में हाइड्रोजन ईंधन है। *प्रोटॉन-प्रोटॉन (p – p) चक्र* जिसके द्वारा यह घटित होता है, निम्नलिखित अभिक्रियाओं के समुच्चय द्वारा व्यक्त किया जा सकता है।

$$_1^1H + _1^1H \rightarrow _1^2H + e^+ + \nu + 0.42 \text{ MeV} \quad \text{(i)}$$

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma + 1.02 \text{ MeV} \quad \text{(ii)}$$

$$_1^2H + _1^1H \rightarrow _2^3He + \gamma + 5.49 \text{ MeV} \quad \text{(iii)}$$

$$_2^3H + _2^3H \rightarrow _2^4He + _1^1H + _1^1H + 12.86 \text{ MeV} \quad \text{(iv)} \qquad (13.30)$$

चौथी अभिक्रिया होने के लिए यह आवश्यक है कि पहली तीन अभिक्रियाएँ दो-दो बार हों और इस प्रकार दो हलके हीलियम नाभिक मिलकर सामान्य हीलियम का एक नाभिक बनाएँ। अगर हम 2(i) + 2(ii) + 2(iii) +(iv) पर विचार करें तो कुल प्रभाव होगा,

$$4_1^1H + 2e^- \rightarrow _2^4He + 2\nu + 6\gamma + 26.7 \text{ MeV}$$

या $$(4_1^1H + 4e^-) \rightarrow (_2^4He + 2e^-) + 2\nu + 6\gamma + 26.7 \text{ MeV} \qquad (13.31)$$

अत: चार हाइड्रोजन परमाणु मिलकर एक $_2^4He$ परमाणु बनाते हैं और इस प्रक्रिया में 26.7 MeV ऊर्जा निर्मुक्त होती है।

किसी तारे के अंत: पटल में केवल हीलियम का ही निर्माण नहीं होता। जैसे-जैसे क्रोड में हाइड्रोजन (हीलियम में बदल कर) कम होती है, क्रोड ठंडा होने लगता है। इससे तारा अपने गुरुत्व के कारण संकुचित होता है जिससे क्रोड का ताप बढ़ जाता है। यदि क्रोड का ताप 10^8K तक बढ़ जाये तो संलयन की क्रिया पुन: होने लगेगी, पर इस बार हीलियम कार्बन में परिवर्तित होगी। इस प्रकार की प्रक्रिया में संलयन द्वारा बड़े द्रव्यमान संख्या वाले तत्वों का जनन हो सकता है। परन्तु

बंधन-ऊर्जा वक्र (चित्र 13.1) के शीर्ष पर स्थित भारी तत्वों का निर्माण इस प्रक्रिया से नहीं हो सकता।

सूर्य की आयु लगभग 5×10^9 वर्ष है तथा यह अनुमान लगाया जाता है कि सूर्य को और 5 अरब वर्षों तक बनाये रखने के लिए आवश्यक हाइड्रोजन उपलब्ध है। इसके पश्चात्, हाइड्रोजन का जलना रुक जाएगा तथा सूर्य ठंडा होने लगेगा। इससे सूर्य अपने गुरुत्व के कारण संकुचित होने लगेगा जिससे सूर्य की क्रोड का ताप बढ़ेगा। इससे सूर्य का बाहरी आवरण फैलने लगेगा जिससे सूर्य एक *लाल दानव* (red giant) में परिवर्तित हो जाएगा।

नाभिकीय विध्वंस

एक यूरेनियम नाभिक के विखंडन में लगभग 0.9×235 MeV ($\approx$200 MeV) ऊर्जा विमुक्त होती है, यदि लगभग 50 kg $^{235}_{92}U$ का प्रत्येक नाभिक विखंडित हो जाए तो लगभग 4×10^{15} J ऊर्जा उत्पन्न होगी। यह ऊर्जा 20,000 टन TNT के समतुल्य है जो एक महा विस्फोट के लिए पर्याप्त है। बड़ी मात्रा में नाभिकीय ऊर्जा का अनियंत्रित निर्मुक्त परमाणु विस्फोट कहलाता है। 6 अगस्त 1945 को युद्ध में पहली बार एक परमाणु युक्ति का उपयोग किया गया। अमेरिका ने जापान के शहर हिरोशिमा पर एक परमाणु बम गिराया। विस्फोट 20,000 टन TNT के समतुल्य था। रेडियोऐक्टिव उत्पादों ने एक क्षण में 3,43,000 निवासियों वाले शहर के 10 वर्ग किलोमीटर क्षेत्र को नष्ट कर दिया। इनमें 66,000 मर गए, 69,000 घायल हुए, शहर की 67% से अधिक इमारतें तहस-नहस हो गईं।

संलयन अभिक्रियाओं के लिए आवश्यक उच्च ताप विखंडन बम द्वारा उत्पन्न किया जा सकता है। 1954 में 10 मेगा टन TNT की विस्फोटक क्षमता के समतुल्य महाविस्फोट का परीक्षण किया गया। ये बम जिनमें हाइड्रोजन के समस्थानिकों, ड्यूटीरियम एवं ट्रीटियम का संलयन होता है, हाइड्रोजन बम कहलाते हैं। ऐसा माना जाता है कि इतने शक्तिशाली नाभिकीय हथियार स्थापित कर दिए गए हैं जो महज एक बटन दबाने पर कई बार पृथ्वी से जीवन का सफाया कर सकते हैं। ऐसे नाभिकीय विध्वंस से न सिर्फ पृथ्वी का वर्तमान जीवन नष्ट हो जाएगा, बल्कि इसके रेडियोऐक्टिव अपशिष्ट आने वाले समय के लिए भी पृथ्वी पर जीवन पनपने योग्य नहीं रहने देंगे। सैद्धांतिक गणनाओं के आधार पर जो परिदृश्य उभरकर आता है उसकी प्रागुक्ति (prediction) यह है कि एक लंबा नाभिकीय शीत युग प्रारंभ हो जाएगा क्योंकि रेडियोऐक्टिव अपशिष्ट बादल की तरह वायुमंडल में तैरेंगे और सूर्य से पृथ्वी की ओर आने वाले सभी विकिरणों को अवशोषित कर लेंगे।

13.7.4 नियंत्रित ताप नाभिकीय संलयन

किसी तारे में होने वाली ताप-नाभिकीय प्रक्रिया का रूपांतरण एक ताप-नाभिकीय युक्ति से किया जाता है। किसी नियंत्रित संलयन रिएक्टर का उद्देश्य नाभिकीय ईंधन को 10^8K ताप के परास में गरम कर स्थायी शक्ति जनन करना होता है। इस ताप पर ईंधन धनात्मक आयनों तथा इलेक्ट्रॉनों (प्लाज्मा) का मिश्रण होता है। चूंकि इस ताप को बनाये रखने के लिए कोई वस्तु उपलब्ध नहीं है, अतः इस ताप को बनाये रखना एक चुनौती है। भारत सहित विश्व के कई देश इस संबंध में युक्तियों के विकास में प्रयासरत हैं। इन प्रयासों के सफल होने पर, संभावना है कि संलयन रिएक्टर समाज को लगभग अनियमित शक्ति प्रदान कर सकेंगे।

उदाहरण 13.7 निम्नलिखित प्रश्नों के उत्तर दीजिए :

(a) क्या नाभिकीय अभिक्रियाओं के समीकरण (जैसा कि भाग 13.7 में दिए हैं) रासायनिक समीकरण (उदाहरण के लिए $2H_2 + O_2 \rightarrow 2\ H_2O$) के रूप में संतुलित हैं? यदि नहीं तो किस रूप में दोनों ओर समीकरण संतुलित होंगे।

(b) यदि प्रोटॉनों और न्यूट्रॉनों की संख्या, प्रत्येक नाभिकीय अभिक्रिया में संरक्षित रहती है, किसी नाभिकीय अभिक्रिया में किस प्रकार द्रव्यमान, ऊर्जा में (या इसका उलटा) बदलता है?

(c) सामान्य विचार है कि केवल नाभिकीय क्रिया में ही द्रव्यमान-ऊर्जा एक दूसरे में बदले जा सकते हैं जबकि रासायनिक क्रिया में यह कभी नहीं होता है। यह कहना असत्य है। समझाइए।

हल

(a) किसी रासायनिक अभिक्रिया के संतुलित होने की स्थिति में कि अभिक्रिया के समीकरण के दोनों ओर सभी तत्वों के परमाणुओं की संख्या समान होती है। किसी रासायनिक अभिक्रिया में परमाणुओं के मूल संयोजन में परिवर्तन मात्र होता है। परंतु किसी नाभिकीय अभिक्रिया में तत्वांतरण भी हो सकता है। अत: नाभिकीय अभिक्रिया में प्रत्येक तत्व के परमाणुओं की संख्या का संरक्षित होना आवश्यक नहीं है। हालाँकि, नाभिकीय अभिक्रिया में प्रोटॉनों तथा न्यूट्रॉनों दोनों की संख्याएँ पृथक रूप से संरक्षित रहती हैं। [वास्तव में, अत्यधिक ऊर्जा के परिमंडल में यह कथन भी सुनिश्चित सत्य नहीं है। वस्तुत: कुल आवेश तथा कुल 'बेरियॉन संख्या' संरक्षित रहते हैं। हम इस विषय पर यहाँ आगे और विचार नहीं करेंगे।] नाभिकीय अभिक्रियाओं [जैसे कि समीकरण (13.26)] में समीकरण के दोनों ओर प्रोटॉनों की संख्याएँ तथा न्यूट्रॉनों की संख्याएँ पृथक-पृथक रूप में समान हैं।

(b) हम जानते हैं कि नाभिक की बंधन-ऊर्जा का नाभिक के द्रव्यमान में ऋणात्मक योगदान (द्रव्यमान क्षति) होता है। चूँकि किसी नाभिकीय अभिक्रिया में प्रोटॉनों तथा न्यूट्रॉनों दोनों की संख्याएँ संरक्षित रहती हैं, अत: अभिक्रिया के दोनों ओर न्यूट्रॉनों तथा प्रोटॉनों का कुल विराम द्रव्यमान (rest mass) समान होता है। परंतु किसी नाभिकीय अभिक्रिया में बायीं ओर के नाभिकों की कुल बंधन-ऊर्जा अभिक्रिया के दायीं ओर के नाभिकों की कुल बंधन-ऊर्जा के समान होना आवश्यक नहीं है। इन बंधन-ऊर्जाओं का अंतर नाभिकीय अभिक्रिया में अवशोषित होने वाली अथवा निकलने वाली ऊर्जा के रूप में प्रकट होता है। चूँकि बंधन-ऊर्जा द्रव्यमान में योगदान देती है, अत: हम कहते हैं कि किसी नाभिकीय अभिक्रिया में दोनों ओर के कुल द्रव्यमानों का अंतर ऊर्जा के रूप में परिवर्तित हो जाता है (या इसके विपरीत ऊर्जा कुल द्रव्यमान के अंतर के रूप में परिवर्तित हो जाती है।)। इस रूप में नाभिकीय अभिक्रिया द्रव्यमान-ऊर्जा के अंत:रूपांतरण का एक उदाहरण है।

(c) द्रव्यमान-ऊर्जा के अंत:रूपांतरण की दृष्टि से, सिद्धांतत: एक रासायनिक अभिक्रिया नाभिकीय अभिक्रिया के समरूप है। किसी रासायनिक अभिक्रिया में अवशोषित अथवा निकलने वाली ऊर्जा अभिक्रिया के दोनों ओर के परमाणुओं तथा अणुओं की रासायनिक (नाभिकीय नहीं) बंधन ऊर्जाओं के अंतर को स्पष्ट करती है। चूँकि रासायनिक बंधन-ऊर्जा भी किसी परमाणु अथवा अणु के कुल द्रव्यमान में ऋणात्मक योगदान (द्रव्यमान-क्षति) को दर्शाती है, इसलिए हम निष्कर्ष निकाल सकते हैं कि किसी रासायनिक अभिक्रिया में दोनों ओर के परमाणुओं तथा अणुओं के कुल द्रव्यमानों का अंतर ऊर्जा के रूप में परिवर्तित हो जाता है या ऊर्जा कुल द्रव्यमानों के अंतर के रूप में परिवर्तित होकर समाविष्ट हो जाती है। हालाँकि, किसी रासायनिक अभिक्रिया में संलग्न द्रव्यमान क्षतियों का परिमाण नाभिकीय क्रिया में संलग्न द्रव्यमान क्षतियों की तुलना में कई लाख गुना कम होता है। सामान्य रूप में यही धारणा है कि ऐसा प्रतीत होता है (जो सत्य नहीं है) कि किसी रासायनिक अभिक्रिया में कोई द्रव्यमान-ऊर्जा का अंत:रूपांतरण नहीं होता।

सारांश

1. प्रत्येक परमाणु में एक नाभिक होता है। नाभिक धनावेशित होता है। नाभिक की त्रिज्या परमाणु की त्रिज्या से 10^4 गुना छोटी होती है। परमाणु का 99.9% से अधिक द्रव्यमान नाभिक में समाहित होता है।
2. परमाणुओं के स्तर पर द्रव्यमान, परमाणु द्रव्यमान इकाइयों (u) में मापे जाते हैं। परिभाषा के अनुसार 1 परमाणु द्रव्यमान इकाई (1u), ^{12}C के एक परमाणु के द्रव्यमान के 1/12 वें भाग के बराबर होती है।
   $1u = 1.660563 \times 10^{-27}$ kg
3. नाभिक में एक निरावेशित कण होता है जिसे न्यूट्रॉन कहते हैं। इसका द्रव्यमान लगभग उतना ही होता है जितना प्रोटॉन का।
4. किसी तत्व की परमाणु संख्या Z उस तत्व के परमाण्विक नाभिक में प्रोटॉनों की संख्या होती है। द्रव्यमान संख्या A, परमाण्विक नाभिक में प्रोटॉनों एवं न्यूट्रॉनों की कुल संख्या के बराबर होती है; $A = Z + N$; यहाँ N नाभिक में विद्यमान न्यूट्रॉनों की संख्या निर्दिष्ट करता है।
   एक नाभिकीय प्रजाति अथवा एक न्यूक्लाइड (nuclide) को ${}^{A}_{Z}X$ द्वारा व्यक्त करते हैं, जहाँ X उस रासायनिक प्रजाति का संकेत है।
   समान परमाणु संख्या Z, परंतु विभिन्न न्यूट्रॉन संख्या N के न्यूक्लाइड *समस्थानिक* कहलाते हैं। वे न्यूक्लाइड जिनके लिए द्रव्यमान संख्या A का मान समान हो *सममारिक* तथा वे जिनके लिए न्यूट्रॉन संख्या N का मान समान हो *समन्युट्रॉनिक* कहलाते हैं।
   अधिकांश तत्व दो या अधिक समस्थानिकों के मिश्रण होते हैं। तत्व का परमाणु द्रव्यमान उसके समस्थानिकों के द्रव्यमानों का *भारित माध्य* होता है। जहाँ भार से तात्पर्य समस्थानिकों की सापेक्ष बहुलता से है।
5. नाभिक को गोलाकार मानकर उसकी एक त्रिज्या निर्धारित की जा सकती है। इलेक्ट्रॉन प्रकीर्णन प्रयोगों के आधार पर नाभिक की त्रिज्या ज्ञात की जा सकती है। यह पाया गया है कि नाभिकों की त्रिज्या निम्नलिखित सूत्र से व्यक्त होती है।
   $R = R_0 A^{1/3}$,
   जहाँ R_0 = एक नियतांक = 1.2 fm. यह दर्शाता है कि नाभिक का घनत्व A पर निर्भर नहीं करता और यह 10^{17} kg/m^3 की कोटि का होता है।
6. नाभिक के अंदर न्यूट्रॉन एवं प्रोटॉन अल्प परासी प्रबल नाभिकीय बल द्वारा बँधे होते हैं। नाभिकीय बल न्यूट्रॉन एवं प्रोटॉन में विभेद नहीं करता।
7. नाभिकीय द्रव्यमान M हमेशा अपने अवयवों के कुल द्रव्यमान Σm से कम होता है। नाभिक और इसके अवयवों के द्रव्यमानों का अंतर *द्रव्यमान क्षति* कहलाता है।
   $\Delta M = (Z m_p + (A - Z) m_n) - M$
   आइंसटाइन का द्रव्यमान-ऊर्जा सिद्धांत $E = mc^2$ इस द्रव्यमान अंतर को ऊर्जा के रूप में इस प्रकार व्यक्त करता है :
   $\Delta E_b = \Delta M c^2$
   ऊर्जा ΔE_b नाभिक की *बंधन-ऊर्जा* कहलाती है। $A = 30$ से लेकर $A = 170$ द्रव्यमान संख्या के परास में प्रति न्यूक्लियॉन बंधन-ऊर्जा का मान लगभग नियत है। यह लगभग 8 MeV प्रति न्यूक्लियॉन है।
8. नाभिकीय प्रक्रियाओं से जुड़ी ऊर्जा रासायनिक प्रक्रियाओं की तुलना में लगभग दस लाख गुना अधिक होती है।
9. किसी नाभिकीय प्रक्रिया का Q-मान है :
   Q = अंतिम गतिज ऊर्जा – प्रारंभिक गतिज ऊर्जा
   द्रव्यमान-ऊर्जा संरक्षण के कारण, कह सकते हैं कि
   Q = (प्रारंभिक द्रव्यमानों का योग – अंतिम द्रव्यमानों का योग)c^2
10. रेडियोऐक्टिवता वह परिघटना है जिसमें दी गई प्रजाति के नाभिक, α या β या γ किरणें

उत्सर्जित करके रूपांतरित हो जाती हैं, जहाँ α-किरणें हीलियम के नाभिक हैं; β-किरणें इलैक्ट्रॉन हैं तथा γ-किरणें X-किरणों, से भी छोटी तरंगदैर्घ्य के विद्युत चुंबकीय विकिरण हैं।

11. रेडियोऐक्टिव क्षयता का नियम है: $N(t) = N(0)\, e^{-\lambda t}$
यहाँ λ क्षयांक अथवा विघटन स्थिरांक है। किसी रेडियोनाभिक की अर्ध-आयु ($T_{1/2}$) वह समय है जिसमें उनकी कुल संख्या N उनकी प्रारंभिक मान की आधी रह जाती है। औसत आयु τ वह समय है जिसने N अपने प्रारंभिक मान का e^{-1} गुण शेष रह जाता है।
$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2$
12. जब कम दृढ़ता से बंधित नाभिक अधिक दृढ़ता से बंधित नाभिक में परिवर्तित होता है तो ऊर्जा विमुक्त होती है। विखंडन में एक भारी नाभिक दो छोटे खंडों में विभाजित हो जाता है उदाहरणार्थ, ${}^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{133}_{51}\mathrm{Sb} + {}^{99}_{41}\mathrm{Nb} + 4\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$
13. यह तथ्य कि विखंडन में जितने न्यूट्रॉन प्रयुक्त होते हैं उससे अधिक उत्पन्न होते हैं, शृंखला अभिक्रिया की संभावना प्रदान करता है। इस प्रक्रिया में उत्पन्न होने वाला प्रत्येक न्यूट्रॉन, नए विखंडन का प्रारंभ करता है। नाभिकीय बम विस्फोट में अनियंत्रित शृंखला अभिक्रिया तेजी से होती है। नाभिकीय रिएक्टर में यह नियंत्रित एवं स्थिर दर पर होती है। रिएक्टर में न्यूट्रॉन वृद्धि गुणांक k का मान 1 बनाये रखा जाता है।
14. संलयन में हलके नाभिक मिलकर एक बड़ा नाभिक बनाते हैं। सूर्य सहित सभी तारों में हाइड्रोजन नाभिकों का हीलियम नाभिकों में संलयन ऊर्जा का स्रोत है।

भौतिक राशि	प्रतीक	विमाएँ	मात्रक	टिप्पणी
परमाणु द्रव्यमान इकाई		[M]	u	परमाणु या नाभिकीय द्रव्यमानों को व्यक्त करने के लिए द्रव्यमान मात्रक। एक परमाणु द्रव्यमान इकाई, ^{12}C परमाणु के द्रव्यमान के के 1/12वें भाग के बराबर है।
विघटन या क्षय नियतांक	λ	$[T^{-1}]$	s^{-1}	
अर्धायु	$T_{1/2}$	[T]	s	वह समय जिसमें रेडियोऐक्टिव नमूने के नाभिकों की संख्या प्रारंभिक संख्या की आधी रह जाती है।
रेडियोऐक्टिव नमूने की ऐक्टिवता	R	$[T^{-1}]$	Bq	एक रेडियोऐक्टिव स्रोत की ऐक्टिवता की माप।

विचारणीय विषय

1. नाभिकीय द्रव्य का घनत्व नाभिक के साइज़ पर निर्भर नहीं करता है। परमाणु द्रव्यमान घनत्व इस नियम का पालन नहीं करता।
2. इलेक्ट्रॉन प्रकीर्णन द्वारा ज्ञात की गई नाभिक की त्रिज्या का मान ऐल्फ़ा कण प्रकीर्णन के आधार पर ज्ञात की गई त्रिज्या से कुछ भिन्न पाया गया है। ऐसा इसलिए है, क्योंकि, इलेक्ट्रॉन

प्रकीर्णन नाभिक के आवेश वितरण से प्रभावित होता है जबकि ऐल्फ़ा कण और उस जैसे अन्य कण नाभिकीय द्रव्य से प्रभावित होते हैं।

3. आइंस्टाइन द्वारा द्रव्यमान एवं ऊर्जा की समतुल्यता $E = mc^2$ प्रदर्शित किए जाने के बाद अब हम द्रव्यमान संरक्षण एवं ऊर्जा संरक्षण के पृथक नियमों की बात नहीं करते, वरन द्रव्यमान-ऊर्जा संरक्षण के एक एकीकृत नियम की बात करते हैं। प्रकृति में यह नियम वस्तुत: प्रभावी है तथा इसका विश्वसनीय प्रमाण नाभिकीय भौतिकी में पाया जाता है। द्रव्यमान एवं ऊर्जा की समतुल्यता के नियम, नाभिकीय ऊर्जा एवं उसके शक्ति स्रोत के रूप में उपयोग का आधार है। इस नियम का उपयोग करके, किसी नाभिकीय प्रक्रिया (क्षय अथवा अभिक्रिया) के Q-मान को प्रारंभिक एवं अंतिम द्रव्यमानों के पदों में व्यक्त किया जा सकता है।
4. (प्रति न्यूक्लियॉन) बंधन-ऊर्जा वक्र की प्रकृति यह दर्शाती है कि ऊष्माक्षेपी नाभिकीय अभिक्रियाएँ संभव हैं जो दो हलके नाभिकों के संलयन से या एक भारी नाभिक के माध्यमिक द्रव्यमान वाले दो नाभिकों के विखंडन में देखी जा सकती हैं।
5. संलयन के लिए हलके नाभिकों में पर्याप्त प्रारंभिक ऊर्जा होनी चाहिए ताकि वे कूलॉम विभव अवरोध को पार कर सकें। यही कारण है कि संलयन के लिए अत्युच्च ताप की आवश्यकता होती है।
6. यद्यपि (प्रति न्यूक्लियॉन) बंधन-ऊर्जा वक्र संतत है और इसमें धीरे-धीरे ही परिवर्तन आता है परंतु इसमें ^{4}He, ^{16}O आदि न्यूक्लाइडों के लिए शिखर होते हैं। यह परमाणु की तरह ही नाभिक में भी शैल संरचना की विद्यमानता का प्रमाण माना जाता है।
7. ध्यान दें कि इलेक्ट्रॉन-पॉजिट्रॉन एक कण-प्रतिकण युग्म है। इनके द्रव्यमान एकसमान हैं। इनके आवेशों के परिमाण समान परंतु विपरीत प्रकृति के होते हैं। (यह पाया गया है कि जब एक इलेक्ट्रॉन एवं एक पॉजिट्रॉन एक साथ आते हैं तो एक-दूसरे का विलोपन (annihilation) कर देते हैं और γ-किरण फोटॉनों के रूप में ऊर्जा प्रदान करते हैं।
8. $\hat{a}^-$-क्षय (इलेक्ट्रॉन उत्सर्जन) में इलेक्ट्रॉन के साथ उत्सर्जित होने वाला कण एंटी-न्यूट्रिनो ($\overline{\nu}$) है। इसके विपरीत $\hat{a}^+$-क्षय (पॉजिट्रॉन उत्सर्जन) में न्यूट्रिनो (ν) उत्सर्जित होता है। न्यूट्रिनो एवं एंटी-न्यूट्रिनो का युग्म कण-प्रतिकण युग्म होता है। प्रकृति में प्रत्येक कण का एक प्रतिकण होता है। तब एंटी-प्रोटॉन जो प्रोटॉन का प्रतिकण है, क्या होना चाहिए?
9. एक मुक्त न्यूट्रॉन अस्थायी होता है ($n \rightarrow p + e^- + \overline{\nu}$)। परंतु, इसी तरह से मुक्त प्रोटॉन का क्षय संभव नहीं है। ऐसा होने का कारण यह है कि प्रोटॉन का द्रव्यमान न्यूट्रॉन के द्रव्यमान की तुलना में थोड़ा कम होता है।
10. प्राय: ऐल्फ़ा या बीटा उत्सर्जन के बाद गामा उत्सर्जन होता है। गामा फोटॉन उत्सर्जित करके कोई नाभिक उद्दीपित (उच्चतर) अवस्था से निम्नतर अवस्था में लौटता है। ऐल्फ़ा अथवा बीटा उत्सर्जन के पश्चात कोई नाभिक उद्दीपित अवस्था में रह सकता है। एक ही नाभिक से (जैसे कि चित्र 13.4 में दर्शाये गए ^{60}Ni के प्रकरण में) गामा किरणों का क्रमवार उत्सर्जन इस बात का स्पष्ट प्रमाण है कि नाभिकों में भी परमाणुओं की ही तरह विविक्त ऊर्जा स्तर होते हैं।
11. रेडियोऐक्टिवता नाभिक के अस्थायित्व का संसूचन है। हलके नाभिकों में स्थायित्व के लिए न्यूट्रॉनों एवं प्रोट्रॉनों की संख्या का अनुपात लगभग 1:1 होना चाहिए। भारी नाभिकों के स्थायित्व के लिए यह अनुपात 3:2 होना चाहिए। (प्रोटॉनों के मध्य लगने वाले प्रतिकर्षण के प्रभाव के निरसन के लिए अधिक न्यूट्रॉनों की आवश्यकता होगी।) इन स्थायित्व अनुपातों को न रखने वाले नाभिक अस्थायी होते हैं। इन नाभिकों में न्यूट्रॉनों अथवा प्रोटॉनों की अधिकता होती है। वास्तव में, (सभी तत्वों के) ज्ञात समस्थानिकों के मात्र लगभग 10% ही स्थायी हैं। अन्य नाभिक कृत्रिम रूप से प्रयोगशाला में बनाये जाते हैं (ये स्थायी नाभिकीय प्रजातियों पर α, p, d, n अथवा अन्य कणों के प्रघात द्वारा बनाये जाते हैं।)। अस्थायी समस्थानिक विश्व में पदार्थों के खगोलीय प्रेक्षणों में भी अवलोकित किए जाते हैं।

अभ्यास

अभ्यास के प्रश्न हल करने में निम्नलिखित आँकड़े आपके लिए उपयोगी सिद्ध होंगे :

$e = 1.6\times10^{-19}$C $N = 6.023\times10^{23}$ प्रति मोल

$1/(4\pi\epsilon_0) = 9 \times 10^9$ N m^2/C^2 $k = 1.381\times10^{-23}$J ^{0}K^{-1}

1 MeV $= 1.6\times10^{-13}$J 1 u $= 931.5$ MeV/c^2

1 year $= 3.154\times10^7$ s

$m_H = 1.007825$ u $m_n = 1.008665$ u

$m(^4_2\text{He}) = 4.002603$ u $m_e = 0.000548$ u

13.1 (a) लीथियम के दो स्थायी समस्थानिकों $^6_3$Li एवं $^7_3$Li की बहुलता का प्रतिशत क्रमशः 7.5 एवं 92.5 हैं। इन समस्थानिकों के द्रव्यमान क्रमशः 6.01512 u एवं 7.01600 u हैं। लीथियम का परमाणु द्रव्यमान ज्ञात कीजिए।

(b) बोरॉन के दो स्थायी समस्थानिक $^{10}_5$B एवं $^{11}_5$B है। उनके द्रव्यमान क्रमशः 10.01294 u एवं 11.00931 u एवं बोरॉन का परमाणु भार 10.811 u है। $^{10}_5$B एवं $^{11}_5$B की बहुलता ज्ञात कीजिए।

13.2 नियॉन के तीन स्थायी समस्थानिकों की बहुलता क्रमशः 90.51%, 0.27% एवं 9.22% है। इन समस्थानिकों के परमाणु द्रव्यमान क्रमशः 19.99 u, 20.99 u एवं 21.99 u हैं। नियॉन का औसत परमाणु द्रव्यमान ज्ञात कीजिए।

13.3 नाइट्रोजन नाभिक ($^{14}_7$N) की बंधन-ऊर्जा MeV में ज्ञात कीजिए $m_N = 14.00307$ u

13.4 निम्नलिखित आँकड़ों के आधार पर $^{56}_{26}$Fe एवं $^{209}_{83}$Bi नाभिकों की बंधन-ऊर्जा MeV में ज्ञात कीजिए। $m(^{56}_{26}\text{Fe}) = 55.934939$ u $m(^{209}_{83}\text{Bi}) = 208.980388$ u

13.5 एक दिए गए सिक्के का द्रव्यमान 3.0 g है। उस ऊर्जा की गणना कीजिए जो इस सिक्के के सभी न्यूट्रॉनों एवं प्रोटॉनों को एक-दूसरे से अलग करने के लिए आवश्यक हो। सरलता के लिए मान लीजिए कि सिक्का पूर्णतः $^{63}_{29}$Cu परमाणुओं का बना है ($^{63}_{29}$Cu का द्रव्यमान = 62.92960 u)।

13.6 निम्नलिखित के लिए नाभिकीय समीकरण लिखिए :

(i) $^{226}_{88}$Ra का α-क्षय (ii) $^{242}_{94}$Pu का α-क्षय

(iii) $^{32}_{15}$P का β^--क्षय (iv) $^{210}_{83}$Bi का β^--क्षय

(v) $^{11}_6$C का β^+-क्षय (vi) $^{97}_{43}$Tc का β^+-क्षय

(vii) $^{120}_{54}$Xe का इलेक्ट्रॉन अभिग्रहण

13.7 एक रेडियोऐक्टिव समस्थानिक की अर्धायु T वर्ष है। कितने समय के बाद इसकी ऐक्टिवता, प्रारंभिक ऐक्टिवता की (a) 3.125% तथा (b) 1% रह जाएगी।

13.8 जीवित कार्बनयुक्त द्रव्य की सामान्य ऐक्टिवता, प्रति ग्राम कार्बन के लिए 15 क्षय प्रति मिनट है। यह ऐक्टिवता, स्थायी समस्थानिक $^{14}_6$C के साथ-साथ अल्प मात्रा में विद्यमान रेडियोऐक्टिव $^{12}_6$C के कारण होती है। जीव की मृत्यु होने पर वायुमंडल के साथ इसकी अन्योन्य क्रिया (जो उपरोक्त संतुलित ऐक्टिवता को बनाए रखती है) समाप्त हो जाती है, तथा इसकी ऐक्टिवता कम होनी शुरू हो जाती है। $^{14}_6$C की ज्ञात अर्धायु (5730 वर्ष) और नमूने की मापी गई ऐक्टिवता के आधार पर इसकी सन्निकट आयु की गणना की जा सकती है। यही पुरातत्व विज्ञान में प्रयुक्त होने वाली $^{14}_6$C कालनिर्धारण (dating) पद्धति का सिद्धांत है। यह मानकर कि मोहनजोदड़ो से प्राप्त किसी नमूने की ऐक्टिवता 9 क्षय प्रति मिनट प्रति ग्राम कार्बन है। सिंधु घाटी सभ्यता की सन्निकट आयु का आकलन कीजिए।

13.9 8.0 mCi सक्रियता का रेडियोऐक्टिव स्रोत प्राप्त करने के लिए $^{60}_{27}Co$ की कितनी मात्रा की आवश्यकता होगी? $^{60}_{27}Co$ की अर्धायु 5.3 वर्ष है।

13.10 $^{90}_{38}Sr$ की अर्धायु 28 वर्ष है। इस समस्थानिक के 15 mg की विघटन दर क्या है?

13.11 स्वर्ण के समस्थानिक $^{197}_{79}Au$ एवं रजत के समस्थानिक $^{107}_{47}Ag$ की नाभिकीय त्रिज्या के अनुपात का सन्निकट मान ज्ञात कीजिए।

13.12 (a) $^{226}_{88}Ra$ एवं (b) $^{220}_{86}Rn$ नाभिकों के α-क्षय में उत्सर्जित α-कणों का Q-मान एवं गतिज ऊर्जा ज्ञात कीजिए।

दिया है: $m\,(^{226}_{88}Ra) = 226.02540$ u, $m\,(^{222}_{86}Rn) = 222.01750$ u,
$m\,(^{222}_{86}Rn) = 220.01137$ u, $m\,(^{216}_{84}Po) = 216.00189$ u.

13.13 रेडियोन्यूक्लाइड ^{11}C का क्षय निम्नलिखित समीकरण के अनुसार होता है,

$$^{11}_{6}C \rightarrow ^{11}_{5}B + e^{+} + \nu: \quad T_{1/2} = 20.3 \text{ min}$$

उत्सर्जित पॉजिट्रॉन की अधिकतम ऊर्जा 0.960 MeV है। द्रव्यमानों के निम्नलिखित मान दिए गए हैं

$m\,(^{11}_{6}C) = 11.011434$ u तथा $m\,(^{11}_{6}B) = 11.009305$ u,

Q-मान की गणना कीजिए एवं उत्सर्जित पॉजिट्रॉन की अधिकतम ऊर्जा के मान से इसकी तुलना कीजिए।

13.14 $^{23}_{10}Ne$ का नाभिक, β^- उत्सर्जन के साथ क्षयित होता है। इस β-क्षय के लिए समीकरण लिखिए और उत्सर्जित इलेक्ट्रॉनों की अधिकतम गतिज ऊर्जा ज्ञात कीजिए। $m\,(^{23}_{10}Ne) = 22.994466$ u u; $m\,(^{23}_{11}Na) = 22.089770$ u,

13.15 किसी नाभिकीय अभिक्रिया $A + b \rightarrow C + d$ का Q-मान निम्नलिखित समीकरण द्वारा परिभाषित होता है,

$$Q = [m_A + m_b - m_C - m_d]c^2$$

जहाँ दिए गए द्रव्यमान, नाभिकीय विराम द्रव्यमान (rest mass) हैं। दिए गए आँकड़ों के आधार पर बताइए कि निम्नलिखित अभिक्रियाएँ ऊष्माक्षेपी हैं या ऊष्माशोषी।

(i) $^{1}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow ^{2}_{1}H + ^{2}_{1}H$

(ii) $^{12}_{6}C + ^{12}_{6}C \rightarrow ^{20}_{10}Ne + ^{4}_{2}He$

दिए गए परमाणु द्रव्यमान इस प्रकार हैं :

$m\,(^{2}_{1}H) = 2.014102$ u

$m\,(^{3}_{1}H) = 3.016049$ u

$m\,(^{12}_{6}C) = 12.000000$ u

$m\,(^{20}_{10}Ne) = 19.992439$ u

13.16 माना कि हम $^{56}_{26}Fe$ नाभिक के दो समान अवयवों $^{28}_{13}Al$ में विखंडन पर विचार करें। क्या ऊर्जा की दृष्टि से यह विखंडन संभव है? इस प्रक्रम का Q-मान ज्ञात करके अपना तर्क प्रस्तुत करें। दिया है : $m\,(^{56}_{26}Fe) = 55.93494$ u एवं $m\,(^{28}_{13}Al) = 27.98191$ u

13.17 $^{239}_{94}Pu$ के विखंडन गुण बहुत कुछ $^{235}_{92}U$ से मिलते-जुलते हैं। प्रति विखंडन विमुक्त औसत ऊर्जा 180 MeV है। यदि 1 kg शुद्ध $^{239}_{94}Pu$ के सभी परमाणु विखंडित हों तो कितनी MeV ऊर्जा विमुक्त होगी?

13.18 किसी1000 MW विखंडन रिएक्टर के आधे ईंधन का 5.00 वर्ष में व्यय हो जाता है। प्रारंभ में इसमें कितना $^{235}_{92}U$ था? मान लीजिए कि रिएक्टर 80% समय कार्यरत रहता है, इसकी संपूर्ण ऊर्जा $^{235}_{92}U$ के विखंडन से ही उत्पन्न हुई है; तथा $^{235}_{92}U$ न्यूक्लाइड केवल विखंडन प्रक्रिया में ही व्यय होता है।

13.19 2.0 kg ड्यूटीरियम के संलयन से एक 100 वाट का विद्युत लैंप कितनी देर प्रकाशित रखा जा सकता है? संलयन अभिक्रिया निम्नवत ली जा सकती है

$${}^{2}_{1}\mathrm{H}+{}^{2}_{1}\mathrm{H}\rightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He}+\mathrm{n}+3.27\ \mathrm{MeV}$$

13.20 दो ड्यूट्रॉनों के आमने-सामने की टक्कर के लिए कूलॉम अवरोध की ऊँचाई ज्ञात कीजिए। (संकेत-कूलॉम अवरोध की ऊँचाई का मान इन ड्यूट्रॉन के बीच लगने वाले उस कूलॉम प्रतिकर्षण बल के बराबर होता है जो एक-दूसरे को संपर्क में रखे जाने पर उनके बीच आरोपित होता है। यह मान सकते हैं कि ड्यूट्रॉन 2.0 fm प्रभावी त्रिज्या वाले दृढ़ गोले हैं।)

13.21 समीकरण $R = R_0A^{1/3}$ के आधार पर, दर्शाइए कि नाभिकीय द्रव्य का घनत्व लगभग अचर है (अर्थात A पर निर्भर नहीं करता है)। यहाँ R_0 एक नियतांक है एवं A नाभिक की द्रव्यमान संख्या है।

13.22 किसी नाभिक से β^+ (पॉजिट्रॉन) उत्सर्जन की एक अन्य प्रतियोगी प्रक्रिया है जिसे इलेक्ट्रॉन परिग्रहण (Capture) कहते हैं (इसमें परमाणु की आंतरिक कक्षा, जैसे कि K-कक्षा, से नाभिक एक इलेक्ट्रॉन परिगृहीत कर लेता है और एक न्यूट्रिनो, ν उत्सर्जित करता है)।

$$e^+ + {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + \nu$$

दर्शाइए कि यदि β^+ उत्सर्जन ऊर्जा विचार से अनुमत है तो इलेक्ट्रॉन परिग्रहण भी आवश्यक रूप से अनुमत है, परंतु इसका विलोम अनुमत नहीं है।

अतिरिक्त अभ्यास

13.23 आवर्त सारणी में मैग्नीशियम का औसत परमाणु द्रव्यमान 24.312 u दिया गया है। यह औसत मान, पृथ्वी पर इसके समस्थानिकों की सापेक्ष बहुलता के आधार पर दिया गया है। मैग्नीशियम के तीनों समस्थानिक तथा उनके द्रव्यमान इस प्रकार हैं – ${}^{24}_{12}\mathrm{Mg}$ (23.98504 u), ${}^{25}_{12}\mathrm{Mg}$ (24.98584) एवं ${}^{26}_{12}\mathrm{Mg}$ (25.98259 u)। प्रकृति में प्राप्त मैग्नीशियम में ${}^{24}_{12}\mathrm{Mg}$ की (द्रव्यमान के अनुसार) बहुलता 78.99% है। अन्य दोनों समस्थानिकों की बहुलता का परिकलन कीजिए।

13.24 न्यूट्रॉन पृथक्करण ऊर्जा (Separation energy), परिभाषा के अनुसार, वह ऊर्जा है जो किसी नाभिक से एक न्यूट्रॉन को निकालने के लिए आवश्यक होती है। नीचे दिए गए आँकड़ों का इस्तेमाल करके ${}^{41}_{20}\mathrm{Ca}$ एवं ${}^{27}_{13}\mathrm{Al}$ नाभिकों की न्यूट्रॉन पृथक्करण ऊर्जा ज्ञात कीजिए।

$m({}^{40}_{20}\mathrm{Ca}) = 39.962591\ \mathrm{u}$
$m({}^{41}_{20}\mathrm{Ca}) = 40.962278\ \mathrm{u}$
$m({}^{26}_{13}\mathrm{Al}) = 25.986895\ \mathrm{u}$
$m({}^{27}_{13}\mathrm{Al}) = 26.981541\ \mathrm{u}$

13.25 किसी स्रोत में फॉस्फोरस के दो रेडियो न्यूक्लाइड निहित हैं ${}^{32}_{15}\mathrm{P}$ ($T_{1/2}$ = 14.3 d) एवं ${}^{33}_{15}\mathrm{P}$ ($T_{1/2}$ = 25.3 d)। प्रारंभ में ${}^{33}_{15}\mathrm{P}$ से 10% क्षय प्राप्त होता है। इससे 90% क्षय प्राप्त करने के लिए कितने समय प्रतीक्षा करनी होगी?

13.26 कुछ विशिष्ट परिस्थितियों में, एक नाभिक, α-कण से अधिक द्रव्यमान वाला एक कण उत्सर्जित करके क्षयित होता है। निम्नलिखित क्षय-प्रक्रियाओं पर विचार कीजिए :

$${}^{223}_{88}\mathrm{Ra}\rightarrow {}^{209}_{82}\mathrm{Pb}+{}^{14}_{6}\mathrm{C}$$

$${}^{223}_{88}\mathrm{Ra}\rightarrow {}^{219}_{86}\mathrm{Rn}+{}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

इन दोनों क्षय प्रक्रियाओं के लिए Q-मान की गणना कीजिए और दर्शाइए कि दोनों प्रक्रियाएँ ऊर्जा की दृष्टि से संभव हैं।

13.27 तीव्र न्यूट्रॉनों द्वारा ${}^{238}_{92}\mathrm{U}$ के विखंडन पर विचार कीजिए। किसी विखंडन प्रक्रिया में प्राथमिक अंशों (Primary fragments) के बीटा-क्षय के पश्चात कोई न्यूट्रॉन उत्सर्जित नहीं होता तथा

$^{140}_{58}Ce$ तथा $^{99}_{44}Ru$ अंतिम उत्पाद प्राप्त होते हैं। विखंडन प्रक्रिया के लिए Q के मान का परिकलन कीजिए। आवश्यक आँकड़े इस प्रकार हैं :

$m(^{238}_{92}U)$ =238.05079 u

$m(^{140}_{58}Ce)$ =139.90543 u

$m(^{99}_{44}Ru)$ = 98.90594 u

13.28 D-T अभिक्रिया (ड्यूटीरियम-ट्रीटियम संलयन), $^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + n$ पर विचार कीजिए।

(a) नीचे दिए गए आँकड़ों के आधार पर अभिक्रिया में विमुक्त ऊर्जा का मान MeV में ज्ञात कीजिए।

$m(^{2}_{1}H)$ =2.014102 u

$m(^{3}_{1}H)$ =3.016049 u

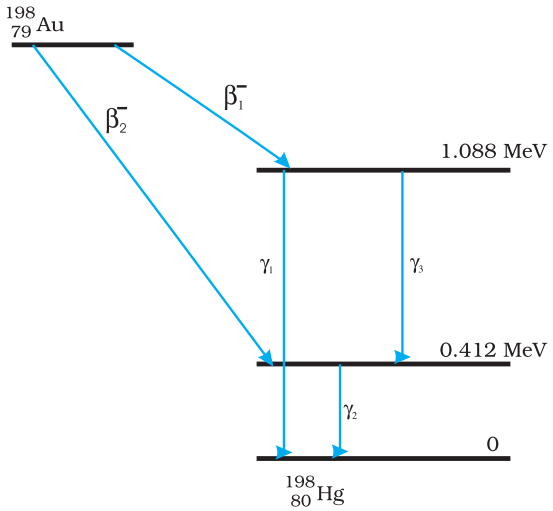
(b) ड्यूटीरियम एवं ट्राइटियम दोनों की त्रिज्या लगभग 1.5 fm मान लीजिए। इस अभिक्रिया में, दोनों नाभिकों के मध्य कूलॉम प्रतिकर्षण से पार पाने के लिए कितनी गतिज ऊर्जा की आवश्यकता है? अभिक्रिया प्रारंभ करने के लिए गैसों (D तथा T गैसें) को किस ताप तक ऊष्मित किया जाना चाहिए?

(**संकेत :** किसी संलयन क्रिया के लिए आवश्यक गतिज ऊर्जा = संलयन क्रिया में संलग्न कणों की औसत तापीय गतिज ऊर्जा = 2 $(3kT/2)$; k : बोल्ट्ज़मान नियतांक तथा T = परम ताप)

13.29 नीचे दी गई क्षय-योजना में, γ-क्षयों की विकिरण आवृत्तियाँ एवं β-कणों की अधिकतम गतिज ऊर्जाएँ ज्ञात कीजिए। दिया है :

$m(^{198}Au)$ = 197.968233 u

$m(^{198}Hg)$ =197.966760 u



चित्र 13.6

13.30 सूर्य के अभ्यंतर में (a) 1 kg हाइड्रोजन के संलयन के समय विमुक्त ऊर्जा का परिकलन कीजिए। (b) विखंडन रिएक्टर में 1.0 kg ^{235}U के विखंडन में विमुक्त ऊर्जा का परिकलन कीजिए। (c) तथा (b) प्रश्नों में विमुक्त ऊर्जाओं की तुलना कीजिए।

13.31 मान लीजिए कि भारत का लक्ष्य 2020 तक 200,000 MW विद्युत शक्ति जनन का है। इसका 10% नाभिकीय शक्ति संयंत्रों से प्राप्त होना है। माना कि रिएक्टर की औसत उपयोग दक्षता (ऊष्मा को विद्युत में परिवर्तित करने की क्षमता) 25% है। 2020 के अंत तक हमारे देश को प्रति वर्ष कितने विखंडनीय यूरेनियम की आवश्यकता होगी। ^{235}U प्रति विखंडन उत्सर्जित ऊर्जा 200 MeV है।

अध्याय 14

अर्धचालक इलेक्ट्रॉनिकी– पदार्थ, युक्तियाँ तथा सरल परिपथ

14.1 भूमिका

ऐसी युक्तियाँ जिनमें इलेक्ट्रॉनों का नियंत्रित प्रवाह प्राप्त किया जा सके, सभी इलेक्ट्रॉनिक परिपथों की मूलभूत *रचना खंड* होती हैं। सन् 1948 में ट्रांजिस्टर की खोज से पहले ऐसी युक्तियाँ अधिकांशत: निर्वात नलिकाएँ (या वाल्व) थीं, जैसे निर्वात डायोड जिसमें दो इलेक्ट्रोड; एनोड (प्लेट) तथा कैथोड होते हैं; ट्रायोड जिसमें तीन इलेक्ट्रोड–कैथोड, प्लेट तथा ग्रिड होते हैं; टेट्रोड तथा पेंटोड (क्रमश: 4 तथा 5 इलेक्ट्रोडों के साथ)। किसी निर्वात नलिका में इलेक्ट्रॉनों की आपूर्ति एक तप्त कैथोड द्वारा की जाती है तथा इसके विभिन्न इलेक्ट्रोडों के बीच वोल्टता को परिवर्तित करके *निर्वात* में इन इलेक्ट्रॉनों का नियंत्रित प्रवाह प्राप्त किया जाता है। अंतरा-इलेक्ट्रोडी स्थान (inter-electrode space) में इलेक्ट्रॉनों के प्रवाह के लिए निर्वात आवश्यक होता है, अन्यथा गतिमान इलेक्ट्रॉन अपने पथ में वायु के अणुओं से टकराकर अपनी ऊर्जा खो सकते हैं। इन युक्तियों में इलेक्ट्रॉन केवल कैथोड से एनोड की ओर प्रवाहित कर सकते हैं (अर्थात इलेक्ट्रॉन केवल एक ही दिशा में प्रवाहित हो सकते हैं)। यही कारण है कि ऐसी युक्तियों को साधारणतया *वाल्व* कहते हैं। निर्वात नलिकाओं से बनी युक्तियाँ आकार में बड़ी होती हैं, अधिक शक्ति का उपभोग करती हैं तथा प्रचालन में सामान्यत: उच्च वोल्टता (~100 V) की आवश्यकता होती है। इसके साथ ही इनका जीवनकाल अपेक्षाकृत कम तथा विश्वसनीयता भी कम होती है। आधुनिक *ठोस-अवस्था अर्धचालक इलेक्ट्रॉनिकी* (Solid State semi-conductor electronics) का प्रादुर्भाव सन् 1930 में इस आभास से किया गया कि कुछ ठोस अवस्था अर्धचालक तथा उनकी संधियों में यह संभावना होती है कि उनमें आवेश वाहकों की संख्या तथा उनके प्रवाह की दिशा को नियंत्रित किया जा सकता है। प्रकाश, ऊष्मा तथा अल्प अनुप्रयुक्त वोल्टता जैसे उत्तेजक किसी अर्धचालक

में गतिमान आवेशों की संख्या परिवर्तित कर सकते हैं। ध्यान देने योग्य बात यह है कि अर्धचालक युक्तियों में आवेश वाहकों की आपूर्ति तथा प्रवाह *स्वयं ठोस के भीतर* ही होता है, जबकि पहले प्रयोग होने वाली निर्वात नलिकाओं/वाल्वों में गतिमान इलेक्ट्रॉनों को तप्त कैथोड से प्राप्त किया जाता था तथा *निर्वातित* स्थानों अथवा निर्वात में प्रवाहित कराया जाता था। अर्धचालक युक्तियों में बाहरी तापन अथवा अधिक निर्वातित स्थान की आवश्यकता नहीं होती है। यह आकार में छोटी होती हैं, कम शक्ति का उपभोग करती हैं, कम वोल्टता पर काम करती हैं, इनका जीवन लंबा होता है और इनकी विश्वसनीयता अच्छी होती है। आधुनिक युक्तियों में तो निर्वातित नलिकाओं के सिद्धांत पर कार्य करने वाली कैथोड किरण ट्यूबों (CRT) जिनका उपयोग टेलीविज़न सेटों तथा कंप्यूटर मॉनीटरों में किया जाता है, ठोसावस्था इलेक्ट्रॉनिकी (Solid State electrons) परिपथों के साथ संलग्न लिक्वड क्रिस्टल डिसप्ले (LCD, द्रव क्रिस्टल प्रदर्श) मॉनीटरों द्वारा प्रतिस्थापित की जा रही हैं। अर्धचालक युक्तियों को औपचारिक रूप से समझे जाने से भी बहुत पहले प्रकृति में पाए जाने वाले *गैलेना* (लैड सल्फाइड PbS) के एक क्रिस्टल जिसके साथ धातु का एक संपर्क बिंदु संयोजित था, का उपयोग रेडियो तरंगों के *संसूचक* के रूप में किया जा चुका था।

निम्नलिखित अनुभागों में हम अर्धचालक भौतिकी की कुछ मूल अवधारणाओं से परिचय कराएँगे तथा संधि डायोड (Junction diode) (2-इलेक्ट्रोडों की युक्ति) तथा द्विध्रुवीय संधि (Bipolar junction) ट्रांजिस्टर (3-इलेक्ट्रोडों की युक्ति) जैसी कुछ अर्धचालक युक्तियों की चर्चा करेंगे। इन युक्तियों के अनुप्रयोगों को दर्शाने वाले कुछ परिपथों का वर्णन भी करेंगे।

14.2 धातुओं, चालकों तथा अर्धचालकों का वर्गीकरण

चालकता के आधार पर

विद्युत चालकता (σ) अथवा प्रतिरोधकता ($\rho = 1/\sigma$) के सापेक्ष मान के आधार पर ठोस पदार्थों का निम्न प्रकार से वर्गीकरण किया जाता है :

(i) ***धातु*** : इनकी प्रतिरोधकता बहुत कम (अथवा चालकता बहुत अधिक) होती है।

$\rho \sim 10^{-2} - 10^{-8}\ \Omega\ m$
$\sigma \sim 10^{2} - 10^{8}\ S\ m^{-1}$

(ii) ***अर्धचालक*** : इनकी प्रतिरोधकता या चालकता धातुओं तथा विद्युतरोधी पदार्थों के बीच की होती है।

$\rho \sim 10^{-5} - 10^{6}\ \Omega\ m$
$\sigma \sim 10^{5} - 10^{-6}\ S\ m^{-1}$

(iii) ***विद्युतरोधी*** : इनकी प्रतिरोधकता बहुत अधिक (अथवा चालकता बहुत कम) होती है।

$\rho \sim 10^{11} - 10^{19}\ \Omega\ m$
$\sigma \sim 10^{-11} - 10^{-19}\ S\ m^{-1}$

ऊपर दिए गए ρ तथा σ के मान केवल कोटि मान के सूचक हैं और दिए गए परिसर के बाहर भी जा सकते हैं। धातु, विद्युतरोधी पदार्थ तथा अर्धचालकों के बीच भेद करने के लिए प्रतिरोधकता का सापेक्ष मान ही मात्र एक मापदंड नहीं है। कुछ दूसरे अंतर भी हैं, जो जैसे-जैसे हम इस अध्याय में आगे बढ़ेंगे, स्पष्ट होते जाएँगे।

इस अध्याय में हमारी रुचि अर्धचालकों के अध्ययन में है जो कई प्रकार के हो सकते हैं।

(i) *तात्विक अर्धचालक* (Elemental semiconductors) – Si और Ge

(ii) *यौगिक अर्धचालक – उदाहरण हैं :*

- अकार्बनिक – CdS, GaAs, CdSe, InP, आदि।
- कार्बनिक – एंथ्रासीन, मादित (Doped) थैलोस्यानीस, आदि।
- कार्बनिक बहुलक (Organic polymers) – पॉलीपाइरोल, पॉलीऐनिलीन, पॉलीथायोफ़ीन आदि।

आजकल उपलब्ध अधिकांश अर्धचालक युक्तियाँ तात्विक अर्धचालक Si या Ge और यौगिक *अकार्बनिक* अर्धचालकों पर ही आधारित हैं। परंतु सन् 1990 के बाद कार्बनिक अर्धचालक और अर्धचालकी बहुलकों का उपयोग करके कुछ अर्धचालकी युक्तियों का विकास हुआ जिससे भविष्य के लिए बहुलक इलेक्ट्रॉनिकी तथा आण्विक इलेक्ट्रॉनिकी की प्रौद्योगिकी के प्रादुर्भाव के संकेत मिलते हैं। इस अध्याय में हम केवल अकार्बनिक अर्धचालक, विशेषकर तात्विक अर्धचालकों Si तथा Ge के अध्ययन तक ही सीमित रहेंगे। तात्विक अर्धचालकों की विवेचना के लिए यहाँ जिन सामान्य अवधारणाओं को प्रस्तावित किया गया है वे किसी-न-किसी रूप में अधिकांश यौगिक अर्धचालकों पर लागू होती हैं।

ऊर्जा बैंड के आधार पर

बोर परमाणु मॉडल के अनुसार किसी *वियुक्त परमाणु* में उसके किसी इलेक्ट्रॉन की ऊर्जा उस इलेक्ट्रॉन की परिभ्रमण कक्षा पर निर्भर करती है। परंतु जब परमाणु एक-दूसरे के निकट आकर कोई ठोस बना लेते हैं तो वे एक-दूसरे के अत्यधिक निकट हो जाते हैं। अत: निकटस्थ परमाणुओं के इलेक्ट्रॉनों की बाह्य कक्षाएँ अत्यधिक पास-पास आ जाती हैं और यहाँ तक कि एक-दूसरे को ढक लेती हैं। इसके परिणामस्वरूप किसी ठोस में इलेक्ट्रॉन की गति की प्रकृति किसी वियुक्त परमाणु के इलेक्ट्रॉन की गति से अत्यधिक भिन्न हो जाती है।

किसी क्रिस्टल के भीतर प्रत्येक इलेक्ट्रॉन की अपनी अद्वितीय स्थिति होती है तथा किन्हीं दो इलेक्ट्रॉनों के चारों ओर के आवेशों का पैटर्न यथार्थ रूप में एक जैसा नहीं होता। यही कारण है कि प्रत्येक इलेक्ट्रॉन के *ऊर्जा स्तर* भिन्न होते हैं। ये भिन्न ऊर्जा स्तर जिनमें ऊर्जा का संतत परिवर्तन होता रहता है *ऊर्जा बैंडों* का निर्माण करते हैं। वह ऊर्जा स्तर जिसमें संयोजकता इलेक्ट्रॉनों के ऊर्जा स्तर समाविष्ट हैं, संयोजकता बैंड (Valance band) कहलाता है। संयोजकता बैंड के ऊपर स्थित बैंड को *चालन बैंड* (Conduction band) कहते हैं। बिना किसी अतिरिक्त ऊर्जा के, सभी संयोजकता इलेक्ट्रॉन संयोजकता बैंड में रहते हैं। यदि चालन बैंड में निम्नतम स्तर चालन बैंड के उच्चतम स्तर से भी नीचे है तो संयोजकता बैंड के इलेक्ट्रॉन आसानी से चालन बैंड में गमन कर सकते हैं। सामान्यत: चालन बैंड रिक्त होता है। परंतु जब यह बैंड संयोजकता बैंड को अतिव्यापित (ढकता) करता है तो इलेक्ट्रॉन स्वतंत्रतापूर्वक इसके भीतर जा सकते हैं। ऐसा धात्विक चालकों में होता है।

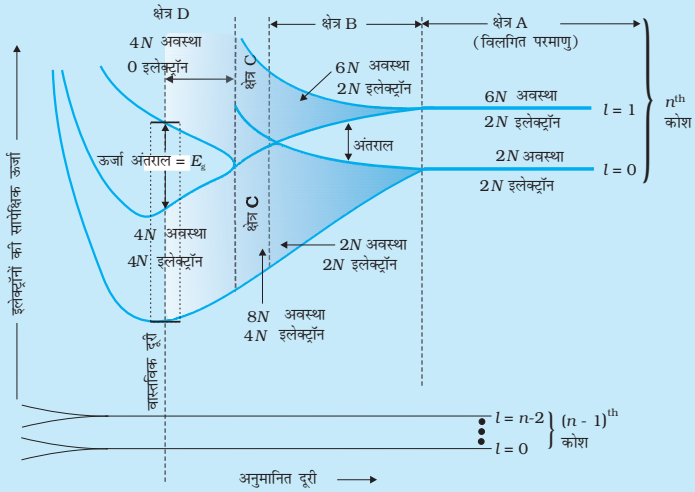
यदि चालन बैंड तथा संयोजकता बैंड के बीच कोई रिक्ति (अंतराल) है, तो संयोजकता बैंड के सभी इलेक्ट्रॉन परिबद्ध होते हैं तथा चालन बैंड में कोई मुक्त इलेक्ट्रॉन उपलब्ध नहीं होता। यह पदार्थ को विद्युतरोधी बना देता है। परंतु संयोजकता बैंड के कुछ इलेक्ट्रॉन बाह्य ऊर्जा प्राप्त करके संयोजकता बैंड तथा चालन बैंड के बीच की रिक्ति को पार कर सकते हैं। तब ये इलेक्ट्रॉन चालन बैंड में पहुँच जाते हैं तथा संयोजकता बैंड में रिक्त ऊर्जा स्तर उत्पन्न कर देते हैं जिनमें अन्य इलेक्ट्रॉन जा सकते हैं। इस प्रकार यह प्रक्रिया चालन बैंड में इलेक्ट्रॉनों तथा संयोजकता बैंड में रिक्तिकाएँ होने के कारण चालन की संभावना उत्पन्न करती है।

आइए, अब हम यह विचार करें कि N परमाणुओं वाले Si अथवा Ge क्रिस्टल के प्रकरण में क्या होता है। Si में बाह्यतम कक्षा, तीसरी कक्षा ($n = 3$) होती है, जबकि Ge में बाह्यतम कक्षा चौथी कक्षा ($n = 4$) होती है। इनकी बाह्यतम कक्षा में 4 इलेक्ट्रॉन ($2s$ और $2p$ इलेक्ट्रॉन) होते हैं। अत: इस क्रिस्टल में बाह्य इलेक्ट्रॉनों की कुल संख्या $4N$ हुई। किसी बाह्यतम कक्षा में अधिकतम इलेक्ट्रॉनों की संख्या 8 ($2s + 6p$ इलेक्ट्रॉन) होती है। अत: $4N$ संयोजकता इलेक्ट्रॉनों के लिए उपलब्ध ऊर्जा स्तर $8N$ है। ये $8N$ विविक्त ऊर्जा स्तर या तो कोई संतत बैंड बना सकते हैं अथवा इनका भिन्न बैंडों में समूहन हो सकता है, जो क्रिस्टल में परमाणुओं के बीच दूरियों पर निर्भर करता है ['ठोसों का बैंड सिद्धांत' – बॉक्स देखिए]।

Si तथा Ge के क्रिस्टल जालकों में परमाणुओं के बीच की दूरियों पर, इन $8N$ स्तरों का ऊर्जा बैंड दो भागों में टूट जाता है, जिनके बीच *ऊर्जा अंतराल* E_g (चित्र 14.1) का पृथकन होता है।

तापक्रम के परम शून्य पर $4N$ संयोजकता इलेक्ट्रॉनों से पूर्णत: घिरा निम्न बैंड *संयोजकता* बैंड होता है। अन्य बैंड जिनमें $4N$ ऊर्जा स्तर होते हैं उन्हें *चालन बैंड* कहते हैं, तथा यह परम शून्य पर पूर्णत: रिक्त होता है।

ठोसों का बैंड सिद्धांत



मान लीजिए कि Si या Ge क्रिस्टल में N परमाणु हैं। प्रत्येक परमाणु के इलेक्ट्रॉनों की विभिन्न कक्षाओं में विविक्त ऊर्जाएँ होंगी। यदि सभी परमाणु *विलगित* हों, अर्थात एक-दूसरे से अधिक अंतराल पर हों, तो इलेक्ट्रॉन ऊर्जाएँ वही रहेंगी। परंतु एक क्रिस्टल में परमाणु एक-दूसरे के बहुत निकट (2 से 3 Å) होते हैं और इसलिए इलेक्ट्रॉन एक-दूसरे से और निकटवर्ती परमाणु क्रोडों से भी पारस्परिक क्रिया करते हैं। सबसे बाहरी कक्षा के इलेक्ट्रॉन इस अतिव्यापन (या पारस्परिक क्रिया) को सर्वाधिक अनुभव करते हैं, जबकि भीतरी कक्षा या क्रोड़ के इलेक्ट्रॉनों की ऊर्जाएँ अप्रभावित रह सकती हैं। इसलिए Si या Ge क्रिस्टल में इलेक्ट्रॉन ऊर्जाओं को समझने के लिए हमें केवल बाह्यतम कक्षा के इलेक्ट्रॉनों की ऊर्जाओं में अंतर पर विचार करने की ही आवश्यकता है। Si के लिए बाह्यतम कक्षा तीसरी कक्षा है ($n = 3$) जबकि Ge के लिए बाह्यतम कक्षा चौथी कक्षा है ($n = 4$)। इन दोनों तत्वों की बाह्यतम कक्षा में इलेक्ट्रॉनों की संख्या 4 है ($2s$ और $2p$ इलेक्ट्रॉन)। इसलिए क्रिस्टल में बाहरी इलेक्ट्रॉनों की संपूर्ण संख्या $4N$ हो गई। बाह्यतम कक्षा में इलेक्ट्रॉनों की अधिकतम संभव संख्या 8 है ($2s + 6p$ इलेक्ट्रॉन)। इसलिए $4N$ इलेक्ट्रॉनों में से $2N$ इलेक्ट्रॉन तो, $2N$ *s-अवस्था* (कक्षीय क्वांटम संख्या $l = 0$) में होंगे और शेष $2N$ इलेक्ट्रॉन प्राप्य $6N$ प्राप्य *p-अवस्था* में होंगे। स्पष्टतया, कुछ p – इलेक्ट्रॉन अवस्थाएँ रिक्त होंगी जैसा चित्र के सबसे दाहिने भाग में दिखाया गया है। यह पर्याप्त रूप से पृथक्कृत या एकल परमाणुओं की स्थिति है (चित्र का क्षेत्र A)।

मान लीजिए कि यह परमाणु एक ठोस बनाने के लिए एक-दूसरे के और निकट आना आरंभ करते हैं। विभिन्न परमाणुओं के इलेक्ट्रॉनों के बीच पारस्परिक क्रिया के कारण बाह्यतम कक्षा के इन इलेक्ट्रॉनों की ऊर्जाएँ परिवर्तित हो सकती हैं (बढ़ या घट सकती हैं)। $l = 1$ की $6N$ अवस्थाएँ, जिनकी ऊर्जाएँ प्रारंभ में वियुक्त परमाणुओं के लिए सर्वसम थीं, अब फैलकर एक *ऊर्जा बैंड* बनाती हैं [चित्र में क्षेत्र B]। इसी प्रकार $l = 0$ की $2N$ अवस्थाएँ, जिनकी ऊर्जाएँ वियुक्त परमाणुओं के लिए सर्वसम थीं, वह भी एक अन्य *ऊर्जा बैंड* में टूट जाती हैं [चित्र के क्षेत्र B को सावधानीपूर्वक देखें]। यह बैंड पहले बैंड से एक *ऊर्जा अंतराल* द्वारा पृथक रहता है।

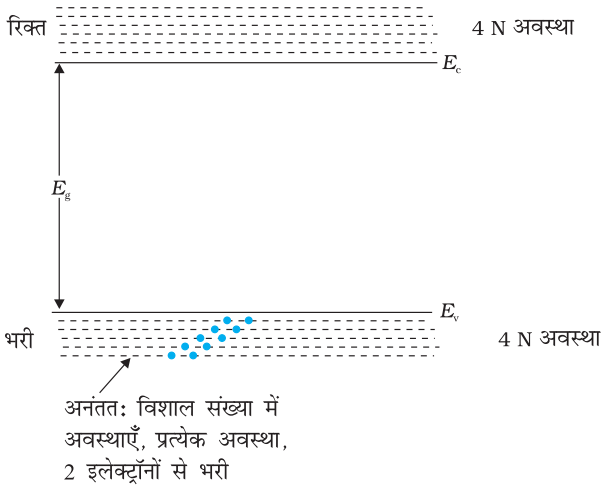
परमाणुओं के बीच इससे भी कम पृथकन होने पर, तथापि, एक ऐसा क्षेत्र आता है जब यह बैंड एक-दूसरे में विलय कर जाते हैं। ऊपरी परमाण्वीय ऊर्जा स्तर की सबसे निचली ऊर्जा अवस्था नीचे वाले परमाण्वीय ऊर्जा स्तर की सबसे ऊपरी अवस्था के भी नीचे चली जाती है। इस क्षेत्र में (चित्र में क्षेत्र C), *कोई ऊर्जा अंतराल नहीं रहता और ऊपरी तथा निचली ऊर्जा अवस्थाएँ मिश्रित हो जाती हैं।*

अंतत:, यदि परमाणुओं के बीच की दूरी और कम हो जाती है, तो ऊर्जा बैंड फिर से विभक्त हो जाते हैं और एक *ऊर्जा अंतराल* E_g से पृथक हो जाते हैं (चित्र में क्षेत्र D देखें)। प्राप्य ऊर्जा अवस्थाओं की संपूर्ण संख्या $8N$ को फिर से दो बैंडों के बीच बाँट दिया गया है (निचले और ऊपरी ऊर्जा बैंडों में से प्रत्येक में $4N$ अवस्थाएँ)। यहाँ सार्थक बात यह है कि निचले बैंड में ठीक उतनी ही अवस्थाएँ ($4N$) हैं, जितने परमाणुओं में से प्राप्य संयोजकता इलेक्ट्रॉन ($4N$) हैं।

इसलिए यह बैंड (जो *संयोजकता बैंड* कहलाता है) पूर्णत: भरा हुआ है, जबकि ऊपरी बैंड पूर्णत: खाली है। ऊपरी बैंड को *चालन बैंड* कहते हैं।

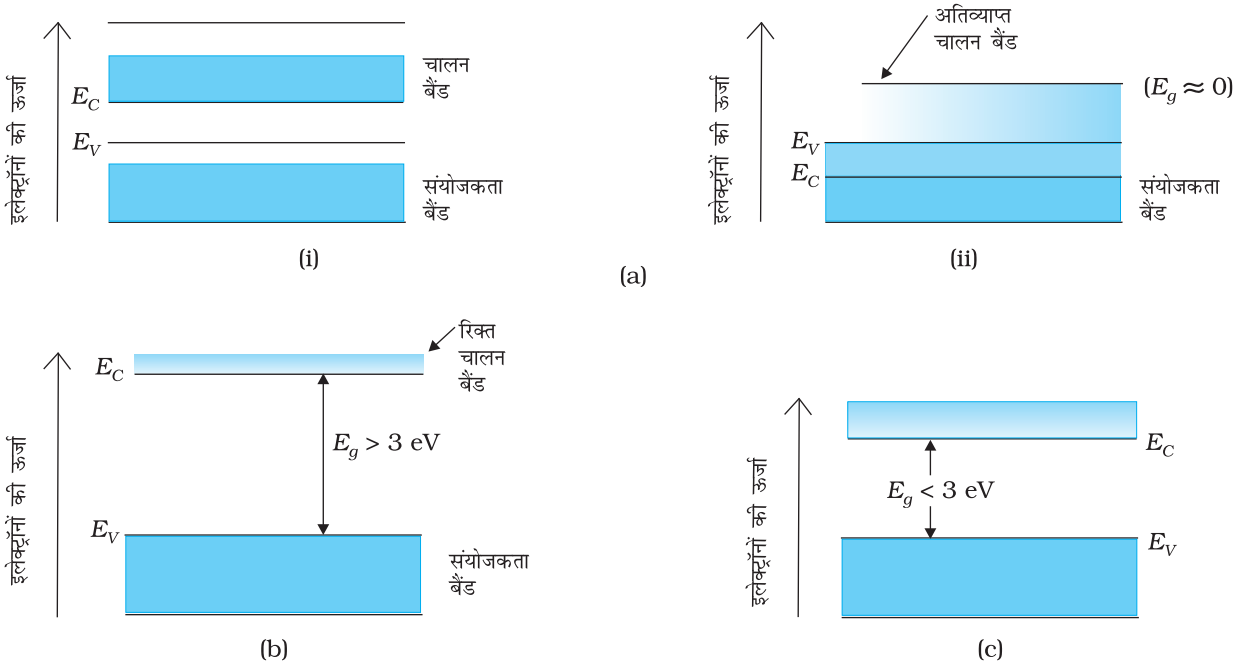
चित्र 14.1 देखिए। इसमें चालन बैंड में निम्नतम ऊर्जा स्तर को E_C के रूप में तथा संयोजकता बैंड में उच्चतम ऊर्जा स्तर को E_V के रूप में दर्शाया गया है। E_C के ऊपर तथा E_V के नीचे इसमें एक-दूसरे के अत्यधिक निकट बहुत से ऊर्जा स्तर दर्शाए गए हैं।

संयोजकता बैंड के शीर्ष तथा चालन बैंड की तली के बीच के अंतराल को *ऊर्जा बैंड अंतराल* (अथवा ऊर्जा अंतराल, E_g) कहते हैं। यह अंतराल पदार्थ की प्रकृति पर निर्भर करता है। यह अधिक, कम अथवा शून्य हो सकता है। इन विभिन्न स्थितियों को चित्र 14.2 में दर्शाया गया है तथा नीचे इनकी विवेचना की गई है।



चित्र 14.1 0 K पर किसी अर्धचालक में ऊर्जा बैंड की स्थितियाँ, ऊपरी बैंड जिसे चालन बैंड कहते हैं, में अनंततः विशाल संख्या में, अत्यधिक निकट ऊर्जा अवस्थाएँ होती हैं। निचला बैंड जिसे संयोजकता बैंड कहते हैं, में अत्यधिक निकट पूर्णतः भरी ऊर्जा अवस्थाएँ होती हैं।

प्रकरण I : यह चित्र 14.2(a) में दर्शायी गई स्थिति के संदर्भ में है। यह एक धातु की स्थिति है जिसमें चालन बैंड आंशिक रूप से भरा है तथा संयोजकता बैंड आंशिक रूप से रिक्त है अथवा चालन बैंड तथा संयोजकता बैंड अतिव्याप्त हैं। जब अतिव्यापन होता है तो संयोजकता बैंड से इलेक्ट्रॉन सरलता से चालन बैंड में जा सकते हैं। यह स्थिति विद्युत चालन के लिए अत्यधिक संख्या में इलेक्ट्रॉन उपलब्ध करा देती है। जब संयोजकता बैंड आंशिक रूप से रिक्त होता है तो इलेक्ट्रॉन इसके निम्न स्तर से उच्च स्तर तक गति करके विद्युत चालन को संभव बना देते हैं। इसीलिए इस प्रकार के पदार्थों का प्रतिरोध कम अथवा चालकता उच्च होती है।



चित्र 14.2 (a) धातुओं, (b) विद्युतरोधी तथा (c) अर्धचालकों के ऊर्जा बैंडों के बीच अंतर।

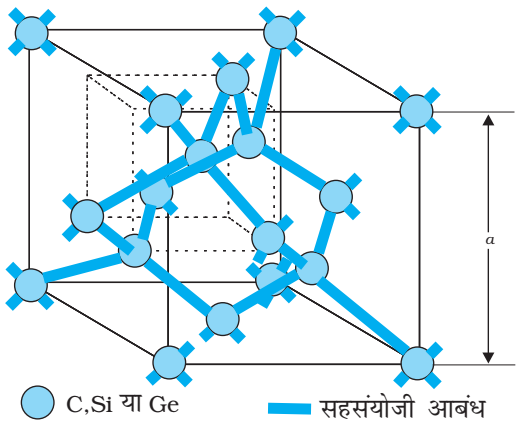
प्रकरण II : इस प्रकरण में जैसा कि चित्र 14.2(b) में दर्शाया गया है, इस स्थिति में बैंड अंतराल E_g अधिक होता है ($E_g > 3$ eV) । चालन बैंड में कोई इलेक्ट्रॉन नहीं होते। अत: कोई विद्युत चालन संभव नहीं होता। ध्यान देने योग्य बात यह है कि ऊर्जा अंतराल इतना अधिक होता है कि किसी भी तापीय उत्तेजन से इलेक्ट्रॉनों को संयोजकता बैंड से चालन बैंड की ओर उत्तेजित नहीं किया जा सकता। यह *विद्युतरोधी* पदार्थों का उदाहरण है।

प्रकरण III : यह स्थिति 14.2(c) में दर्शायी गई है। इसमें एक परिमित परंतु लघु बैंड अंतराल ($E_g < 3$ eV) होता है। लघु बैंड अंतराल होने के कारण, कमरे के ताप पर, कुछ इलेक्ट्रॉन संयोजकता बैंड में इतनी ऊर्जा अर्जित कर लेते हैं कि ऊर्जा अंतराल को पार करके *चालन* बैंड में पहुँच सकते हैं। ये इलेक्ट्रॉन (यद्यपि संख्या में कम होते हैं) चालन बैंड में गति कर सकते हैं। अत: *अर्धचालकों* का प्रतिरोध उतना अधिक नहीं होता जितना विद्युतरोधी पदार्थों का होता है।

इस अनुभाग में हमने धातुओं, चालकों तथा अर्धचालकों का व्यापक वर्गीकरण किया है। अगले अनुभाग में हम अर्धचालकों में चालन प्रक्रिया के विषय में सीखेंगे।

14.3 नैज अर्धचालक

हम Ge और Si का सबसे साधारण उदाहरण लेंगे जिनकी जालक (Lattice) रचना चित्र 14.3 में दिखाई गई है। इन रचनाओं को हीरे जैसी रचना कहते हैं। प्रत्येक परमाणु चार अन्य निकटतम परमाणुओं द्वारा घिरा होता है। हम जानते हैं कि Si और Ge में चार संयोजकता इलेक्ट्रॉन होते हैं। इसकी क्रिस्टलीय रचना में प्रत्येक Si या Ge परमाणु अपने चार संयोजकता इलेक्ट्रॉनों में से एक-एक इलेक्ट्रॉन को अपने चार निकटतम परमाणुओं के साथ *सहभागिता* कराने की प्रवृत्ति रखता है तथा ऐसे प्रत्येक निकटवर्ती परमाणु के एक इलेक्ट्रॉन का *सहभाग* भी करता है। यही सहभागी इलेक्ट्रॉन *युगल सहसंयोजी बंध* (Covalent bond) या *संयोजकता आबंध* (Valence bond) कहलाते हैं। ऐसा माना जा सकता है कि दोनों सहभाजित इलेक्ट्रॉन उन संबंधित परमाणुओं के बीच आगे-पीछे गति करते रहते हैं, जिससे वे दृढ़ता से बँधे होते हैं। चित्र 14.3 में दिखाई गई Si या Ge की संरचना का 2-विमीय निरूपण चित्र 14.4 में व्यवस्थात्मक रूप से दिखाया गया है, जो सहसंयोजी बंध पर अत्यधिक बल देता है। चित्र 14.4 एक आदर्श चित्रण है जिसमें बँध टूटे नहीं हैं (सभी बँध बने हुए हैं)। ऐसी स्थिति निम्न ताप पर ही बनती है। जैसे-जैसे ताप बढ़ता है, इन इलेक्ट्रॉनों को और ऊष्मीय ऊर्जा प्राप्त होने लगती है जिससे इनमें से कुछ इलेक्ट्रॉन टूट कर अलग हो सकते हैं (*मुक्त* इलेक्ट्रॉन बनकर चालन में योगदान करते हैं)। ऊष्मीय ऊर्जा क्रिस्टलीय जालक के कुछ परमाणुओं को प्रभावी रूप से आयनीकृत कर देती है तथा बँध में एक *रिक्त स्थान* बना देती है, जैसा चित्र 14.5 (a) में दिखाया गया है। मुक्त इलेक्ट्रॉन (आवेश $-q$) जहाँ से निकलकर आया है, वहाँ वह प्रभावी आवेश ($+q$) का एक रिक्त स्थान छोड़ देता है। प्रभावी धनात्मक आवेश वाला यह *रिक्त स्थान* एक *होल* (hole) कहलाता है। होल प्रभावी धनात्मक आवेश वाले एक *आभासी मुक्त कण* की तरह व्यवहार करता है।



चित्र 14.3 कार्बन, सिलिकॉन या जरमेनियम के लिए तीन-विमीय हीरे जैसी क्रिस्टल संरचना जिसमें जालक अंतराल a क्रमश: 3.56, 5.43 और 5.66 Å है।

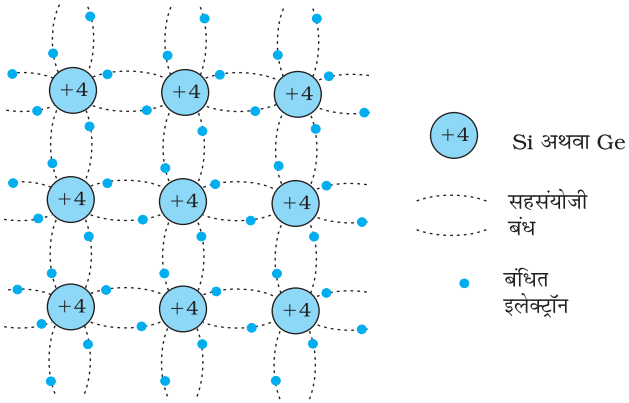
नैज अर्धचालकों (Intrinsic semiconductor) में मुक्त इलेक्ट्रॉनों की संख्या n_e होलों की संख्या, n_h के बराबर होती है, अर्थात

$$n_e = n_h = n_i \qquad (14.1)$$

यहाँ n_i को नैज वाहक सांद्रता कहते हैं।

अर्धचालकों में यह अद्वितीय गुण होता है कि उनमें इलेक्ट्रॉनों के साथ-साथ होल भी गति करते हैं। मान लें कि स्थान 1 पर एक होल है जैसा चित्र 14.5 (a) में दिखाया गया है। होलों की गति को चित्र 14.5 (b) में दिखाए ढंग से दृष्टित किया जा सकता है। नीचे वाले बाईं ओर के

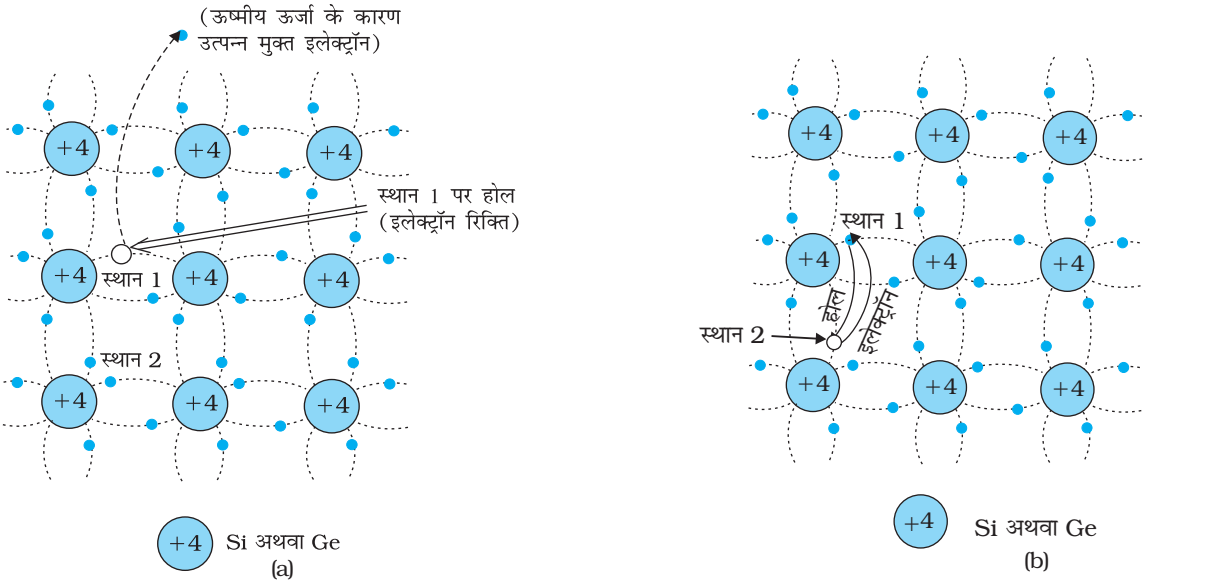
सहसंयोजी बंध स्थान 2 से एक इलेक्ट्रॉन रिक्त स्थान 1 (होल) में कूद कर जा सकता है। इस प्रकार, ऐसी एक कूद के बाद, होल स्थान 2 पर हो गया तथा स्थान 1 में एक इलेक्ट्रॉन आ गया। इसलिए आभासी रूप में तो होल स्थान 1 से स्थान 2 पर चला गया। ध्यान दीजिए कि जो इलेक्ट्रॉन प्रारंभ में मुक्त हुआ था [चित्र 14.5 (a) देखिए], वह होल की गति की इस क्रिया में सम्मिलित नहीं है। मुक्त इलेक्ट्रॉन पूर्णतः स्वतंत्रतापूर्वक चालन इलेक्ट्रॉन के रूप में गति करता है और एक विद्युत क्षेत्र लगाने पर एक इलेक्ट्रॉन धारा (I_e) देता है। स्मरण रहे कि जब कभी क्रिस्टल में कहीं भी एक अपूरित बंध होगा तब *बंधित* इलेक्ट्रॉनों की वास्तविक गति होगी और इसका वर्णन करने के लिए होलों की गति केवल एक सहज उपाय है। किसी वास्तविक क्रिस्टल में विद्युत क्षेत्र की क्रिया के फलस्वरूप यह होल ऋणात्मक विभव की ओर गति करते हैं। इस प्रकार एक होल धारा I_h मिलती है। ऊष्मा से उत्पन्न चालन इलेक्ट्रॉनों के कारण इलेक्ट्रॉन धारा I_e तथा होल धारा I_h का योग संपूर्ण धारा I होगी –



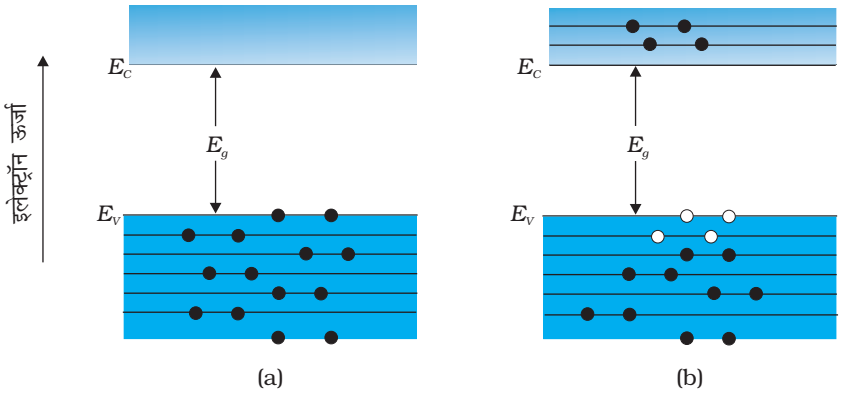
चित्र 14.4 Si या Ge की संरचना का दो-विमीय व्यवस्थात्मक निरूपण जिसमें निम्न ताप पर सहसंयोजी आबंध दिखाए गए हैं (सभी बंध बने हुए, कोई टूटा बंध नहीं)। +4 चिह्न Si या Ge की भीतरी क्रोड़ को इंगित करता है।

$$I = I_e + I_h \qquad (14.2)$$

यहाँ ध्यान देने योग्य बात यह है कि चालन इलेक्ट्रॉनों तथा होलों के उत्पन्न होने के साथ-साथ *पुनःसंयोजन* का प्रक्रम होता है जिसमें इलेक्ट्रॉन होल के साथ *पुनःसंयोजित* होते हैं। साम्यावस्था में आवेश वाहकों के उत्पन्न होने की दर उनके पुनःसंयोजन की दर के बराबर होती है। इस पुनःसंयोजन का कारण इलेक्ट्रॉनों का होलों से संघट्ट करना है।



चित्र 14.5 (a) मध्यम ताप पर ऊष्मीय ऊर्जा के कारण स्थान 1 पर होल तथा चालन इलेक्ट्रॉन के उत्पन्न होने का व्यवस्थापक प्रारूप। (b) किसी होल की संभावित ऊष्मीय गति का सरलीकृत निरूपण। नीचे वाले बाएँ हाथ के सहसंयोजी बंध (स्थान 2) से एक इलेक्ट्रॉन प्रारंभिक होल स्थान 1 पर चला जाता है और अपने स्थान पर एक होल छोड़ता है। इस प्रकार स्थान 1 से स्थान 2 तक होल का आभासी स्थानांतरण इंगित होता है।



चित्र 14.6 (a) $T = 0$ K पर कोई नैज अर्धचालक विद्युतरोधी की भाँति व्यवहार करता है। (b) $T > 0$ K पर चार तापीय उत्पन्न इलेक्ट्रॉन-होल युगल भरे वृत्त (•) इलेक्ट्रॉनों को निरूपित करते हैं तथा रिक्त क्षेत्र (○) होलों को निरूपित करते हैं।

चित्र 14.6(a) में दर्शाए अनुसार $T = 0$ K पर कोई नैज अर्धचालक किसी विद्युतरोधी की भाँति व्यवहार करता है। यह तापीय ऊर्जा ही है जिसके कारण उच्च तापों ($T > 0$ K) पर कुछ इलेक्ट्रॉन उत्तेजित होकर संयोजी बैंड से चालन बैंड में पहुँचते हैं। $T > 0$ K पर तापीय उत्तेजित इलेक्ट्रॉन चालन बैंड में आंशिक रूप से स्थान ग्रहण कर लेते हैं। इसीलिए किसी नैज अर्धचालक का ऊर्जा बैंड आरेख चित्र 14.6(b) में दर्शाए अनुसार होता है। इसमें कुछ इलेक्ट्रॉन चालन बैंड में दर्शाए गए हैं। ये यहाँ पर संयोजी बैंड से आए हैं तथा समान संख्या में वहाँ होल छोड़ आए हैं।

उदाहरण 14.1

उदाहरण 14.1 C, Si तथा Ge की जालक (Lattice) संरचना समान होती है। फिर भी क्यों C विद्युतरोधी है जबकि Si व Ge नैज अर्धचालक (intrinsic semiconductor) हैं?

हल C, Si तथा Ge के परमाणुओं के चार बंधित इलेक्ट्रॉन क्रमशः द्वितीय, तृतीय तथा चतुर्थ कक्षा में होते हैं। अतः इन परमाणुओं से एक इलेक्ट्रॉन को बाहर निकालने के लिए आवश्यक ऊर्जा (आयनिक ऊर्जा E_g) सबसे कम Ge के लिए, इससे अधिक Si के लिए और सबसे अधिक C के लिए होगी। इस प्रकार Ge व Si में विद्युत चालन के लिए स्वतंत्र इलेक्ट्रॉनों की संख्या सार्थक होती है जबकि C में यह नगण्य होती है।

14.4 अपद्रव्यी अर्धचालक

किसी नैज अर्धचालक की चालकता उसके ताप पर निर्भर करती है, परंतु कक्ष-ताप पर इसकी चालकता बहुत कम होती है। इसी रूप में, कोई भी महत्वपूर्ण इलेक्ट्रॉनिक युक्ति उन अर्धचालकों द्वारा विकसित नहीं की जा सकती है। अतः इनकी चालकता में सुधार करना आवश्यक होता है। यह उन अर्धचालकों में अशुद्धियों का उपयोग करके किया जाता है।

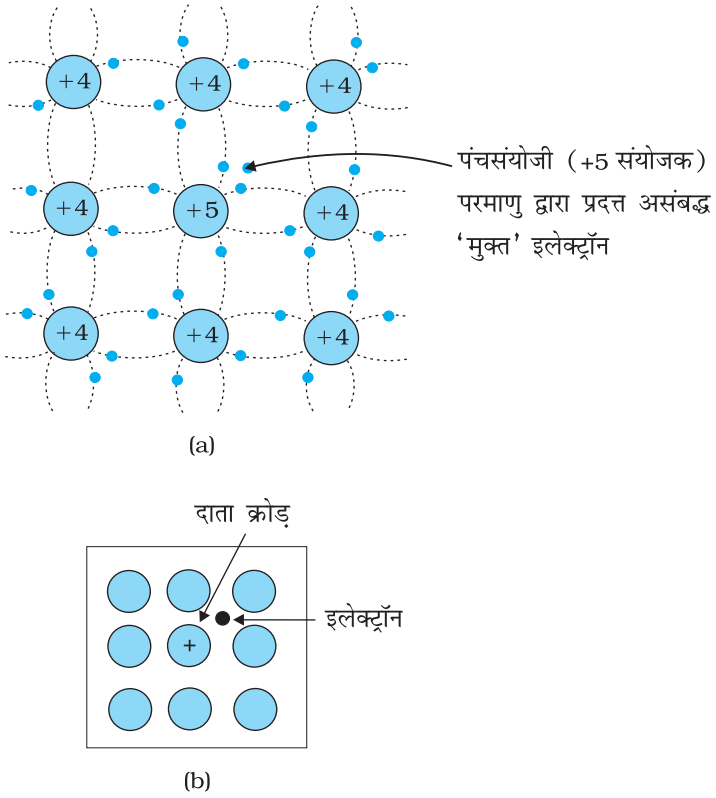
जब किसी शुद्ध अर्धचालक में कोई उपयुक्त अशुद्धि अत्यल्प मात्रा में जैसे कुछ भाग प्रति मिलियन (ppm) में मिलाई जाती है तो उसकी चालकता में कई गुना वृद्धि हो जाती है। इस प्रकार के पदार्थों को *अपद्रव्यी अर्धचालक* (Extrinsic semiconductor) अथवा *अशुद्धि अर्धचालक* (Impurity semiconductor) कहते हैं। वांछित अशुद्धि को सावधानीपूर्वक मिश्रित करना *मादन* (Doping) या *अपमिश्रण* कहलाता है तथा अशुद्धि परमाणु *अपमिश्रक* (Dopants) कहलाते हैं। इस प्रकार के पदार्थ को *मादित* (Doped) *अर्धचालक* कहते हैं। अपमिश्रक ऐसा होना चाहिए जो मूल अर्धचालक पदार्थ के जालक को विकृत न करे। उसे केवल क्रिस्टल में बहुत कम मूल अर्धचालक परमाणु स्थितियों को ही घेरना चाहिए। इसे प्राप्त करने के लिए एक आवश्यक शर्त यह है कि अपमिश्रक के अणु तथा अर्धचालक पदार्थ के अणुओं का साइज़ लगभग समान हो।

चतुः संयोजक Si अथवा Ge के मादन के लिए दो प्रकार के अपमिश्रक उपयोग किए जाते हैं।

(i) पंच संयोजक (संयोजकता 5); जैसे आर्सेनिक (As), ऐंटीमनी (Sb), फ़ॉस्फोरस (P), आदि।

(ii) त्रि संयोजक (संयोजकता 3); जैसे इंडियम (In), बोरॉन (B), ऐलुमिनियम (Al), आदि।

अब हम यह विवेचना करेंगे कि अपमिश्रण द्वारा किस प्रकार अर्धचालकों में आवेश वाहकों की संख्या में परिवर्तन होता है जिसके कारण उस अर्धचालक की चालकता परिवर्तित हो जाती है। Si अथवा Ge आवर्त सारणी के चतुर्थ समूह (वर्ग) के सदस्य हैं इसीलिए हम अपमिश्रण के लिए निकट के तीसरे अथवा पाँचवें वर्ग के तत्व का चयन यह अपेक्षा करते हुए तथा सावधानी बरतते हुए करते हैं कि अपमिश्रण किए जाने वाले तत्व के परमाणु का साइज़ Si अथवा Ge के परमाणु के साइज़ के लगभग बराबर है। रोचक तथ्य यह है कि मादन के लिए उपयोग होने वाले त्रिसंयोजक तथा पंचसंयोजक तत्व अपमिश्रण के पश्चात एक-दूसरे से पूर्णत: भिन्न प्रकार के दो अर्धचालक पदार्थों का निर्माण करते हैं जिनका वर्णन नीचे दिया गया है।



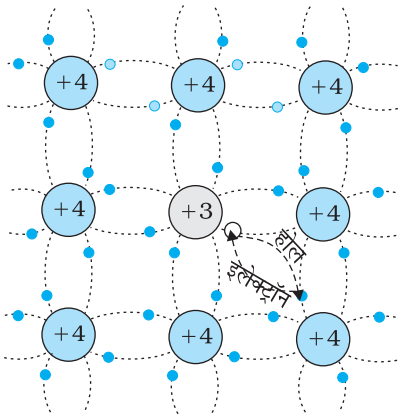
चित्र 14.7 (a) चतुर्थ संयोजी Si या Ge में पंचसंयोजी दाता परमाणु (As, Sb, P, आदि) के अपमिश्रण से बना n-अर्धचालक। (b) n-प्रकार के पदार्थ का साधारणतया प्रयुक्त व्यवस्थात्मक निरूपण जिसमें प्रतिस्थापी दाता के स्थिर क्रोड़ को केवल एक अतिरिक्त प्रभावी धनात्मक आवेश और इससे संबद्ध इलेक्ट्रॉन के साथ दिखाया गया है।

(i) n-प्रकार का अर्धचालक

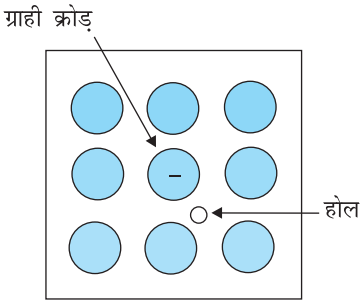
मान लीजिए कि हम Si या Ge (संयोजकता 4) को एक पंचसंयोजक (संयोजकता 5) तत्व से अपमिश्रित करें जैसा चित्र 14.7 में दिखाया गया है। जब +5 संयोजकता वाला तत्व Si के एक परमाणु को प्रतिस्थापित करके अपना स्थान ग्रहण करता है तो इसके इलेक्ट्रॉनों में से चार, निकटवर्ती चार सिलिकॉन परमाणुओं से बंध बनाते हैं, जबकि पाँचवाँ इलेक्ट्रॉन जनक परमाणु से दुर्बल बंध द्वारा जुड़ा रहता है। ऐसा इसलिए है कि पाँचवें इलेक्ट्रॉन के लिए बंध में भाग लेने वाले चारों इलेक्ट्रॉन परमाणु के प्रभावी क्रोड़ के भाग हैं। इसके परिणामस्वरूप इस इलेक्ट्रॉन को मुक्त करने के लिए आवश्यक आयनन ऊर्जा बहुत कम होती है और सामान्य कक्ष ताप पर यह अर्धचालक के जालक में मुक्त गति करने के लिए मुक्त होता है। उदाहरण के लिए, इस इलेक्ट्रॉन को परमाणु से मुक्त करने के लिए जर्मेनियम में ~ 0.01 eV तथा सिलिकॉन में लगभग 0.05 eV ऊर्जा चाहिए। इसके विपरीत किसी नैज अर्धचालक में कक्ष ताप पर किसी इलेक्ट्रॉन को वर्जित बैंड से स्थानांतरण के लिए (जर्मेनियम में लगभग 0.72 eV तथा सिलिकॉन में लगभग 1.1 eV) ऊर्जा चाहिए। इस प्रकार पंचसंयोजक अपमिश्रक विद्युत चालन के लिए एक अतिरिक्त इलेक्ट्रॉन प्रदान करता है और इसीलिए इसे *दाता अशुद्धि* (donor impurity) कहते हैं। अपमिश्रक परमाणु द्वारा विद्युत चालन के लिए उपलब्ध कराए गए इलेक्ट्रॉन की संख्या प्रबल रूप से अपमिश्रण पर निर्भर करती है। यह आसपास के ताप पर निर्भर नहीं करती। इसके विपरीत Si परमाणु द्वारा उत्पन्न मुक्त इलेक्ट्रॉनों की संख्या (समान संख्या में होलों के साथ) में ताप के साथ बहुत कम वृद्धि होती है।

किसी अपमिश्रित अर्धचालक में चालक इलेक्ट्रॉनों की कुल संख्या n_e दाताओं के योगदान तथा निजी कारणों (ऊष्मा द्वारा) से उत्पन्न इलेक्ट्रॉनों के कारण तथा होलों की कुल संख्या n_h केवल निजी स्रोत द्वारा उत्पन्न होलों के कारण होती है। परंतु होलों के पुन:संयोजन की दर में वृद्धि इलेक्ट्रॉनों की संख्या में वृद्धि के कारण हो जाती है। इसके परिणामस्वरूप होलों की संख्या में और कमी हो जाती है।

इस प्रकार अपमिश्रण के उचित स्तर से चालक इलेक्ट्रॉनों की संख्या में होलों की संख्या की



(a)



(b)

चित्र 14.8 (*a*) चतुर्थसंयोजी Si या Ge के जालक में त्रिसंयोजी ग्राही परमाणु (In, Al, B आदि) के अपमिश्रण से बना p - प्रकार का अर्धचालक। (*b*) p - प्रकार के पदार्थ का साधारणतया प्रयुक्त होने वाला व्यवस्थात्मक निरूपण जो एक प्रभावी अतिरिक्त ऋणात्मक आवेश के साथ प्रतिस्थापी ग्राही परमाणु की स्थिर क्रोड़ तथा उससे संबद्ध होल को दिखाता है।

तुलना में वृद्धि की जा सकती है। अत: पंचसंयोजक अपमिश्रक के साथ अपमिश्रण होने पर किसी नैज अर्धचालक में इलेक्ट्रॉन *बहुसंख्यक आवेश वाहक* तथा होल *अल्पांश आवेश वाहक* बन जाते हैं। इसीलिए इस प्रकार के अर्धचालकों को n-*प्रकार के अर्धचालक* कहते हैं। किसी n-प्रकार के अर्धचालक के लिए

$$n_e >> n_h \qquad (14.3)$$

(ii) p-प्रकार के अर्धचालक

p-प्रकार का अर्धचालक तब बनता है जब Si या Ge (चतुर्थसंयोजी) में ग्रुप-III की त्रिसंयोजी अशुद्धियाँ; जैसे- Al, B, In आदि अपमिश्रित की जाती हैं, जैसा चित्र 14.8 में दिखाया गया है। अपमिश्रक में Si या Ge की अपेक्षा एक बाहरी इलेक्ट्रॉन कम होता है और इसलिए यह परमाणु तीन ओर से Si परमाणुओं से बंध बना सकता है, लेकिन चौथी ओर बंध बनाने के लिए आवश्यक इलेक्ट्रॉन उपलब्ध न होने के कारण चौथा बंध बनाने में सफल नहीं हो पाता। अत: त्रिसंयोजक परमाणु तथा चौथे निकटस्थ परमाणु के बीच बंध में एक रिक्ति अथवा होल होता है जिसे चित्र 14.8 में दर्शाया गया है। क्योंकि जालक में पड़ोसी Si परमाणु होल के स्थान पर एक इलेक्ट्रॉन चाहता है, निकट के परमाणु के बाह्य कक्ष का कोई इलेक्ट्रॉन इस रिक्ति को भरने के लिए कूदान भर सकता है जिससे उसके अपने स्थान पर एक होल बन जाता है। यही *होल* चालन के लिए उपलब्ध रहता है। ध्यान देने योग्य बात यह है कि, त्रिसंयोजी विजातीय परमाणु पड़ोसी Si परमाणु के साथ इलेक्ट्रॉन की साझेदारी करके प्रभावत: ऋणात्मक आवेशित हो जाता है, तथा इसके सभी संयोजी बंध पूरे हो जाते हैं। इसलिए साधारण भाषा में प्राय: p –पदार्थ के अपमिश्रक परमाणु को अपने संबद्ध होल के साथ एक *ऋणात्मक आवेश का क्रोड़* कहा जाता है, जैसा चित्र 14.8(b) में दिखाया गया है। यह स्पष्ट है कि एक *ग्राही* परमाणु (N_A) एक *होल* देता है। यह होल नैज जनित होलों के अतिरिक्त है जबकि चालन इलेक्ट्रॉनों का स्रोत केवल नैज जनन ही है। इस प्रकार, ऐसे पदार्थ के लिए, होल बहुसंख्यक वाहक तथा इलेक्ट्रॉन अल्पसंख्यक वाहक हैं। इसीलिए त्रिसंयोजक अशुद्धि से अपमिश्रित नैज अर्धचालक p-*प्रकार के अर्धचालक* कहलाते हैं। p-*प्रकार के अर्धचालकों* में पुन:संयोजन प्रक्रिया, नैज जनित इलेक्ट्रॉनों की संख्या n_i घट कर n_e हो जाती है। अत: *p*-प्रकार के अर्धचालकों के लिए

$$n_h >> n_e \qquad (14.4)$$

ध्यान देने योग्य बात यह है कि *क्रिस्टल एक समग्र ऋणात्मक उदासीनता बनाए रखता है क्योंकि अतिरिक्त आवेश वाहकों पर आवेश की मात्रा जालक में आयनीकृत क्रोड़ों पर आवेश की मात्रा के ही समान एवं विपरीत होती है।*

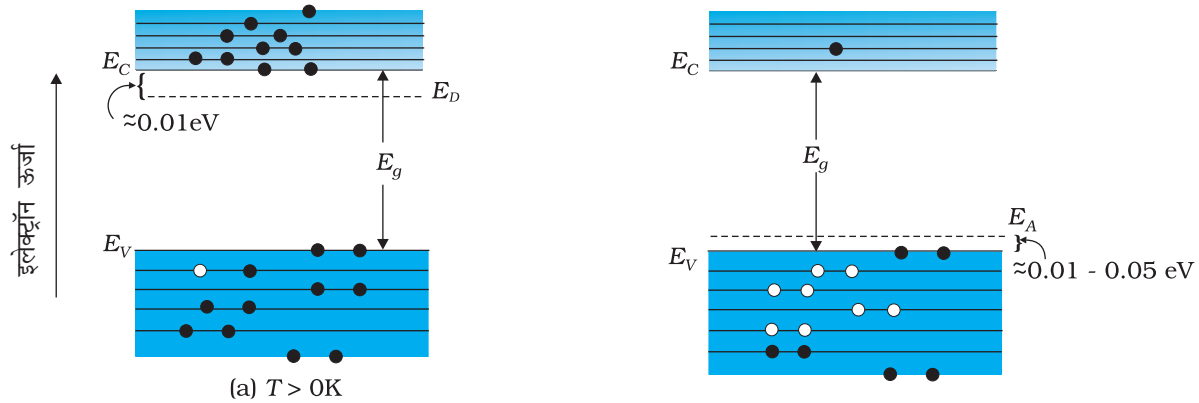
अपद्रव्यी अर्धचालकों में बहुसंख्यक धारा वाहकों की प्रचुरता के कारण तापन द्वारा उत्पन्न अल्पांश वाहकों के लिए बहुसंख्यक वाहकों से मिलने के अधिक अवसर होते हैं और इस प्रकार वे नष्ट हो जाते हैं। इसीलिए अपमिश्रक एक प्रकार के अधिक धारा वाहकों को मिलाने से, जो बहुसंख्यक वाहक बन जाते हैं, अप्रत्यक्ष रूप में अल्पांश वाहकों की नैज सांद्रता को घटाने में सहायता करते हैं।

अपमिश्रण द्वारा अर्धचालकों की ऊर्जा बैंड संरचना प्रभावित होती है। बाह्य अर्धचालकों के प्रकरण में दाता अशुद्धियों के कारण अतिरिक्त ऊर्जा अवस्था (E_D) तथा ग्राही अशुद्धियों के कारण अतिरिक्त ऊर्जा अवस्था (E_A) भी होती है। n-प्रकार के Si अर्धचालकों के ऊर्जा बैंड आरेख में दाता ऊर्जा स्तर E_D चालक बैंड की तली E_C से कुछ नीचे होता है तथा इस स्तर से कुछ इलेक्ट्रॉन बहुत कम ऊर्जा की आपूर्ति होने पर चालन बैंड में प्रवेश कर जाते हैं। कक्ष ताप पर अधिकांश दाता परमाणु

आयनीकृत हो जाते हैं, परंतु Si के अति अल्प ($\sim 10^{-12}$) परमाणु ही आयनीकृत होते हैं। अत: चित्र 14.9(a) में दर्शाए अनुसार चालन बैंड में अधिकांश इलेक्ट्रॉन दाता अशुद्धियों से ही आते हैं। इसी प्रकार p-प्रकार के अर्धचालकों में ग्राही ऊर्जा स्तर E_A संयोजी बैंड के शीर्ष से कुछ ऊपर होता है [चित्र 14.9(b) देखिए]। बहुत कम ऊर्जा आपूर्ति होने पर भी संयोजी बैंड से कोई इलेक्ट्रॉन E_A के स्तर पर कूदान भर लेता है और उसे ग्राही को ऋणात्मक आयनित कर देता है। [विकल्प के रूप में हम इस प्रकार भी कह सकते हैं कि बहुत कम ऊर्जा की आपूर्ति से होल ऊर्जा स्तर E_A से संयोजी बैंड में गमन कर सकता है। ऊर्जा प्राप्त करने पर इलेक्ट्रॉन ऊपर की ओर आते हैं जबकि होल नीचे की ओर आते हैं।] सामान्य कक्ष ताप पर अधिकांश ग्राही परमाणु आयनीकृत हो जाते हैं तथा संयोजी बैंड में होल बच जाते हैं। इस प्रकार कक्ष ताप पर संयोजी बैंड में होलों का घनत्व प्रमुख रूप में अपद्रव्यी अर्धचालकों में अशुद्धि के कारण होता है। *तापीय साम्य* में अर्धचालकों में इलेक्ट्रॉनों तथा होलों की सांद्रता इस प्रकार व्यक्त की जाती है

$$n_e n_h = n_i^2 \qquad (14.5)$$

यद्यपि उपरोक्त विवरण समग्र रूप से सन्निकट तथा परिकल्पित है परंतु यह सरल ढंग से धातुओं, विद्युतरोधियों तथा अर्धचालकों (नैज तथा अपद्रव्यी) में अंतर को समझने में सहायक है। C, Si तथा Ge की प्रतिरोधकताओं में अंतर इनके चालन तथा संयोजी बैंडों के बीच ऊर्जा अंतराल पर निर्भर करता है। कार्बन (डायमंड), Si तथा Ge के लिए ऊर्जा अंतराल क्रमश: 5.4 eV, 1.1 eV तथा 0.7 eV है। Sn भी चौथे ग्रुप का तत्व है परंतु यह धातु है क्योंकि इसके प्रकरण में ऊर्जा अंतराल 0 eV है।



(a) $T > 0$K

एक तापीय जनित इलेक्ट्रॉन-होल युग्म तथा दाता परमाणुओं के 9 इलेक्ट्रॉन

(b) $T > 0$K

चित्र 14.9 $T > 0$ K पर (a) n-प्रकार के अर्धचालक तथा (b) p-प्रकार के अर्धचालक का ऊर्जा बैंड।

उदाहरण 14.2 मान लीजिए किसी शुद्ध Si क्रिस्टल में 5×10^{28} परमाणु m^{-3} है। इसे पंचसंयोजी As से 1 ppm सांद्रता पर अपमिश्रित किया जाता है। इलेक्ट्रॉनों तथा होलों की संख्या परिकलित कीजिए, दिया है कि $n_i = 1.5 \times 10^{16}\ m^{-3}$।

हल ध्यान दीजिए, यहाँ तापीय जनित की ऊष्मा से उत्पन्न इलेक्ट्रॉन ($n_i \sim 10^{16}\ m^{-3}$) अपमिश्रण से उत्पन्न इलेक्ट्रॉनों की तुलना में नगण्य हैं।

इसलिए, $n_e \approx N_D$

चूँकि $n_e n_h = n_i^2$, इसलिए होलों की संख्या

$n_h = (2.25 \times 10^{32})/(5 \times 10^{22})$

$\sim 4.5 \times 10^{9}\ m^{-3}$

उदाहरण 14.2

14.5 p-n संधि

p-n संधि (p-n junction) बहुत सी अर्धचालक युक्तियों जैसे डायोड, ट्रांजिस्टर आदि की मूल इकाई है। अन्य अर्धचालक युक्तियों के विश्लेषण के लिए संधि के व्यवहार को समझना अत्यंत महत्वपूर्ण है। अब हम यह समझने का प्रयास करेंगे कि किसी संधि का निर्माण कैसे होता है तथा बाह्य अनुप्रयुक्त वोल्टताओं (जिन्हें *बायस* भी कहते हैं) के प्रभाव में कोई संधि किस प्रकार व्यवहार करती है।

p-n संधि डायोड का निर्माण तथा कार्य
http://www.mtmi.vu.lt/pfk/funkc_dariniai/diod/p-n_devices.htm
भौतिकी

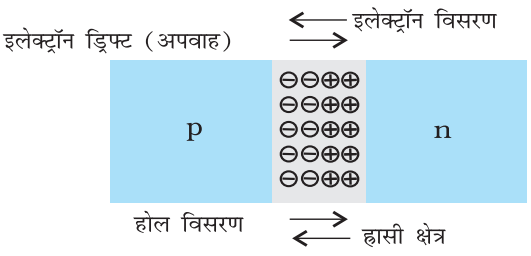
14.5.1 p-n संधि का निर्माण

p-प्रकार के सिलिकॉन (p-Si) अर्धचालक की पतली पटलिका (वेफ़र) पर विचार कीजिए। परिशुद्ध रूप में पंचसंयोजक अशुद्धि की अल्प मात्रा मिलाकर किसी p-Si पटलिका के कुछ भाग को n-Si में परिवर्तित किया जा सकता है। किसी अर्धचालक का निर्माण करने की बहुत-सी प्रक्रियाएँ हैं। अब पटलिका में p-क्षेत्र एवं n-क्षेत्र तथा p- तथा n- क्षेत्रों के बीच एक धातुकर्मी संधि है।

किसी p-n संधि के निर्माण के समय दो महत्वपूर्ण प्रक्रियाएँ होती हैं – *विसरण* (Diffusion) तथा *अपवाह* (Drift)। हम यह जानते हैं कि किसी n-प्रकार के अर्धचालक में इलेक्ट्रॉनों की सांद्रता (प्रति एकांक आयतन में इलेक्ट्रॉनों की संख्या) होलों की सांद्रता की तुलना में अधिक होती है। इसी प्रकार p-प्रकार के अर्धचालक में होलों की सांद्रता इलेक्ट्रॉनों की सांद्रता की तुलना में अधिक होती है। p-n संधि के निर्माण के समय, तथा p- एवं n- फलकों के सिरों पर सांद्रता प्रवणता (Concentration gradient) के कारण होल p-फलक से n-फलक ($p \rightarrow n$) को विसरित होते हैं तथा इलेक्ट्रॉन n-फलक से p-फलक ($n \rightarrow p$) की ओर विसरित होते हैं। आवेश वाहकों की इस गति के कारण संधि से एक विसरण धारा प्रवाहित होती है।

जब कोई इलेक्ट्रॉन p से n की ओर विसरित होता है तो वह अपने पीछे एक आयनित दाता n-फलक पर छोड़ देता है। यह आयनित दाता (धन आवेश) चारों ओर के परमाणुओं द्वारा बँधा होने के कारण निश्चल होता है। जैसे-जैसे इलेक्ट्रॉन $n \rightarrow p$ की ओर विसरित होते जाते हैं, संधि के n-फलक पर धनावेश की (या धनात्मक स्पेस-चार्ज़ क्षेत्र) एक परत विकसित हो जाती है।

इसी प्रकार, जब कोई होल सांद्रता प्रवणता के कारण $p \rightarrow n$ की ओर विसरित होता है तो वह अपने पीछे एक आयनित ग्राही (ऋणात्मक आवेश) छोड़ देता है जो निश्चल होता है। जैसे-जैसे होल विसरित होते हैं, ऋणात्मक आवेश (ऋणात्मक स्पेस-चार्ज़ क्षेत्र) की एक परत संधि के p-फलक पर विकसित होती जाती है। संधि के दोनों फलकों पर विकसित इस स्पेस-चार्ज़ क्षेत्र को *ह्रासी क्षेत्र* (Depletion region) कहते हैं। यह इसलिए है क्योंकि इलेक्ट्रॉन तथा होल जो संधि के आर-पार आरंभिक गति में भाग लेते हैं वे इसके मुक्त आवेशों के क्षेत्र का ह्रास कर देते हैं (चित्र 14.10)। इस ह्रासी क्षेत्र की मोटाई माइक्रोमीटर के दसवें भाग की कोटि की होती है। संधि के n-फलक पर धनात्मक स्पेस-चार्ज़ क्षेत्र तथा p-फलक पर ऋणात्मक स्पेस-चार्ज क्षेत्र होने के कारण संधि पर धनात्मक आवेश से ऋणात्मक आवेश की ओर एक विद्युत क्षेत्र उत्पन्न हो जाता है। इस क्षेत्र के कारण संधि के p-फलक का इलेक्ट्रॉन n-फलक की ओर तथा संधि के n-फलक का होल p-फलक की ओर गति करता है। इस विद्युत क्षेत्र के कारण आवेश वाहकों की इस गति को *अपवाह* कहते हैं। इस प्रकार एक अपवाह धारा जो कि विसरण धारा के विपरीत होती है, प्रवाहित होना आरंभ कर देती है (चित्र 14.10)।

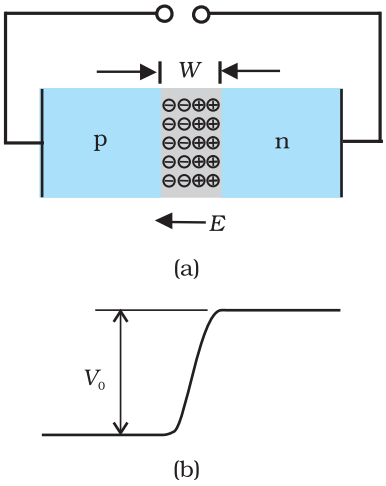


चित्र 14.10 p-n संधि बनने की प्रक्रिया

आरंभ में, विसरण धारा उच्च होती है तथा अपवाह धारा निम्न होती

है। जैसे-जैसे विसरण प्रक्रिया होती जाती है, संधि के दोनों फलकों पर अंतराकाशी आवेश क्षेत्र विस्तारित होते जाते हैं। इससे विद्युत क्षेत्र की तीव्रता में वृद्धि होती है जिसके फलस्वरूप अपवाह धारा में भी वृद्धि होती है। यह प्रक्रम उस समय तक चलता रहता है जब तक कि ये दोनों धाराएँ (विसरण धारा तथा अपवाह धारा) परिमाण में समान नहीं हो जातीं। इस प्रकार एक p-n संधि बन जाती है। साम्यवास्था में p-n संधि पर कोई *नेट विद्युत धारा* नहीं होती।

n-क्षेत्र से इलेक्ट्रॉनों की हानि तथा p-क्षेत्र में होलों की प्राप्ति के कारण दोनों क्षेत्रों की संधि के आर-पार एक विभवांतर उत्पन्न हो जाता है। इस विभव की ध्रुवता इस प्रकार होती है कि यह आवेश वाहकों के और प्रवाह का विरोध करता है जिसके फलस्वरूप साम्यावस्था की स्थिति उत्पन्न हो जाती है। चित्र 14.11 में संधि को साम्यावस्था में तथा इसके सिरों के बीच विभवांतर दर्शाया गया है। n-पदार्थ ने इलेक्ट्रॉन खोए हैं तथा p-पदार्थ ने इलेक्ट्रॉन अर्जित किए हैं। इस प्रकार p-पदार्थ के सापेक्ष n-पदार्थ धनात्मक है। चूँकि विभव n-क्षेत्र से p-क्षेत्र की ओर इलेक्ट्रॉनों की गति को रोकने का प्रयास करता है अत: इस विभव को प्राय: *रोधिका विभव* (Barrier potential) कहते हैं।



चित्र 14.11 (a) डायोड साम्य में (V = 0), (b) बिना किसी बायस के संधि का विभव।

उदाहरण 14.3 क्या p-n संधि बनाने के लिए हम p-प्रकार के अर्धचालक की एक पट्टी को n–प्रकार के अर्धचालक से भौतिक रूप से संयोजित कर p-n संधि प्राप्त कर सकते हैं?

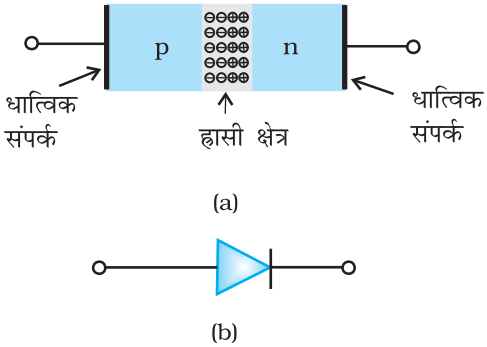
हल नहीं! कोई भी पट्टी, चाहे कितनी ही समतल हो, अंतर-परमाण्वीय क्रिस्टल अंतराल (~ 2 से 3 Å) से कहीं ज़्यादा खुरदरी होगी और इसलिए परमाण्वीय स्तर पर *अविच्छिन्न संपर्क* (अथवा संतत संपर्क) संभव नहीं होगा। प्रवाहित होने वाले आवेश वाहकों के लिए संधि एक विच्छिन्नता की तरह व्यवहार करेगी।

उदाहरण 14.3

14.6 अर्धचालक डायोड

अर्धचालक डायोड [चित्र 14.12(a)] मूल रूप में एक p-n संधि होती है जिसके सिरों पर धात्विक संपर्क जुड़े होते हैं ताकि इस संधि पर कोई बाह्य वोल्टता अनुप्रयुक्त की जा सके। इस युक्ति के दो टर्मिनल होते हैं। अर्धचालक डायोड को प्रतीकात्मक रूप में चित्र 14.12(b) में निरूपित किया गया है।

तीरों की दिशा परिपाटी के अनुसार विद्युत धारा की दिशा साम्या रोधिका (Equilibrium barrier) को दर्शाती है। (जबकि डायोड अग्रदिशिक बायसित (Forward bias) है) विभव को डायोड के सिरों पर बाह्य वोल्टता V अनुप्रयुक्त करके परिवर्तित किया जा सकता है। p-n संधि डायोड की बिना किसी बायस के साम्यावस्था में स्थिति चित्र 14.11(a) तथा (b) में दर्शायी गई है।

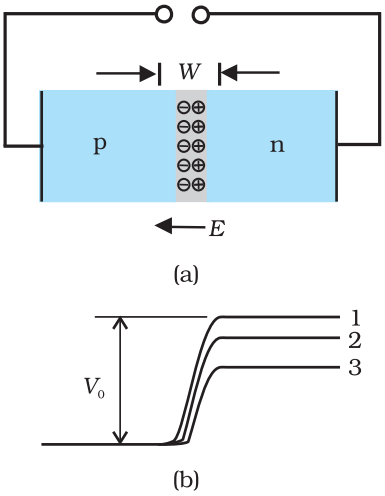


चित्र 14.12 (a) अर्धचालक डायोड, (b) p-n संधि डायोड का प्रतीक।

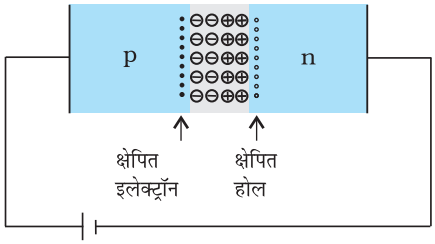
14.6.1 अग्रदिशिक बायस में p-n संधि डायोड

जब किसी अर्धचालक डायोड के दो सिरों के बीच कोई बाह्य वोल्टता V इस प्रकार अनुप्रयुक्त की जाती है कि बैटरी का धन टर्मिनल p-फलक से तथा ऋण टर्मिनल n-फलक से संयोजित करते हैं [चित्र 14.13(a) तथा (b)] तो इसे *अग्रदिशिक बायसित* कहते हैं।

अनुप्रयुक्त अधिकांश वोल्टता पात अर्धचालक डायोड के ह्रासी क्षेत्र के सिरों पर होता है तथा संधि के p-फलक तथा n-फलक पर विभवपात नगण्य होता है (इसका कारण यह है कि ह्रासी



चित्र 14.13 (a) अग्रदिशिक बायस में p-n जंक्शन डायोड, (b) रोधक विभव (1) बिना बैटरी में, (2) निम्न बैटरी वोल्टता के लिए, तथा (3) उच्च बैटरी वोल्टता के लिए।



चित्र 14.14 अग्रदिशिक बायस में अल्पांश वाहक अंत:क्षेपण (Minority current injection)।

क्षेत्र, वह क्षेत्र जहाँ कोई आवेश नहीं है, का प्रतिरोध n-फलक अथवा p-फलक के प्रतिरोधों की तुलना में अत्यधिक होता है)। अनुप्रयुक्त वोल्टता (V) की दिशा अंत:निर्मित (built-in) विभव V_0 के विपरीत होती है। इसके परिणामस्वरूप, ह्रासी स्तर की मोटाई घट जाती है तथा रोधिका ऊँचाई कम हो जाती है [चित्र 14.13(b)]। अग्रदिशिक बायस में प्रभावी रोधिका ऊँचाई ($V_0 - V$) होती है।

यदि अनुप्रयुक्त वोल्टता लघु है तो रोधिका विभव साम्य मान से केवल कुछ कम हो जाएगा, तथा केवल वे ही आवेश वाहक जो उच्चतम ऊर्जा स्तर पर थे, बहुत कम संख्या में संधि को पार करने के लिए आवश्यक ऊर्जा प्राप्त कर पाएँगे, अत: कम विद्युत धारा प्रवाहित होगी। यदि हम अनुप्रयुक्त वोल्टता में काफ़ी वृद्धि कर दें तो रोधिका ऊँचाई काफ़ी घट जाएगी तथा अधिक संख्या में वाहकों को संधि पार करने के लिए आवश्यक ऊर्जा प्राप्त हो जाएगी। इस प्रकार विद्युत धारा में वृद्धि हो जाएगी।

अनुप्रयुक्त वोल्टता के कारण, इलेक्ट्रॉन n-फलक ह्रासी क्षेत्र को पार कर p-फलक पर पहुँचते हैं (जहाँ वे अल्पांश वाहक हैं)। इसी प्रकार p-फलक के होल संधि को पार करके n-फलक पर पहुँचते हैं (जहाँ वे अल्पांश वाहक हैं)। अग्रदिशिक बायस में होने वाले इस प्रक्रम को अल्पांश वाहक अंत:क्षेपण (Minority carrier injection) कहते हैं। संधि की सीमा पर हर फलक पर, संधि से दूर अवस्थित अल्पांश वाहकों की सांद्रता की तुलना में, अल्पांश वाहक सांद्रता में महत्वपूर्ण वृद्धि हो जाती है। इस सांद्रता प्रवणता के कारण p-फलक की संधि के किनारे विसरित होकर p-फलक के दूसरे किनारे पर पहुँच जाते हैं। इसी प्रकार n-फलक की संधि के किनारे से विसरित होकर n-फलक के दूसरे सिरे पर पहुँचते हैं (चित्र 14.14)। दोनों फलकों पर आवेश वाहकों की इस गति के कारण विद्युत धारा प्रवाहित होने लगती है। कुल अग्रदिशिक डायोड धारा का मान होल विसरण धारा तथा इलेक्ट्रॉन विसरण के कारण पारंपरिक धारा का योग होता है। इस धारा का परिमाण प्राय: मिलीऐम्पियर में होता है।

14.6.2 पश्चदिशिक बायस में p-n संधि डायोड

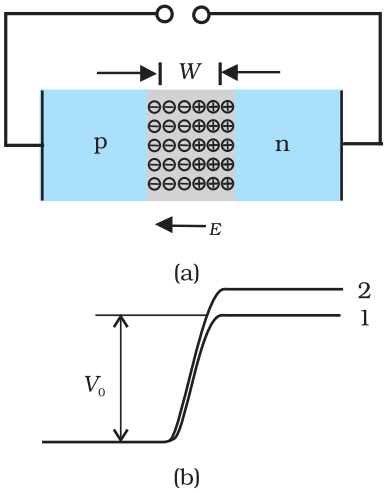
जब किसी अर्धचालक डायोड के दो सिरों के बीच कोई बाह्य वोल्टता (V) इस प्रकार अनुप्रयुक्त करते हैं कि बैटरी के धन टर्मिनल को n-फलक से तथा ऋण टर्मिनल को p-फलक से जोड़ते हैं [चित्र 14.15(a)], तो डायोड को *पश्चदिशिक बायसित* (Reverse bias) कहते हैं। अनुप्रयुक्त वोल्टता का अधिकांश विभवपात अर्धचालक के ह्रासी क्षेत्र के सिरों पर होता है। यहाँ अनुप्रयुक्त वोल्टता की दिशा रोधिका विभव की दिशा के समान होती है। इसके परिणामस्वरूप रोधिका की ऊँचाई बढ़ जाती है तथा ह्रासी क्षेत्र की चौड़ाई में विद्युत में परिवर्तन होने के कारण वृद्धि हो जाती है। पश्चदिशिक बायसन् में प्रभावी रोधिका ऊँचाई ($V_0 + V$) होती है [चित्र 14.15(b)]। यह $n \rightarrow p$ की ओर इलेक्ट्रॉनों के प्रवाह तथा $p \rightarrow n$ की ओर होलों के प्रवाह का दमन करती है। इस प्रकार, डायोड के अग्रदिशिक बायसन् की तुलना में इस स्थिति में विसरण धारा अत्यधिक कम हो जाती है।

संधि के विद्युत क्षेत्र की दिशा ऐसी होती है कि यदि p-फलक पर इलेक्ट्रॉन अथवा n-फलक पर होल अपनी यादृच्छिक गति करते समय संधि के निकट आ जाएँ, तो उन्हें उनके बहुसंख्यक क्षेत्र में भेज दिया जाएगा। आवेश वाहकों के इस अपवाह के कारण विद्युत धारा उत्पन्न होगी। यह अपवाह धारा कुछ μA कोटि की होती है। इसके अत्यल्प मान होने का कारण यह है कि आवेश वाहकों की गति उनके अल्पांश फलक से संधि के दूसरी ओर बहुसंख्यक फलक की ओर होती है। अग्रदिशिक बायसन् में अपवाह धारा (सामान्यत: μA में) भी होती है परंतु यह अंत:क्षिप्त वाहकों के कारण धारा (mA में), की तुलना में नगण्य होती है।

डायोड प्रतीप धारा (Reverse current) अनुप्रयुक्त वोल्टता पर अत्यधिक निर्भर नहीं होती।

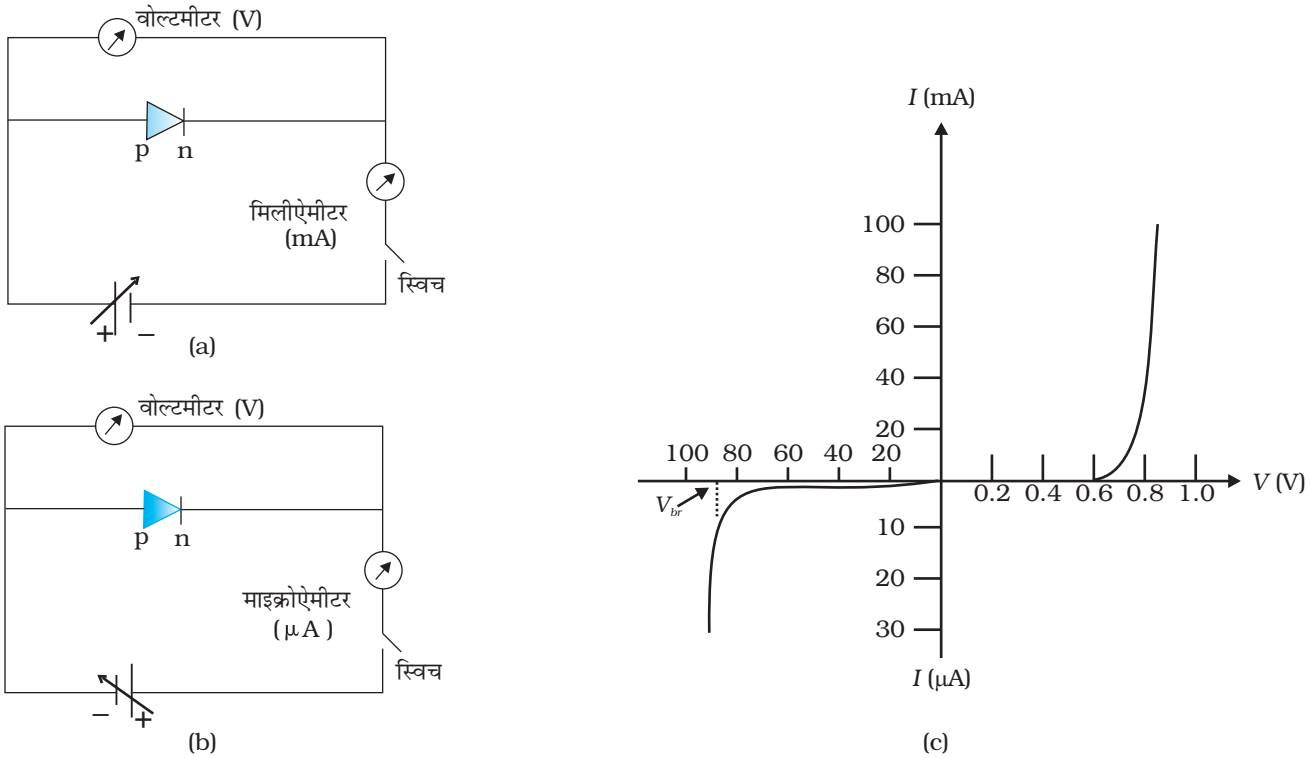
अल्पांश वाहकों को संधि के एक फलक से दूसरे फलक तक पहुँचाने के लिए लघु वोल्टता ही पर्याप्त होती है। धारा अनुप्रयुक्त वोल्टता के परिणाम द्वारा सीमित नहीं होती परंतु यह संधि के दोनों फलकों पर अल्पांश वाहकों की सांद्रता के कारण सीमित होती है।

पश्चदिशिक बायस में किसी क्रांतिक पश्चदिशिक (Critical reverse) वोल्टता तक विद्युतधारा सारभूत रूप में वोल्टता पर निर्भर नहीं करती है। इस वोल्टता को *भंजन वोल्टता* (Breakdown voltage, V_{br}) कहते हैं। जब $V = V_{br}$ तब डायोड पश्चदिशिक धारा में तेज़ी से वृद्धि होती है। यहाँ तक कि बायस वोल्टता में अल्प वृद्धि करने पर भी धारा में अत्यधिक परिवर्तन हो जाता है। यदि पश्चदिशिक धारा को किसी बाह्य परिपथ द्वारा अनुमत मान (जिसे उत्पादक द्वारा निर्दिष्ट किया गया है) से नीचे सीमित न किया जाए तो p-n संधि नष्ट हो जाएगी। यदि एक बार भी यह अनुमत मान से अधिक हो जाए तो अतितप्त होने के कारण डायोड नष्ट हो जाता है। ऐसा तब भी हो सकता है, जब डायोड अग्रदिशिक बायसित होता है तथा अग्रदिशिक धारा अनुमत मान से अधिक हो।



चित्र 14.15 (a) पश्चदिशिक बायस में डायोड (b) पश्चदिशिक बायस में रोधिका विभव।

किसी डायोड के *V-I* अभिलाक्षणिक (अनुप्रयुक्त की गई वोल्टता के फलन के रूप में धारा का विचरण) का अध्ययन करने के लिए परिपथ आरेख चित्र 14.16 (a) तथा (b) में दिखाया गया है। डायोड से वोल्टता को एक पोटेंशियोमीटर (या धारा नियंत्रक) से होकर जोड़ा जाता है जिससे डायोड पर अनुप्रयुक्त की गई वोल्टता को परिवर्तित किया जा सकता है। वोल्टता के विभिन्न मानों के लिए धारा का मान नोट किया जाता है। *V* और *I* के बीच एक ग्राफ़, जैसा चित्र 14.16(c) में दिखाया गया है, प्राप्त होता है। ध्यान दीजिए, अग्रदिशिक बायस मापन के लिए हम मिलीमीटर का उपयोग करते हैं क्योंकि (जैसा पिछले अनुभाग में समझाया गया था) अपेक्षित धारा अधिक है जबकि विपरीत बायस में कम धारा को नापने के लिए एक माइक्रोऐमीटर का उपयोग किया जाता है। आप चित्र



चित्र 14.16 किसी p-n संधि डायोड का (a) अग्रदिशिक बायस, (b) पश्चदिशिक बायस में *V-I* अभिलाक्षणिक के अध्ययन के प्रयोगिक परिपथ, (c) किसी सिलिकॉन डायोड के प्रतिरूपी *V-I* अभिलाक्षणिक।

(14.16) में देख सकते हैं कि अग्रदिशिक बायस में आरंभ में धारा उस समय तक बहुत धीरे-धीरे, लगभग नगण्य, बढ़ती है जब तक कि डायोड पर वोल्टता एक निश्चित मान से अधिक न हो जाए। इस अभिलाक्षणिक वोल्टता के बाद डायोड बायस वोल्टता में बहुत थोड़ी-सी ही वृद्धि करने से डायोड धारा में सार्थक (चरघातांकी) वृद्धि हो जाती है। यह वोल्टता *देहली वोल्टता* (Threshold voltage) या कट-इन वोल्टता कहलाती है। इस वोल्टता का मान जरमेनियम डायोड के लिए ~ 0.2 वोल्ट तथा सिलिकॉन डायोड के लिए ~ 0.7 वोल्ट है।

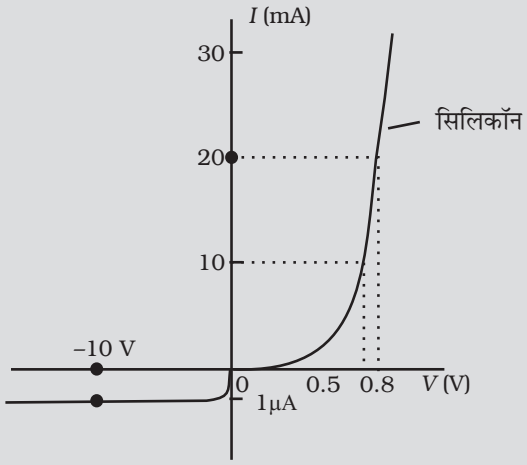
पश्चदिशिक बायस में डायोड के लिए धारा बहुत कम (~μA) होती है तथा बायस में परिवर्तन के साथ लगभग स्थिर बनी रहती है। इसे *प्रतीप संतृप्त धारा* (Reverse saturation current) कहते है। परंतु कुछ विशेष प्रकरणों में, बहुत अधिक पश्चदिशिक बायस (भंजन वोल्टता) पर धारा में अचानक वृद्धि हो जाती है। डायोड की इस विशेष क्रिया की विवेचना आगे अनुभाग 14.8 में की गई है। साधारण उद्देश्य वाले डायोड प्रतीप संतृप्त धारा क्षेत्र के आगे उपयोग नहीं किए जाते हैं।

ऊपर दी गई विवेचना यह दिखाती है कि p-n डायोड मूल रूप से धारा के प्रवाह को केवल एक ही दिशा में (अग्रदिशिक बायस) प्रतिबंधित करता है। पश्चदिशिक बायस प्रतिरोध की तुलना में अग्रदिशिक बायस प्रतिरोध कम होता है। इस गुण का उपयोग प्रत्यावर्ती (ac) वोल्टता के दिष्टकरण के लिए किया गया है, जिसे अगले अनुभाग में समझाया गया है। डायोडों के लिए हम एक अन्य भौतिक राशि जिसे *गतिक प्रतिरोध* कहते हैं, को ''वोल्टता में लघु परिवर्तन ΔV तथा विद्युत धारा में लघु परिवर्तन ΔI के अनुपात'' के रूप में परिभाषित करते हैं:

$$r_d = \frac{\Delta V}{\Delta I} \qquad (14.6)$$

उदाहरण 14.4

उदाहरण 14.4 किसी सिलिकॉन डायोड का *V-I* अभिलाक्षणिक चित्र 14.17 में दर्शाया गया है। डायोड का प्रतिरोध (a) I_D = 15 mA तथा (b) V_D = –10 V पर परिकलित कीजिए।



चित्र 14.17

हल डायोड अभिलाक्षणिक को I = 10 mA से I = 20 mA के बीच सरल रेखा की भाँति मानते हुए जो मूल बिंदु से गुज़रती है, हम ओम के नियम का पालन करते हुए प्रतिरोध का परिकलन कर सकते हैं।

(a) वक्र से I = 20 mA, V = 0.8 V, I = 10 mA, V = 0.7 V पर

$r_{fb} = \Delta V/\Delta I$ = 0.1V/10 mA = 10 Ω

(b) वक्र से V = –10 V, I = –1 μA है

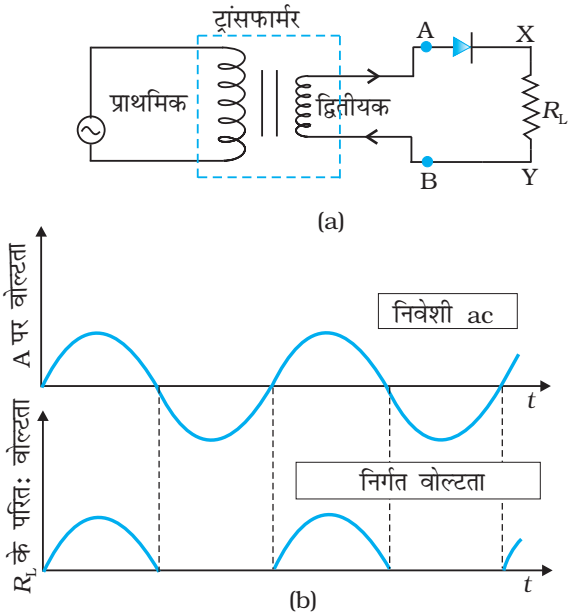
अत:

r_{rb} = 10 V/1μA= 1.0×10^7 Ω

14.7 संधि डायोड का दिष्टकारी के रूप में अनुप्रयोग

किसी संधि डायोड के *V-I* अभिलाक्षणिक में हम यह देखते हैं कि वह केवल तभी विद्युत धारा प्रवाहित होने देता है जब वह अग्रदिशिक बायसित होता है। अत: यदि किसी डायोड के सिरों पर कोई प्रत्यावर्ती वोल्टता अनुप्रयुक्त की जाए तो चक्र के केवल उसी भाग में परिपथ में धारा प्रवाहित होगी जब डायोड अग्रदिशिक बायसित है। डायोड के इस गुण का उपयोग प्रत्यावर्ती वोल्टता का *दिष्टकरण* करने में किया जाता है तथा इस कार्य के लिए जिस परिपथ का उपयोग करते हैं उसे *दिष्टकारी* कहते हैं।

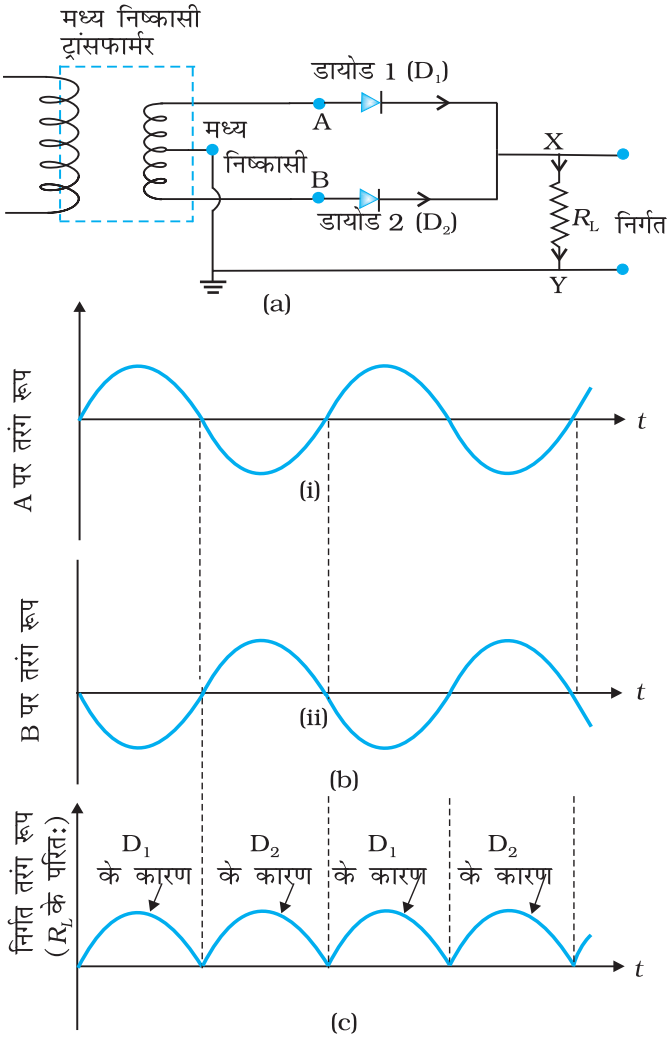
यदि डायोड के सिरों पर कोई प्रत्यावर्ती (ac) वोल्टता श्रेणीक्रम में संयोजित लोड प्रतिरोध R_L के साथ अनुप्रयुक्त की जाए तो लोड के सिरों पर केवल ac निवेश के उस अर्धचक्र में जिसमें डायोड अग्रदिशिक बायसित है, एक स्पंदमान वोल्टता दृष्टिगोचर होगी। इस प्रकार का विद्युत परिपथ चित्र 14.18 के विद्युत परिपथ में दर्शाया गया है जिसे *अर्ध-तरंग दिष्टकारी* परिपथ कहते हैं। ट्रांसफ़ार्मर की द्वितीयक कुंडली टर्मिनल A तथा B पर वांछित ac वोल्टता की आपूर्ति करती है। जब A पर वोल्टता धनात्मक होती है तो डायोड अग्रदिशिक बायसित होता है तथा यह विद्युत धारा का चालन करता है। जब A पर वोल्टता ऋणात्मक होती है तो डायोड पश्चदिशिक बायसित होता है और वह विद्युत चालन नहीं करता। पश्चदिशिक बायस में डायोड की संतृप्त प्रतीप धारा नगण्य होती है तथा इसे व्यावहारिक कार्यों के लिए शून्य माना जा सकता है। (डायोड की प्रतीप भंजन वोल्टता का मान ट्रांसफ़ार्मर की द्वितीयक कुंडली पर शिखर ac वोल्टता की तुलना में काफ़ी अधिक होना चाहिए ताकि डायोड प्रतीप भंजन से सुरक्षित रह सके।)



चित्र 14.18 (a) अर्धतरंग दिष्टकारी परिपथ, (b) दिष्टकारी परिपथ से निवेशी ac और निर्गत वोल्टता के तरंग रूप।

इसलिए ac वोल्टता के धनात्मक *अर्धचक्र* में लोड प्रतिरोध R_L से विद्युत धारा प्रवाहित होगी और हमें चित्र 14.18(b) में दर्शाए अनुसार निर्गत वोल्टता प्राप्त होगी। परंतु ऋणात्मक अर्धचक्र में विद्युत धारा प्राप्त नहीं होगी। अगले धनात्मक अर्धचक्र में हमें फिर निर्गत वोल्टता प्राप्त होगी। इस प्रकार, निर्गत वोल्टता यद्यपि अभी भी परिवर्तनीय है परंतु यह केवल एक ही दिशा में प्रतिबंधित होने के कारण *दिष्टकारी* कहलाती है। चूँकि हमें ac तरंग के केवल एक ही अर्धचक्र में निर्गत वोल्टता प्राप्त हो रही है, अत: इस परिपथ को *अर्ध-तरंग दिष्टकारी* कहते हैं।

चित्र 14.19(a) में दर्शाए गए परिपथ में दो डायोडों का उपयोग करके एक ऐसी परिपथ व्यवस्था की गई है जिससे ac चक्र के धनात्मक एवं ऋणात्मक दोनों ही अर्धचक्रों में तदनुरूपी दिष्टकृत निर्गत वोल्टता प्राप्त होती है। इसीलिए इस परिपथ को *पूर्ण तरंग दिष्टकारी* कहते हैं। इसमें दोनों डायोडों के n-फलकों को एक साथ संयोजित कर देते हैं तथा निर्गत को डायोडों के इस उभयनिष्ठ बिंदु तथा ट्रांसफ़ार्मर की द्वितीयक कुंडली के मध्य बिंदु के बीच प्राप्त किया जाता है। अत: किसी पूर्ण तरंग दिष्टकारी के लिए ट्रांसफार्मर की द्वितीयक कुंडली के मध्य में एक अंशनिष्कासी बिंदु (Tapping point) प्रदान किया जाता है और इसीलिए इस ट्रांसफ़ार्मर को *मध्य निष्कासी ट्रांसफ़ार्मर* (centre-tap transformer) कहते हैं। जैसा कि चित्र 14.19(c) से स्पष्ट है कि प्रत्येक डायोड द्वारा दिष्टकृत वोल्टता कुल द्वितीयक कुंडली से प्राप्त वोल्टता की केवल आधी ही है। प्रत्येक डायोड केवल आधे चक्र का दिष्टकरण करता है, परंतु दो डायोड प्रत्यावर्ती चक्रों का दिष्टकरण करते हैं। इस प्रकार डायोडों के उभयनिष्ठ बिंदु तथा मध्य निष्कासी ट्रांसफ़ार्मर के अंश निष्कासी बिंदु के बीच प्राप्त निर्गत वोल्टता पूर्ण तरंग दिष्टकारी वोल्टता होती है। (ध्यान

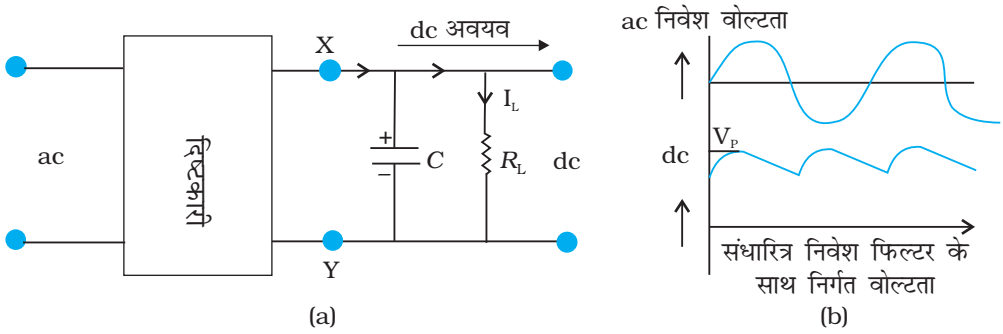


चित्र 14.19 (a) पूर्ण तरंग दिष्टकारी परिपथ; (b) A पर डायोड D_1 के और B पर डायोड D_2 के दिए गए निवेश के तरंग रूप; (c) पूर्ण तरंग दिष्टकारी परिपथ में जोड़े गए लोड R_L पर निर्गत वोल्टता का तरंगरूप।

दीजिए कि पूर्ण तरंग दिष्टकारी के लिए एक अन्य परिपथ भी होता है जिसके लिए मध्य निष्कासी ट्रांसफ़ार्मर की आवश्यकता नहीं होगी परंतु उसे चार डायोड चाहिए)। मान लीजिए किसी क्षण मध्य निष्कासी के A पर निवेश वोल्टता धनात्मक है। यह स्पष्ट है कि इस क्षण पर कला असंगत होने के कारण B पर वोल्टता ऋणात्मक होती है जैसा कि चित्र 14.19(b) में दर्शाया गया है। अतः डायोड D_1 अग्रदिशिक बायस होकर विद्युत चालन करता है (जबकि D_2 पश्चदिशिक बायस होने के कारण चालन नहीं करता)। अतः इस धनात्मक अर्धचक्र में हमें चित्र 14.19(c) में दर्शाए अनुसार एक निर्गत धारा (तथा लोड प्रतिरोध R_L के सिरों पर निर्गत वोल्टता) प्राप्त होती है। इसी प्रकार किसी अन्य क्षण पर, जब A पर वोल्टता ऋणात्मक हो जाती है तब B पर वोल्टता धनात्मक होगी। इसलिए डायोड D_1 चालन नहीं करता, लेकिन डायोड D_2 चालन करता है। इस प्रकार निवेशी ac के ऋणात्मक अर्ध चक्र में भी निर्गत धारा (तथा R_L पर निर्गत वोल्टता) मिलती है। इस प्रकार, हमें धनात्मक तथा ऋणात्मक दोनों ही अर्ध चक्र में (अर्थात, दूसरे शब्दों में, पूर्ण तरंग के समय में) निर्गत वोल्टता मिलती है। स्पष्टतया, दिष्ट वोल्टता या धारा प्राप्त करने के लिए यह अर्धतरंग दिष्टकारी से अधिक दक्ष परिपथ है।

इस प्रकार प्राप्त दिष्टकृत वोल्टता अर्ध ज्यावक्रीय (Half sinusoid) आकृति की होती है। यद्यपि यह एकदिशिक होती है परंतु इसका मान स्थायी नहीं होता। स्पंदमान वोल्टता से dc निर्गत प्राप्त करने के लिए निर्गत टर्मिनलों के सिरों पर (R_L के पार्श्व में) सामान्यतः कोई संधारित्र संयोजित कर देते हैं। इसी कार्य को करने के लिए लोड प्रतिरोध R_L के श्रेणीक्रम में कोई प्रेरक भी संयोजित किया जा सकता है। चूँकि ये अतिरिक्त *ac उर्मिकाओं* को बाहर *फिल्टरन* करके शुद्ध dc वोल्टता प्रदान करते प्रतीत होते हैं, अतः इन्हें फिल्टर कहते हैं।

अब हम फिल्टरन में संधारित्र की भूमिका की विवेचना करेंगे। जब संधारित्र के सिरों पर वोल्टता में वृद्धि हो रही होती है तो वह आवेशित हो जाता है। यदि परिपथ में कोई बाह्य लोड नहीं है तो यह दिष्टकृत निर्गत की शिखर वोल्टता तक आवेशित रहता है। यदि परिपथ में कोई लोड है तो यह लोड से होकर विसर्जित होने लगता है तथा इसके सिरों पर वोल्टता कम होने लगती है। दिष्टकृत निर्गत के अगले अर्ध चक्र में यह फिर अपनी शिखर वोल्टता तक आवेशित होता है (चित्र 14.20)। संधारित्र के सिरों पर वोल्टता में कमी होने की दर संधारित्र की धारिता C तथा परिपथ में लगे प्रभावी प्रतिरोधक R_L के प्रतिरोध गुणनफल जिसे *कालांक* कहते हैं, पर निर्भर करता है। कालांक का मान अधिक होने के लिए C का मान अधिक होना चाहिए। अतः संधारित्र निवेश फिल्टरों का उपयोग करने पर *प्राप्त निर्गत वोल्टता* दिष्टकृत वोल्टता के *शिखर* मान के निकट होती है। विद्युत प्रदायों में व्यापक रूप में इसी प्रकार के फिल्टर उपयोग किए जाते हैं।



चित्र 14.20 (a) संधारित्र फिल्टर के साथ पूर्ण तंरग दिष्टकारी, (b) में दिष्टकारी की निवेश तथा निर्गत वोल्टता।

14.8 विशिष्ट प्रयोजन p-n संधि डायोड

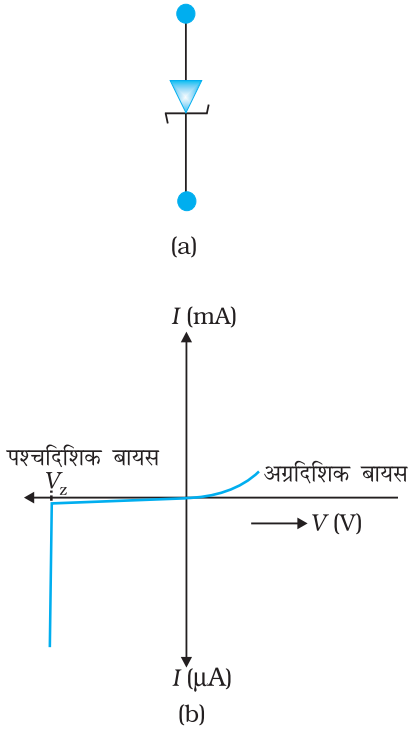
इस अनुभाग में हम कुछ ऐसी युक्तियों की विवेचना करेंगे जो मूल रूप से संधि डायोड हैं परंतु उनका विकास विभिन्न अनुप्रयोगों के लिए किया गया है।

14.8.1 ज़ेनर डायोड

यह एक विशिष्ट प्रयोजन अर्धचालक डायोड है जिसका नाम उसके आविष्कारक सी.ज़ेनर के नाम पर रखा गया है। इसे भंजन क्षेत्र में पश्चदिशिक बायस में प्रचालित करने के लिए डिज़ाइन किया गया है तथा इसका उपयोग वोल्टता नियंत्रक के रूप में किया जाता है। ज़ेनर डायोड का प्रतीक चित्र 14.21(a) में दर्शाया गया है।

ज़ेनर डायोड संधि के p- तथा n- दोनों फलकों को अत्यधिक अपमिश्रित (Heavily doped) कर विकसित किया जाता है। इसके कारण बनने वाला ह्रासी क्षेत्र अत्यधिक पतला ($<10^{-6}$ m) होता है तथा संधि का विद्युत क्षेत्र लगभग 5V तक के लघु पश्चदिशिक बायस होने पर भी अति उच्च ($\sim 5\times10^6$ V/m) होता है। किसी ज़ेनर डायोड का I-V अभिलाक्षणिक चित्र 14.21(b) में दर्शाया गया है। इसमें यह दर्शाया गया है कि जब अनुप्रयुक्त पश्चदिशिक बायस वोल्टता (V) ज़ेनर डायोड की भंजन वोल्टता (V_z) के समान हो जाती है, तो परिपथ में विद्युत धारा में बहुत अधिक परिवर्तन होता जाता है। ध्यान देने योग्य बात यह है कि भंजन वोल्टता V_z के पश्चात, पश्चदिशिक वोल्टता में कोई सार्थक परिवर्तन किए बिना ही अत्यधिक धारा उत्पन्न की जा सकती है। दूसरे शब्दों में, ज़ेनर डायोड से प्रवाहित होने वाली धारा में अत्यधिक परिवर्तन होने पर भी ज़ेनर वोल्टता नियत रहती है। ज़ेनर डायोड के इस गुण का उपयोग विद्युत आपूर्तियों की वोल्टताओं को नियंत्रित करने में किया जाता है तथा आपूर्तियों से नियत वोल्टता पर विद्युत प्राप्त होती है।

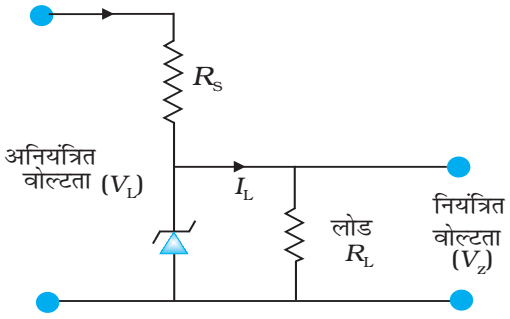
आइए अब यह समझने का प्रयास करे कि भंजन वोल्टता पर विद्युत धारा अचानक कैसे बढ़ जाती है। हम जानते हैं कि प्रतीप धारा इलेक्ट्रॉनों (अल्पांश आवेश वाहकों) के $p \rightarrow n$ तथा होलों के $n \rightarrow p$ ओर प्रवाह के कारण होती है। जैसे ही पश्चदिशिक बायस में वृद्धि होती है, संधि पर विद्युत क्षेत्र महत्वपूर्ण हो जाता है। जब पश्चदिशिक बायस वोल्टता $V = V_z$ है तो विद्युत क्षेत्र तीव्रता p-फलक पर आथितेय परमाणुओं से उन संयोजकता इलेक्ट्रॉनों को जो n-फलक की ओर त्वरित थे, खींचने के लिए पर्याप्त होती है। यही इलेक्ट्रॉन भंजन के समय प्रेक्षित उच्च धारा के लिए उत्तरदायी होते हैं। उच्च विद्युत क्षेत्र के कारण आथितेय परमाणुओं से इलेक्ट्रॉनों का उत्सर्जित होना आंतरिक क्षेत्रीय उत्सर्जन अथवा क्षेत्रीय आयनन कहलाता है। क्षेत्रीय आयनन के लिए आवश्यक विद्युत क्षेत्र 10^6 V/m कोटि का होता है।



चित्र 14.21 (a) किसी ज़ेनर डायोड का प्रतीकात्मक निरूपण तथा (b) किसी ज़ेनर डायोड का *I-V* अभिलाक्षणिक वक्र।

वोल्टता नियंत्रक के रूप में ज़ेनर डायोड

हम जानते हैं कि किसी दिष्टकारी की निवेश वोल्टता में घट-बढ़ होती है तो उसकी दिष्टकृत वोल्टता में भी घट-बढ़ होती है। किसी दिष्टकारी के निर्गत से प्राप्त अनियंत्रिक dc वोल्टता से स्थायी (नियत) dc वोल्टता प्राप्त करने के लिए हम ज़ेनर डायोड का उपयोग करते हैं। ज़ेनर डायोड का उपयोग करके बनाए गए वोल्टता नियंत्रक का विद्युत परिपथ आरेख चित्र 14.22 में दर्शाया गया है।



चित्र 14.22 वोल्टता नियंत्रक के रूप में ज़ेनर डायोड।

किसी अनियंत्रित dc वोल्टता (दिष्टकारी का फिल्टरित निर्गत) को श्रेणी क्रम में संयोजित प्रतिरोध R_s से होते हुए ज़ेनर डायोड से इस प्रकार संयोजित करते हैं कि ज़ेनर डायोड पश्चदिशिक बायस हो। यदि निवेशी वोल्टता में वृद्धि होती है तो R_s तथा ज़ेनर डायोड से प्रवाहित विद्युत धारा में भी वृद्धि हो जाती है। इससे ज़ेनर डायोड के सिरों पर वोल्टता में कोई भी परिवर्तन हुए बिना ही R_s के सिरों पर वोल्टता में वृद्धि हो जाती है। इसका कारण यह है कि भंजन क्षेत्र में ज़ेनर वोल्टता नियत रहती है, यद्यपि ज़ेनर डायोड से प्रवाहित धारा में परिवर्तन होता है। इसी प्रकार यदि निवेशी वोल्टता घटती है तो R_s तथा ज़ेनर डायोड से प्रवाहित विद्युत धारा भी घट जाती है। ज़ेनर डायोड के सिरों पर वोल्टता में कोई परिवर्तन हुए बिना R_s के सिरों पर विभवपात घट जाता है। इस प्रकार निवेशी वोल्टता में होने वाली किसी भी कमी अथवा वृद्धि के कारण, ज़ेनर डायोड के सिरों पर वोल्टता में बिना कोई परिवर्तन हुए, R_s के सिरों पर तदनुरूपी कमी अथवा वृद्धि हो जाती है। इस प्रकार ज़ेनर डायोड एक वोल्टता नियंत्रक की भाँति कार्य करता है। हमें आवश्यक निर्गत वोल्टता के अनुसार ही ज़ेनर डायोड तथा श्रेणी प्रतिरोधक R_s का चयन करना होता है।

उदाहरण 14.5

उदाहरण 14.5 किसी ज़ेनर नियंत्रित विद्युत आपूर्ति में नियंत्रण के लिए $V_Z = 6.0$ V के साथ ज़ेनर डायोड का उपयोग किया जाता है। लोड धारा का मान 4.0 mA रखा जाना है तथा अनियंत्रित निवेश वोल्टता 10.0 V है। श्रेणी प्रतिरोधक R_S का मान क्या होना चाहिए?

हल श्रेणी प्रतिरोधक R_S का मान इस प्रकार होना चाहिए कि ज़ेनर डायोड से प्रवाहित धारा लोड धारा की तुलना में काफ़ी अधिक हो। ऐसा अच्छे लोड नियंत्रण के लिए किया जाता है। ज़ेनर धारा का चयन लोड धारा का पाँच गुना करना चाहिए, अर्थात $I_Z = 20$ mA। अतः R_S से प्रवाहित कुल धारा 24 mA है। R_S के सिरों पर विभवपात $=10.0 - 6.0 = 4.0$ V । इससे हमें प्राप्त होता है $R_S = 4.0\text{V}/(24 \times 10^{-3})\ \text{A} = 167\ \Omega$। कार्बन प्रतिरोधक का उसके निकटतम मान 150 Ω है। अतः, इसके लिए 150 Ω का श्रेणी प्रतिरोधक उपयुक्त होगा। ध्यान दीजिए, यहाँ प्रतिरोधक के मान में थोड़ा बहुत परिवर्तन इसमें महत्व नहीं रखता, यहाँ यह सबसे अधिक महत्वपूर्ण है कि धारा I_Z का मान सदैव ही I_L से काफ़ी अधिक होना चाहिए।

14.8.2 ऑप्टोइलेक्ट्रॉनिक संधि युक्तियाँ

हमने अब तक यह देखा है कि अनुप्रयुक्त वैद्युत निवेशों के साथ अर्धचालक डायोड किस प्रकार व्यवहार करते हैं। इस अनुभाग में, हम ऐसे अर्धचालक डायोडों के विषय में अध्ययन करेंगे जिनमें आवेश वाहकों की उत्पत्ति फोटॉनों (प्रकाशिक उत्तेजन) द्वारा होती है। इस प्रकार की सभी युक्तियों को *ऑप्टोइलेक्ट्रॉनिक युक्तियाँ* कहते हैं। हम निम्नलिखित ऑप्टोइलेक्ट्रॉनिक युक्तियों की कार्यविधि का अध्ययन करेंगे।

(i) *प्रकाश चालकीय डायोड (फोटोडायोड)* जिनका उपयोग प्रकाशित संकेतों (सिग्नलों) के संसूचन में (प्रकाश संसूचक) होता है।

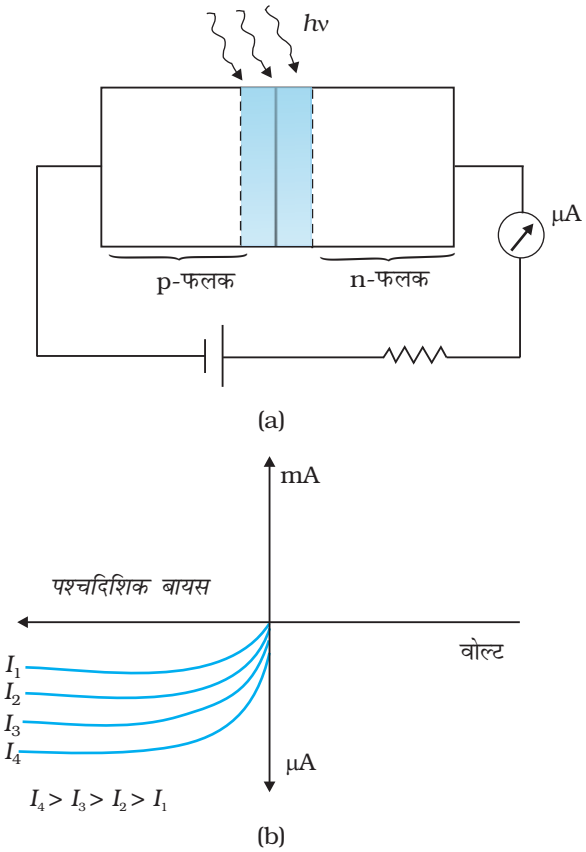
(ii) *प्रकाश उत्सर्जक डायोड* (LED) जो विद्युत ऊर्जा को प्रकाश ऊर्जा में रूपांतरित करते हैं।

(iii) *फ़ोटोवोल्टीय युक्तियाँ,* जो प्रकाशिक विकिरणों को विद्युत में रूपांतरित (सौर सेल) करती हैं।

(i) फ़ोटोडायोड

फ़ोटोडायोड भी एक विशिष्ट प्रयोजन p-n संधि डायोड है जिसमें एक पारदर्शी खिड़की होती है, जिससे प्रकाश-किरणें डायोड पर पड़ सकती हैं। यह पश्चदिशिक बायस में प्रचालित होता है। जब फ़ोटोडायोड ($h\nu$) ऊर्जा, जो कि अर्धचालक के ऊर्जा अंतराल (E_g) से अधिक है, के फ़ोटॉनों (प्रकाश) द्वारा प्रदीप्त होता है तो फ़ोटॉनों के अवशोषण के कारण इलेक्ट्रॉन-होल के युगल उत्पन्न होते हैं। डायोड इस प्रकार बनाए जाते हैं कि e-h युगलों का जनन डायोड के ह्रासी क्षेत्र में या इसके समीप होता है। संधि के विद्युत क्षेत्र के कारण इलेक्ट्रॉन तथा होल पुनःसंयोजन से पूर्व पृथक हो जाते हैं। विद्युत क्षेत्र की दिशा इस प्रकार होती है कि इलेक्ट्रॉन n-फलक पर तथा होल p-फलक पर पहुँचते हैं, जिसके कारण एक emf उत्पन्न होता है। जब इसके साथ कोई बाह्य लोड संयोजित कर देते हैं तो विद्युत धारा प्रवाहित होने लगती है। इस प्रकाश विद्युत धारा का परिमाण आपतित प्रकाश की तीव्रता पर निर्भर करता है (प्रकाश विद्युत धारा आपतित प्रकाश की तीव्रता के अनुक्रमानुपाती होती है)।

यह आसानी से प्रेक्षण किया जा सकता है कि यदि पश्चदिशिक बायस है तो प्रकाश की तीव्रता में परिवर्तन के साथ विद्युत धारा में किस प्रकार परिवर्तन होता है। इस प्रकार किसी फ़ोटोडायोड का उपयोग प्रकाशिक सिग्नलों के संसूचन के लिए प्रकाश संसूचक (फोटोसंसूचक) की भाँति किया जा सकता है। चित्र 14.23 में किसी फ़ोटोडायोड का *I-V* अभिलाक्षणिक की माप के लिए विद्युत परिपथ आरेख दर्शाया गया है।



चित्र 14.23 (a) पश्चदिशिक बायस में प्रदीप्त फ़ोटोडायोड (b) विभिन्न प्रदीप्त तीव्रताओं $I_4 > I_3 > I_2 > I_1$ के लिए पश्चदिशिक बायस धाराएँ।

उदाहरण 14.6 यह ज्ञात है कि पश्चदिशिक बायस की धारा (~ माइक्रो ऐम्पियर) की तुलना में अग्रदिशिक बायस की धारा (~ मिली ऐम्पियर) अधिक होती है तो फिर फोटोडायोड को पश्चदिशिक बायस में प्रचालित करने का क्या कारण है?

हल n- प्रकार के अर्धचालक पर विचार करें। स्पष्टतया, बहुसंख्यक वाहकों का घनत्व (n) अल्पांश होल घनत्व p से बहुत अधिक है ($n >> p$)। मान लीजिए प्रदीप्त करने पर, दोनों प्रकार के वाहकों की संख्या में वृद्धि क्रमशः Δn तथा Δp है, तब

$$n' = n + \Delta n$$

$$p' = p + \Delta p$$

यहाँ पर n' तथा p' क्रमशः किसी विशिष्ट प्रदीप्त पर इलेक्ट्रॉन तथा होल सांद्रताएँ हैं तथा n व p उस समय की वाहक सांद्रताएँ हैं जब कोई प्रदीप्त नहीं है।

उदाहरण 14.6

* ध्यान देने योग्य बात यह है कि कोई e-h युगल उत्पन्न करने के लिए हमें कुछ ऊर्जा (प्रकाशिक उत्तेजन, ऊष्मीय उत्तेजन आदि) खर्च करनी पड़ती है। अतः, जब कोई इलेक्ट्रॉन तथा होल पुनर्योजित होते हैं, तो प्रकाश (विकिरणी पुनर्योजन) अथवा ऊष्मा (अविकिरणी पुनर्योजन) के रूप में ऊर्जा मुक्त होती है। यह अर्धचालक तथा p-n संधि के निर्माण की विधि पर निर्भर करती है। LEDs अर्धचालकों के निर्माण के लिए GaAs, GaAs-GaP जैसे अर्धचालक उपयोग किए जाते हैं जिनमें विकिरणी पुनर्योजन की प्रमुखता होती है।

उदाहरण 14.6

याद रखें कि $\Delta n = \Delta p$ और $n >> p$। इसलिए बहुसंख्यक वाहकों में भिन्नात्मक अंतर ($\Delta n/n$) अल्पांश वाहकों ($\Delta p/p$) की तुलना में बहुत कम होगा। आमतौर पर हम यह कह सकते हैं कि प्रकाश-प्रभावों के कारण अल्पांश वाहकों द्वारा पश्चदिशिक बायस धारा में भिन्नात्मक अंतर, अग्रदिशिक बायस धारा के भिन्नात्मक अंतर की अपेक्षा अधिक आसानी से नापा जा सकता है। इसलिए, प्रकाश की तीव्रता नापने के लिए फोटोडायोड को वरीयता से पश्चदिशिक बायस स्थिति में उपयोग किया जाता है।

(ii) *प्रकाश उत्सर्जक डायोड*

यह एक अत्यधिक अपमिश्रित p-n संधि डायोड होता है जो अग्रदिशिक बायस में स्वत: विकिरणों का उत्सर्जन करता है। यह डायोड पारदर्शी आवरण में बंद होता है ताकि इसके द्वारा उत्सर्जित विकिरण (प्रकाश) बाहर आ सके।

जब डायोड अग्रदिशिक बायसित होता है तो इलेक्ट्रॉन $n \rightarrow p$ की ओर (जहाँ वे अल्पांश वाहक हैं) तथा होल $p \rightarrow n$ की ओर (जहाँ वे अल्पांश वाहक हैं) भेजे जाते हैं। संधि की सीमा पर अल्पांश वाहकों की सांद्रता साम्यावस्था की सांद्रता (अर्थात जब कोई बायस नहीं है) की तुलना में अधिक हो जाती है। इस प्रकार संधि सीमा के दोनों फलकों, अल्पांश वाहकों की अधिकता हो जाती है जो संधि के निकट वाहकों के साथ पुनर्योजित हो जाते हैं। पुनर्योजित होने पर फोटॉनों के रूप में ऊर्जा मुक्त होती है। उत्सर्जित फोटॉनों की ऊर्जा बैड अन्तराल के बराबर अथवा इससे कुछ कम होती है। जब डायोड की अग्रदिशिक धारा अल्प होती है तो उत्सर्जित प्रकाश की तीव्रता कम होती है। जैसे-जैसे अग्रदिशिक धारा में वृद्धि होती जाती है, प्रकाश की तीव्रता में भी वृद्धि होती जाती है और यह अधिकतम हो जाती है। इसके आगे अग्रदिशिक धारा में अधिक वृद्धि होने पर प्रकाश की तीव्रता घटने लगती है। प्रकाश उत्सर्जक डायोडों (LED) को इस प्रकार बायसित किया जाता है कि इनकी प्रकाश उत्सर्जन दक्षता अधिकतम हो।

LED का *V-I* अभिलाक्षणिक सिलिकॉन संधि डायोड के अभिलाक्षणिक के समान होता है। परंतु इनकी देहली वोल्टता तुलना में कहीं अधिक तथा प्रत्येक वर्ण के लिए थोड़ी भिन्न होती है। LED की पश्च भंजन वोल्टता बहुत कम, प्रतीकात्मक रूप में लगभग 5V होती है। अत: यह सावधानी बरतनी चाहिए कि इनके पार उच्च पश्चदिशिक वोल्टताएँ न हों।

ऐसे LEDs जो लाल, पीला, नारंगी, हरा तथा नीला प्रकाश उत्सर्जित कर सकते हैं, बाज़ारों में उपलब्ध हैं। जिन अर्धचालकों का उपयोग दृश्य LED के निर्माण में होता है उनका बैंड अंतराल कम-से-कम 1.8 eV होना चाहिए (दृश्य प्रकाश का स्पेक्ट्रमी परिसर लगभग 0.4 μm से 0.7 μm है अर्थात लगभग 3 eV से 1.8 eV तक होता है)। यौगिक अर्धचालक गैलियम आर्सेनाइड-फ़ोस्फ़ाइड ($GaAs_{1-x}P_x$) का उपयोग विभिन्न वर्णों के LED के निर्माण में होता है। $GaAs_{0.6}\ P_{0.4}$ ($E_g \sim 1.9$ eV) का उपयोग लाल LED बनाने में होता है। GaAs ($E_g \sim 1.4$ eV) का उपयोग अवरक्त LED बनाने में होता है। इन LED का बृहत रूप में उपयोग सुदूर नियंत्रण, चोर घंटी संयंत्रों, प्रकाशिक संचार आदि में किया जाता है। श्वेत LED विकसित करने के लिए विस्तारित अनुसंधान किए जा रहे हैं। ये LED तापदीप्त लैंपों को प्रतिस्थापित कर सकते हैं।

LED के कम शक्ति पारंपरिक तापदीप्त लैंपों की तुलना में निम्नलिखित लाभ हैं-

(i) निम्न प्रचालन वोल्टता तथा अपेक्षाकृत कम शक्ति।
(ii) शीघ्र क्रिया, गरम होने के लिए कोई समय नहीं चाहिए।
(iii) उत्सर्जित प्रकाश की बैंड चौड़ाई 100 Å से 500 Å, अथवा दूसरे शब्दों में यह लगभग (परंतु यथार्थ रूप में नहीं) एक-वर्णी प्रकाश उत्सर्जित करता है।
(iv) अधिक आयु तथा सुदृढ़
(v) तीव्र 'ऑन-ऑफ़' होने की क्षमता

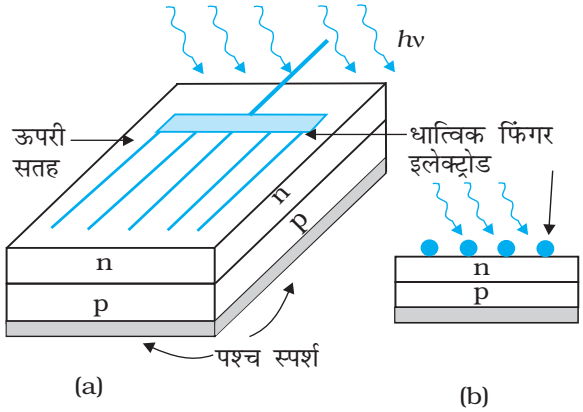
(iii) *सौर सेल*

सौर सेल मूल रूप में एक ऐसी p-n संधि होती है जो सौर-विकिरणों के आपतित होने पर emf

उत्पन्न करती है। यह फ़ोटोडायोड के सिद्धांत (फ़ोटोवोल्टीय प्रभाव) पर ही कार्य करता है। केवल इतना ही अंतर है कि कोई बाह्य बायस अनुप्रयुक्त नहीं की जाती तथा संधि का क्षेत्रफल सौर विकिरणों के आपतन के लिए काफ़ी अधिक रखा जाता है, इसका कारण यह है कि हमारी रुचि अधिक शक्ति प्राप्त करने में होती है।

चित्र 14.24 में एक सरल p-n संधि सौर सेल दर्शाया गया है।

लगभग 300 μm मोटी p-Si पटलिका ली जाती है जिसके एक फलक पर n-Si की एक पतली (~0.3 μm) परत विसरण प्रक्रिया द्वारा वर्धित की जाती है। p-Si के दूसरे फलक पर कोई धातु का लेपन (पश्च स्पर्श) किया जाता है। n-Si सतह के शीर्ष पर धातु फिंगर इलेक्ट्रोड (Metallised finger electrode अथवा धात्विक ग्रिड) निक्षेपित करते हैं। यह अग्र संपर्क की भाँति कार्य करता है। धात्विक ग्रिड सेल के क्षेत्रफल का बहुत थोड़ा भाग (<15%) घेरती है ताकि सेल पर प्रकाश शीर्ष से आपतित हो सके।

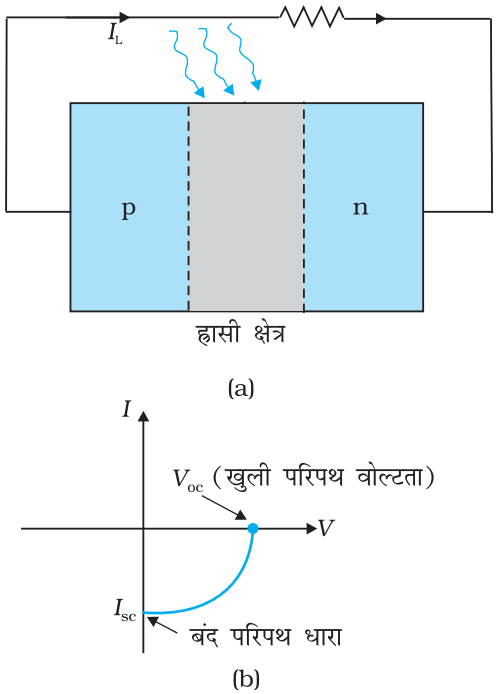


चित्र 14.24 (a) एक प्रतिरूपी p-n संधि सौर सेल, (b) सौर सेल का परिच्छेद दृश्य।

प्रकाश पड़ने पर सौर सेल द्वारा emf उत्पन्न होना निम्नलिखित तीन मूल प्रक्रियाओं के कारण है, ये तीन प्रक्रियाएँ हैं – जनन, पृथकन तथा संग्रह– (i) संधि के निकट प्रकाश ($h\nu > E_g$ के साथ) के कारण इलेक्ट्रॉन होल (e-h) युगलों का जनन; (ii) ह्रासी क्षेत्र के विद्युत क्षेत्र के कारण इलेक्ट्रॉनों व होलों का पृथकन। प्रकाश जनित इलेक्ट्रॉन n-फलक की ओर तथा होल p-फलक की ओर चलते हैं; (iii) n-फलक पर पहुँचने वाले इलेक्ट्रॉन अग्र संपर्क द्वारा संग्रह किए जाते हैं तथा p-फलक पर पहुँचने वाले होल पश्च संपर्क द्वारा संग्रह किए जाते हैं। इस प्रकार p-फलक धनात्मक तथा n-फलक ऋणात्मक हो जाता है जिसके फलस्वरूप *फ़ोटोवोल्टता* प्राप्त (उत्पन्न) होती है।

जब चित्र 14.25(a) में दर्शाए अनुसार कोई बाह्य लोड संयोजित किया जाता है तो लोड से एक प्रकाश धारा I_L प्रवाहित होती है। चित्र 14.25(b) में किसी सौर सेल का प्रतिरूपी I–V अभिलाक्षणिक वक्र दर्शाया गया है।

ध्यान देने योग्य बात यह है कि सौर सेल के I–V अभिलाक्षणिक को निर्देशांक अक्षों के चौथे चतुर्थांश में खींचा गया है। इसका कारण यह है कि सौर सेल कोई विद्युत धारा नहीं लेता वरन यह लोड को विद्युत धारा की आपूर्ति करता है।

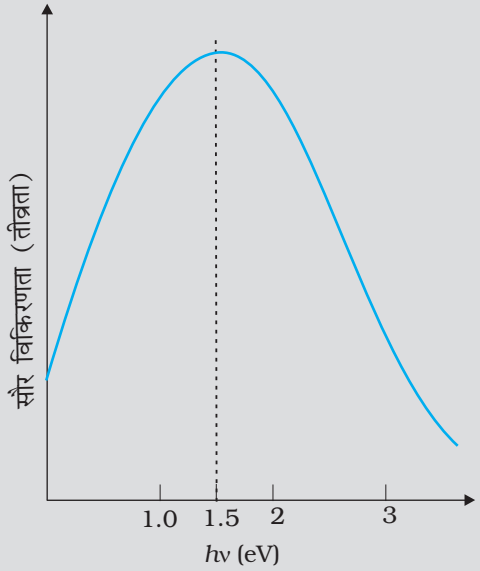


चित्र 14.25 (a) एक प्रतिरूपी प्रदीप्त p-n संधि, (b) सौर सेल का V-I अभिलाक्षणिक वक्र।

सौर सेलों के निर्माण के लिए आदर्श पदार्थ के रूप में उन अर्धचालकों को लेते हैं जिनका बैंड अंतराल 1.5 eV के निकट होता है। सौर सैलों के निर्माण के लिए प्रयुक्त होने वाले अर्धचालक पदार्थ जैसे Si (E_g = 1.1 eV), GaAs (E_g = 1.43 eV), CdTe (E_g = 1.45 eV), $CuInSe_2$ (E_g = 1.04 eV) आदि हैं। सौर सैलों के निर्माण के लिए पदार्थों के चयन के लिए मुख्य कसौटियाँ हैं : (i) बैंड अंतराल (~1.0 से 1.8 eV), (ii) अधिक प्रकाश अवशोषण क्षमता (~10^4 cm^{-1}), (iii) वैद्युत चालकता, (iv) कच्चे पदार्थ की उपलब्धता, तथा (v) लागत। ध्यान दीजिए, सौर सेलों को सदैव ही तेज सूर्य के प्रकाश की आवश्यकता नहीं होती। कोई भी प्रकाश जिसकी ऊर्जा बैंड अंतराल से अधिक हो, उपयोगी हो सकता है। सौर सेलों का उपयोग उपग्रहों में उपयोग होने वाली इलेक्ट्रॉनिक युक्तियों, अंतरिक्ष यानों तथा कुछ कैलकुलेटरों की विद्युत आपूर्ति के लिए भी किया जाता है। बृहत पैमाने पर सौर ऊर्जा का उपयोग करने के लिए कम लागत के फ़ोटोवोल्टीय सेलों का उत्पादन अनुसंधान का विषय है।

उदाहरण 14.7 सौर सेलों के लिए Si और GaAs अधिक पसंद वाले पदार्थ क्यों हैं?

हल हमें प्राप्त होने वाला सौर विकिरण स्पेक्ट्रम चित्र 14.26 में दिखाया गया है।



चित्र 14.26

अधिकतम तीव्रता 1.5 इलेक्ट्रॉन वोल्ट के पास है। प्रकाश-उत्तेजन के लिए, $h\nu > E_g$ । इसलिए ऐसे अर्धचालकों जिनका बैंड अंतराल ~ 1.5 इलेक्ट्रॉन वोल्ट या उससे कम हो, के लिए सौर ऊर्जा के रूपांतरण की दक्षता अच्छी होने की संभावना है। सिलिकॉन के लिए E_g ~ 1.1 eV (इलेक्ट्रॉन वोल्ट) जबकि GaAs के लिए यह ~ 1.53 इलेक्ट्रॉन वोल्ट है। वास्तव में, अपेक्षाकृत अधिक अवशोषण गुणांक के कारण GaAs (अधिक बैंड अंतराल होने पर भी) Si से ज़्यादा अच्छा है। यदि हम Cds या Cd Se (E_g ~ 2.4 eV) जैसे पदार्थों को चुनें तो प्रकाश-रूपांतरण के लिए हम सौर ऊर्जा के केवल उच्च ऊर्जा घटक का इस्तेमाल कर सकते हैं और ऊर्जा के एक सार्थक भाग का कोई उपयोग नहीं हो पाएगा।

प्रश्न यह उठता है कि हम PbS (E_g ~ 0.4 इलेक्ट्रॉन वोल्ट) जैसे पदार्थ क्यों नहीं उपयोग करते, जो सौर विकिरण के स्पेक्ट्रम के तदनुरूपी उच्चिष्ठ ν के लिए $h\nu > E_g$ का प्रतिबंध संतुष्ट करते हैं? यदि हम ऐसा करेंगे तो सौर विकिरण का अधिकांश भाग सौर सेल की *ऊपरी परत* पर ही अवशोषित हो जाएगा और ह्रासी क्षेत्र में या उसके पास नहीं पहुँचेगा। संधि क्षेत्र के कारण इलेक्ट्रॉन होल के प्रभावी पृथकन के लिए हम चाहते हैं कि प्रकाश जनन केवल संधि क्षेत्र में ही हो।

उदाहरण 14.7

14.9 संधि ट्रांज़िस्टर

सन् 1947 में ट्रांज़िस्टर के आविष्कार का श्रेय बेल टेलीफ़ोन प्रयोगशाला U.S.A. के जे. बारडीन तथा डब्ल्यू.एच. ब्रेटन को जाता है। यह ट्रांज़िस्टर एक बिंदु सम्पर्क ट्रांज़िस्टर था। पहले संधि ट्रांज़िस्टर का आविष्कार 1951 में विलियम शॉकले ने दो p-n संधियों को एक-दूसरे के पश्च फलकों को जोड़कर किया था।

जब तक केवल संधि ट्रांज़िस्टर ज्ञात था, इसे केवल ट्रांज़िस्टर कहकर जाना जाता था। परंतु समय के साथ नए-नए ट्रांज़िस्टरों का आविष्कार हुआ तथा नए ट्रांज़िस्टर को पुरानों से भेद करने के लिए इन्हें अब द्विध्रुवी संधि ट्रांज़िस्टर (Bipolar junction transistor, BJT) कहते हैं।

आज जब कोई भ्रांति नहीं है तब भी प्राय: BJT को ट्रांज़िस्टर ही कहते हैं। चूँकि हमारा अध्ययन केवल BJT तक ही सीमित है, इसलिए हम बिना किसी संदिग्धता के BJT के लिए ट्रांज़िस्टर शब्द का ही उपयोग करेंगे।

14.9.1 ट्रांज़िस्टर : संरचना तथा क्रिया

किसी ट्रांज़िस्टर में तीन अपमिश्रित क्षेत्र होते हैं जो मिलकर अपने बीच में दो p-n संधियाँ बनाते हैं। अत: स्पष्ट है कि ट्रांज़िस्टर चित्र 14.27 में दर्शाए अनुसार दो प्रकार के होते हैं।

(i) n-p-n ट्रांज़िस्टर – इसमें n-प्रकार के अर्धचालक के दो खंड (उत्सर्जक तथा संग्राहक) p-प्रकार के अर्धचालक के एक खंड (आधार) द्वारा पृथक किए जाते हैं।

(ii) p-n-p ट्रांज़िस्टर – इसमें p-प्रकार के अर्धचालक के दो खंड (उत्सर्जक तथा संग्राहक) n-प्रकार के अर्धचालक के एक खंड (आधार) द्वारा पृथक किए जाते हैं।

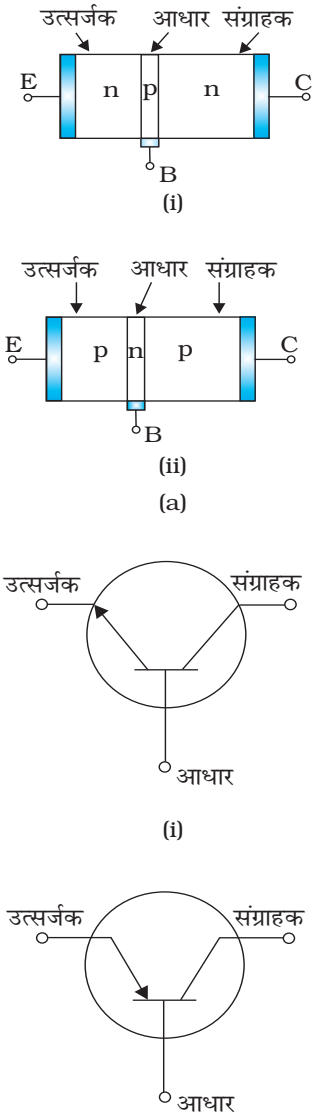
चित्र 14.27(a) में किसी p-n-p तथा n-p-n विन्यास के व्यवस्थात्मक निरूपण दर्शाए गए हैं। किसी ट्रांज़िस्टर के तीनों खंडों की मोटाई भिन्न-भिन्न होती है। उनके अपमिश्रण स्तर भी भिन्न होते हैं। p-n-p तथा n-p-n ट्रांज़िस्टरों को निरूपित करने वाले व्यवस्थात्मक प्रतीकों में [चित्र 14.27(b)] तीर के चिह्न ट्रांज़िस्टर में प्रवाहित रूढ़ धारा की दिशा दर्शाते हैं। इन ट्रांज़िस्टरों के संक्षिप्त वर्णन नीचे दिए गए हैं :

- *उत्सर्जक* (Emitter) – यह चित्र 14.27(a) में दर्शाए अनुसार ट्रांज़िस्टर की एक ओर का खंड होता है। यह मध्यम साइज़ का परंतु *अत्यधिक अपमिश्रित* होता है। यह ट्रांज़िस्टर में प्रवाहित धारा के लिए बहुसंख्यक आवेश वाहक की अत्यधिक मात्रा में आपूर्ति करता है।
- *आधार* (Base) – यह केंद्रीय खंड होता है। यह *अत्यंत पतला* तथा *कम अपमिश्रित* होता है।
- *संग्राहक* (Collector) – यह खंड उत्सर्जक द्वारा प्रदान किए गए बहुसंख्यक आवेश वाहकों के अधिकांश भाग का संग्रहण करता है। संग्राहक फलक साधारण अपमिश्रित होता है परंतु साइज़ में यह उत्सर्जक से बड़ा होता है।

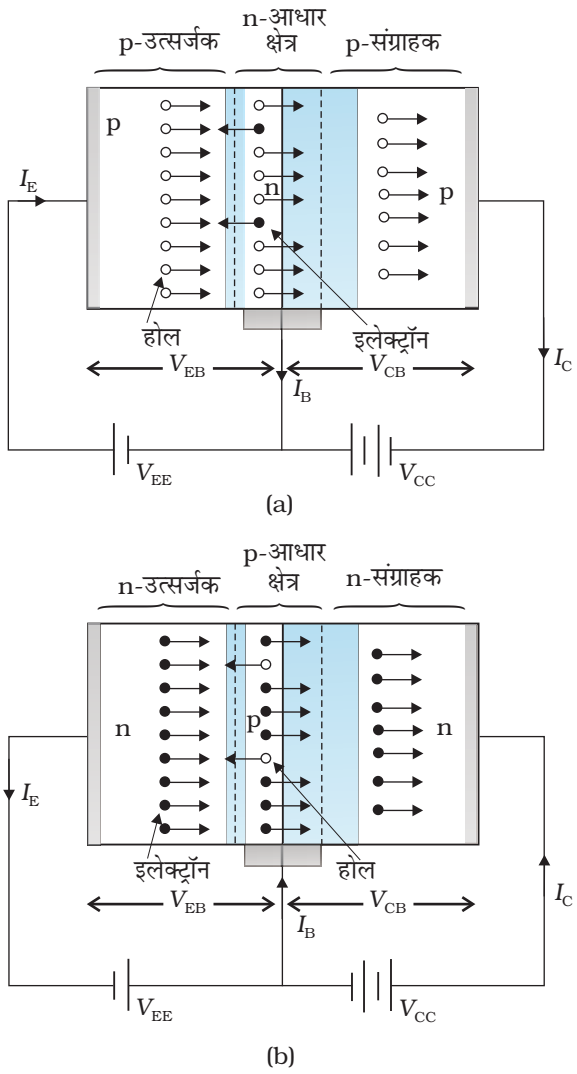
हम पहले यह देख चुके हैं कि किसी p-n संधि के प्रकरण में संधि के आर-पार एक ह्रासी क्षेत्र बन जाता है। किसी ट्रांज़िस्टर में उत्सर्जक-आधार संधि तथा आधार-संग्राहक संधि पर ह्रासी क्षेत्र बनते हैं। किसी ट्रांज़िस्टर की कार्य प्रणाली को समझने के लिए हमें इन संधियों पर बने ह्रासी क्षेत्रों की प्रकृति को जानना होगा। जब किसी ट्रांज़िस्टर के टर्मिनलों पर उचित वोल्टता अनुप्रयुक्त की जाती है तो ट्रांज़िस्टर के विभिन्न क्षेत्रों में आवेश वाहक गति करते हैं। ट्रांज़िस्टर का बायसन् भिन्न-भिन्न प्रयोजनों के लिए भिन्न-भिन्न प्रकार से किया जाता है।

ट्रांज़िस्टर का उपयोग स्पष्ट रूप से दो प्रकार से किया जा सकता है। मूल रूप से इसका आविष्कार प्रवर्धक की भाँति कार्य करने के लिए किया गया था जो किसी सिग्नल की आवर्धित प्रति उत्पन्न करता है। परंतु शनै:-शनै: इसका स्विच के रूप में भी समान उपयोग किया जाने लगा। हम इन दोनों ही प्रकार्यों के विषय में अध्ययन करके यह सीखेंगे कि किस प्रकार ट्रांज़िस्टर को बायसित करके ये पारस्परिक एकांतरिक प्रकार्य कार्यान्वित किए जाते हैं।

सर्वप्रथम हम यह जानने का प्रयास करेंगे कि ट्रांज़िस्टरों को प्रवर्धन क्षमताएँ कौन प्रदान करता है। ट्रांज़िस्टर अपने उत्सर्जक-आधार संधि के अग्रदिशिक बायसन्, तथा आधार-संग्राहक संधि के पश्चदिशिक बायसन् में प्रवर्धक की भाँति कार्य करता है। इस स्थिति में चित्र 14.28 में इन बायसों को क्रमश: V_{CC} तथा V_{EE} द्वारा उत्पन्न करते हुए दर्शाया गया है। जब ट्रांज़िस्टर को इस ढंग से बायसित किया जाता है तो इसे इसकी *सक्रिय* अवस्था कहते हैं। हम उत्सर्जक तथा आधार के बीच वोल्टता को V_{EB} तथा संग्राहक तथा आधार के बीच की वोल्टता को V_{CB} द्वारा निरूपित



चित्र 14.27 (a) n-p-n ट्रांज़िस्टर तथा p-n-p ट्रांज़िस्टर का व्यवस्थात्मक निरूपण और (b) n-p-n तथा p-n-p ट्रांज़िस्टर के लिए संकेत।



चित्र 14.28 बायस वोल्टता का अनुप्रयोग : (a) p-n-p ट्रांजिस्टर तथा (b) n-p-n ट्रांजिस्टर।

करते हैं। चित्र 14.28 में दोनों विद्युत प्रदाय उभयनिष्ठ टर्मिनल आधार से संयोजित हैं, जबकि इनके अन्य टर्मिनल क्रमशः उत्सर्जिक तथा संग्राहक से संयोजित हैं। अतः इन दो विद्युत प्रदायों को क्रमशः V_{EE} तथा V_{CC} द्वारा निरूपित करते हैं। उन परिपथों जिनमें उत्सर्जक उभयनिष्ठ टर्मिनल होता है, उनमें आधार तथा उत्सर्जक के बीच संयोजित विद्युत प्रदाय को V_{BB} तथा संग्राहक उत्सर्जक के बीच संयोजित विद्युत प्रदाय को V_{CC} द्वारा निरूपित किया जाता है।

आइए अब हम ट्रांज़िस्टर में धारा वाहकों के पथों के विषय में जानकारी प्राप्त करें जो उत्सर्जक-आधार संधि पर अग्रदिशिक वायसित तथा आधार-संग्राहक संधि पर पश्चदिशिक बायसित है। अत्यधिक अपमिश्रित उत्सर्जक में बहुसंख्यक वाहकों की उच्च सांद्रता होती है, जिसमें होल p-n-p ट्रांज़िस्टरों में तथा इलेक्ट्रॉन n-p-n ट्रांज़िस्टरों में बहुसंख्यक वाहक होते हैं। ये बहुसंख्यक वाहक आधार क्षेत्र में अत्यधिक संख्या में प्रवेश करते हैं। आधार अत्यधिक पतला तथा कम मात्रा में अपमिश्रित होता है। अतः वहाँ पर बहुसंख्यक वाहकों की संख्या कम होती है। p-n-p ट्रांज़िस्टर में, आधार में क्योंकि यह n-प्रकार का अर्धचालक है, अतः बहुसंख्यक वाहक इलेक्ट्रॉन होते हैं। उत्सर्जक से आधार में प्रवेश करने वाले अधिकांश होल वहाँ उपस्थित इलेक्ट्रॉन की कम संख्या को अपने में समा लेते हैं। चूँकि आधार-संग्राहक संधि पश्चदिशिक बायस होती है, ये होल, जो इस संधि पर अल्पांश वाहक के रूप में प्रतीत होते हैं, संधि को आसानी से पार करके संग्राहक में पहुँच जाते हैं। आधार में उपस्थित होल या तो बाहर से आने वाले इलेक्ट्रॉनों से संयोग करने के लिए आधार टर्मिनल की ओर गति करते हैं अथवा संग्राहक में प्रवेश करने के लिए संधि को पार करके संग्राहक टर्मिनल पर पहुँच जाते हैं। आधार को इसलिए पतला बनाया जाता है ताकि होल स्वयं को पश्चदिशिक बायसित आधार संग्राहक संधि के निकट पाकर आधार टर्मिनल पर न जाकर संधि को पार कर लें।

यहाँ ध्यान देने योग्य रोचक बात यह है कि अग्रदिशिक बायस होने के कारण एक बृहत धारा उत्सर्जक-आधार संधि में प्रवेश करती है, परंतु उसके अधिकांश भाग को संलग्न पश्चदिशिक बायसित आधार-संग्राहिक संधि की ओर मोड़ दिया जाता है तथा आधार से आने वाली धारा संधि में प्रवेश करने वाली धारा का एक बहुत छोटा अंश ही होती है। यदि हम अग्रदिशिक बायस संधि को पार करने वाली होल धारा तथा इलेक्ट्रॉन धारा को क्रमशः I_h तथा I_e से निरूपित करें तो अग्रदिशिक बायस डायोड में प्रवाहित कुल धारा का योग $I_h + I_e$ होगा। हम यह पाते हैं कि उत्सर्जक धारा $I_E = I_h + I_e$ परंतु आधार धारा $I_B << I_h + I_e$ क्योंकि I_e का अधिकांश भाग आधार टर्मिनल से बाहर आने की बजाय संग्राहक में चला जाता है। अतः आधार धारा उत्सर्जक धारा का एक बहुत छोटा अंश होती है।

बाहर से उत्सर्जक में प्रवेश करने वाली धारा उत्सर्जक धारा I_E के बराबर होती है। इसी प्रकार आधार टर्मिनल से निर्गत धारा I_B है तथा संग्राहक टर्मिनल से निर्गत धारा I_C है। अतः ऊपर दिए गए तर्क से स्पष्ट है [तथा चित्र 14.28(a) में किरखोफ़ नियम के संधि अनुप्रयोग द्वारा भी] कि

उत्सर्जक धारा I_E, संग्राहक धारा I_c तथा आधार धारा I_B का योग है। अर्थात–

$$I_E = I_C + I_B \qquad (14.7)$$

हम यह भी पाते हैं कि $I_C \approx I_E$

यहाँ पर होलों की गति की दिशा का विवरण रूढ़ धारा की दिशा के सर्वसम है। परंतु इलेक्ट्रॉनों की गति की दिशा धारा की दिशा के ठीक विपरीत है। इस प्रकार किसी p-n-p ट्रांज़िस्टर में धारा उत्सर्जक से आधार में प्रवेश करती है जबकि n-p-n ट्रांज़िस्टर में धारा आधार से उत्सर्जक में प्रवेश करती है। उत्सर्जक में तीरशीर्ष रूढ़ धारा की दिशा को दर्शाते हैं।

किसी n-p-n ट्रांज़िस्टर में बहुसंख्यक तथा अल्पांश वाहकों द्वारा अपनाए गए पथों के विवरण p-n-p ट्रांज़िस्टर के समान ही हैं। परंतु चित्र 14.28 में दर्शाए अनुसार धारा के पथ एक-दूसरे के ठीक विपरीत है। चित्र 14.28(b) इलेक्ट्रॉन बहुसंख्यक वाहक हैं जिनकी आपूर्ति n-प्रकार के क्षेत्र द्वारा की जाती है। ये पतले p-प्रकार के आधार क्षेत्र को पार करते हैं और संग्राहक पर पहुँच कर संग्राहक धारा I_C देते हैं। उपरोक्त विवरण से हम यह निष्कर्ष निकाल सकते हैं कि ट्रांज़िस्टर की सक्रिय अवस्था में उत्सर्जक आधार संधि एक कम प्रतिरोध के रूप में कार्य करती है जबकि आधार-संग्राहक संधि उच्च प्रतिरोध के रूप में कार्य करती है।

14.9.2 मूल ट्रांज़िस्टर परिपथ विन्यास तथा ट्रांज़िस्टर अभिलाक्षणिक

किसी ट्रांज़िस्टर में केवल तीन टर्मिनल उपलब्ध होते हैं– *उत्सर्जक* (E), *आधार* (B) तथा *संग्राहक* (C)। अत: किसी परिपथ में निवेश/निर्गत संयोजन इस प्रकार के होने चाहिए कि इनमें से कोई एक (E, या B या C) निवेश तथा निर्गत में उभनिष्ठ हो। इसलिए किसी ट्रांज़िस्टर को निम्नलिखित तीन विन्यासों में से किसी एक विन्यास में संयोजित किया जा सकता है।

उभयनिष्ठ उत्सर्जक (CE), उभयनिष्ठ आधार (CB), तथा *उभयनष्ठि संग्राहक (CC)*

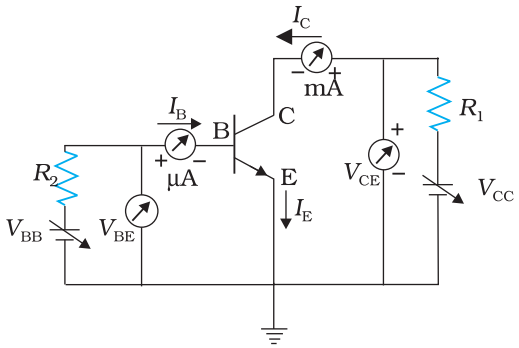
ट्रांज़िस्टरों का अधिक व्यापक उपयोग उभयनिष्ठ उत्सर्जक CE विन्यास में किया जाता है अत: हम अपनी चर्चा को केवल इसी विन्यास तक ही सीमित रखेंगे। चूँकि n-p-n सिलिकॉन ट्रांज़िस्टरों का उपयोग अधिक सामान्य है। हम अपनी चर्चा इसी ट्रांज़िस्टर तक ही सीमित रखेंगे। p-n-p ट्रांज़िस्टर से व्यवहार करते समय बाह्य विद्युत आपूर्ति की ध्रुवता उत्क्रमित करनी होती है।

उभयनिष्ठ उत्सर्जक ट्रांज़िस्टर अभिलाक्षणिक

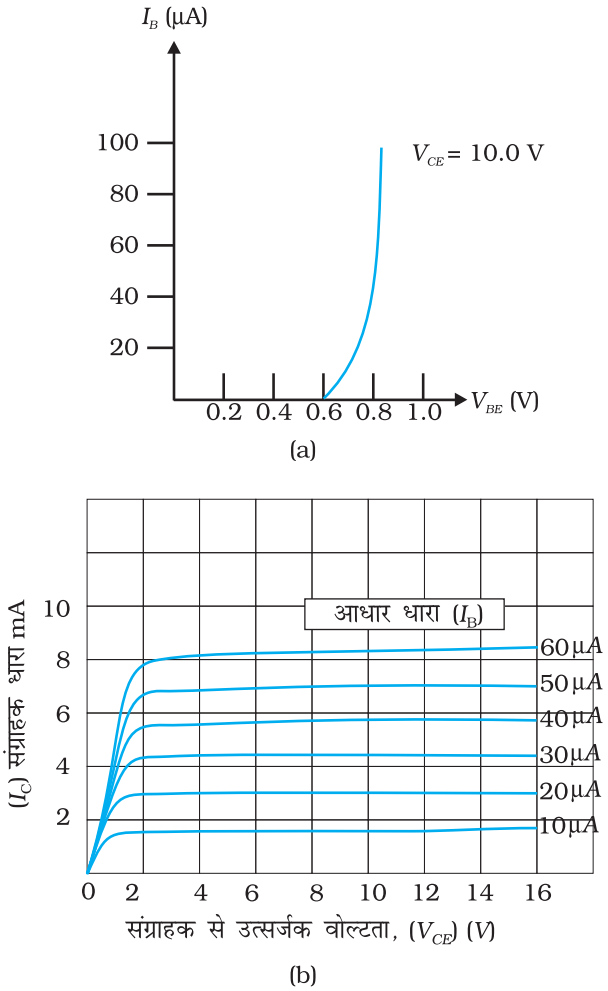
जब ट्रांज़िस्टर का उपयोग CE विन्यास में करते हैं तो निवेश आधार तथा उत्सर्जक के बीच तथा निर्गत संग्राहक तथा उत्सर्जक के बीच होता है। आधार उत्सर्जक वोल्टता में V_{BE} परिवर्तन के साथ आधार धारा I_B में परिवर्तन होना *निवेश अभिलाक्षणिक* कहलाता है। इसी प्रकार संग्राहक-उत्सर्जक वोल्टता V_{CE} में परिवर्तन के साथ संग्राहक धारा I_C में परिवर्तन होना निर्गत अभिलाक्षणिक कहलाता है। आप यह देखेंगे कि *निर्गत अभिलाक्षणिकों* को निवेश अभिलाक्षणिक नियंत्रित करते हैं। इससे यह ध्वनित होता है कि आधार धारा के साथ संग्राहक धारा में भी परिवर्तन होता है।

चित्र 14.29 में दर्शाए गए परिपथ का उपयोग करके किसी n-p-n ट्रांज़िस्टर के निवेश अभिलाक्षणिक तथा निर्गत अभिलाक्षणिक का अध्ययन किया जा सकता है।

C_E अभिविन्यास में निवेश अभिलाक्षणिक का अध्ययन करने के लिए



चित्र 14.29 उभयनिष्ठ उत्सर्जक विन्यास में n-p-n ट्रांज़िस्टर के निर्गत तथा निवेश अभिलाक्षणिक के अध्ययन के लिए परिपथ-व्यवस्था।



चित्र 14.30 (a) प्ररूपी निवेश अभिलाक्षणिक तथा (b) प्ररूपी निर्गत अभिलाक्षणिक।

आधार धारा I_B तथा आधार-उत्सर्जक वोल्टता V_{BE} के बीच ग्राफ़ (एक वक्र) खींचा जाता है। V_{BE} पर I_B की निर्भरता का अध्ययन करने के लिए संग्राहक उत्सर्जक-वोल्टता V_{CE} को नियत रखा जाता है। हमारी रुचि उस समय निवेश अभिलाक्षणिक प्राप्त करने में होती है जब ट्रांज़िस्टर सक्रिय अवस्था में हो। अत: संग्राहक-उत्सर्जक वोल्टता V_{CE} को इतना अधिक रखा जाता है कि आधार संग्राहक संधि पश्चदिशिक बायसित रहे। चूँकि $V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$ तथा Si ट्रांज़िस्टर के लिए V_{BE} का मान 0.6 से 0.7 V होता है। अत: V_{CE}, 0.7 V से काफ़ी अधिक होना चाहिए। चूँकि V_{CE} के बड़े परिसर में ट्रांज़िस्टर का प्रचालन प्रवर्धक रूप में किया जाता है, अत: अधिकांश समय तक आधार-संग्राहक संधि उच्च पश्चदिशिक बायसित रहती है। अत: V_{CE} के मान लगभग 3 V से 20 V के परास में रखकर निवेश अभिलाक्षणिक प्राप्त किए जा सकते हैं। चूँकि V_{CE} में *वृद्धि V_{CB} में वृद्धि के रूप में प्रतीत होती है, इसका I_B पर प्रभाव नगण्य है।* इसके परिणामस्वरूप, V_{CE} के विभिन्न मानों के लिए निवेश अभिलाक्षणिकों के वक्र लगभग सर्वसम होते हैं। अत: *केवल एक निवेश अभिलाक्षणिक निर्धारित (खींचना) ही पर्याप्त होता है।* चित्र 14.30(a) में किसी ट्रांज़िस्टर का प्रारूपी निवेश अभिलाक्षणिक दर्शाया गया है।

I_B को नियत रखकर V_{CE} में परिवर्तन के साथ I_C में परिवर्तन का प्रेक्षण करने पर निर्गत अभिलाक्षणिक प्राप्त किया जा सकता है। यह स्पष्ट है कि जब V_{BE} में लघु वृद्धि करते हैं तो उत्सर्जक क्षेत्र से होल धारा तथा आधार क्षेत्र से इलेक्ट्रॉन धारा दोनों में वृद्धि होती है। इसके परिणामस्वरूप I_B तथा I_C दोनों में आनुपातिक रूप में वृद्धि होती है। इससे यह प्रदर्शित होता है कि जब I_B में वृद्धि होती है तो I_C में भी वृद्धि होती है। I_B के विभिन्न नियत मानों पर I_C तथा V_{CE} के बीच खींचे गए वक्रों से हमें निर्गत अभिलाक्षणिक प्राप्त होते हैं। अत: चित्र 14.30(b) में दर्शाए अनुसार आधार धारा I_B के विभिन्न मानों के लिए भिन्न-भिन्न निर्गत अभिलाक्षणिक होते हैं।

इन दोनों-निवेश तथा निर्गत अभिलाक्षणिकों के रैखिक खंडों का उपयोग ट्रांज़िस्टरों के कुछ महत्वपूर्ण ac प्राचलों के परिकलन में नीचे दिए अनुसार किया जा सकता है।

(i) ***निवेश प्रतिरोध*** **(r_i)** : इसे इस प्रकार परिभाषित किया जाता है, नियत संग्राहक-उत्सर्जक वोल्टता (V_{CE}) पर आधार-उत्सर्जक वोल्टता में परिवर्तन (ΔV_{BE}) के परिणामस्वरूप आधार धारा में परिणामी अंतर (ΔI_B) के अनुपात को निवेश प्रतिरोध कहते हैं। यह परिवर्तनात्मक (ac प्रतिरोध) है तथा इसे निवेश अभिलाक्षणिक द्वारा पता भी लगाया जा सकता है कि इसका मान ट्रांज़िस्टर की प्रचालन धारा के साथ परिवर्तित होता है।

$$r_i = \left(\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B}\right)_{V_{CE}} \qquad (14.8)$$

r_i का मान कुछ सैकड़ों से कुछ हज़ारों ओम तक कुछ भी हो सकता है।

(ii) ***निर्गत प्रतिरोध*** **(r_o)** : इसे इस प्रकार परिभाषित किया जाता है, नियत आधार धारा I_B पर संग्राहक-उत्सर्जन वोल्टता में अंतर (ΔV_{CE}) तथा संग्राहक धारा में परिणामी अंतर (ΔI_C) के अनुपात को निर्गत प्रतिरोध (r_o) कहते हैं।

$$r_o = \left(\frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C}\right)_{I_B} \qquad (14.9)$$

निर्गत अभिलाक्षणिक यह दर्शाते हैं कि आरम्भ में V_{CE} के अति लघु मानों के लिए I_C में लगभग रैखिकत: वृद्धि होती है। इसका कारण यह है कि आधार-संग्राहक संधि पश्चदिशिक बायसित नहीं है तथा ट्रांज़िस्टर सक्रिय अवस्था में नहीं है। वास्तव में, ट्रांज़िस्टर संतृप्त अवस्था में है तथा अभिलाक्षणिक के इस भाग में, धारा को आपूर्ति वोल्टता V_{CC} (=V_{CE}) द्वारा नियंत्रित किया जाता है। जब V_{CE} का मान आधार-संग्राहक संधि को पश्चदिशिक बायसित करने के लिए आवश्यक वोल्टता से अधिक होता है तो V_{CE} में परिवर्तन के साथ I_C में बहुत कम वृद्धि होती है। निर्गत अभिलाक्षणिक के रैखिक भाग के ढलान का प्रतिलोम निर्गत प्रतिरोध r_o प्रदान करता है। ट्रांज़िस्टर के निर्गत प्रतिरोध को मुख्यत: आधार-संग्राहक संधि के बायस द्वारा नियंत्रित किया जाता है। निर्गत प्रतिरोध के उच्च परिमाण (100 kΩ कोटि का) होने का कारण इस डायोड का पश्चदिशिक बायसित होना है। इससे यह भी स्पष्ट होता है कि निर्गत अभिलाक्षणिक के आरम्भिक भाग पर जबकि ट्रांज़िस्टर संतृप्त अवस्था में है, प्रतिरोध बहुत कम क्यों होता है।

(iii) ***धारा प्रवर्धक गुणांक*** **(β)** : इसे इस प्रकार परिभाषित किया जाता है, नियत संग्राहक-उत्सर्जक वोल्टता (V_{CE}) पर संग्राहक धारा में परिवर्तन (ΔI_C) और आधार धारा में परिणामी परिवर्तन (ΔI_B) के अनुपात को धारा प्रवर्धक गुणांक (β) कहते हैं।

$$\beta_{ac} = \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}\right)_{V_{CE}} \qquad (14.10)$$

इसे *लघु सिग्नल धारा लब्धि* भी कहते हैं तथा इसका मान अत्यधिक होता है। यदि हम केवल I_C तथा I_B का अनुपात ज्ञात करें तो हमें ट्रांज़िस्टर का dc β प्राप्त होता है। अत:

$$\beta_{dc} = \frac{I_C}{I_B} \qquad (14.11)$$

चूँकि I_C में I_B के साथ लगभग रैखिकत: वृद्धि होती है तथा जब $I_B = 0$ है तो $I_C = 0$ होता है, β_{dc} तथा β_{ac} के मान लगभग बराबर होते हैं। अत: अधिकांश परिकलनों के लिए β_{dc} का उपयोग किया जा सकता है। V_{CE} तथा I_B (या I_C)में परिवर्तन के साथ β_{ac} तथा β_{dc} दोनों में थोड़ा परिवर्तन होता है।

उदाहरण 14.8 चित्र 14.30(b) में दर्शाए गए निर्गत अभिलाक्षणिक से किसी ट्रांज़िस्टर के β_{ac} तथा β_{dc} के मान परिकलित कीजिए जबकि V_{CE} = 10 V है तथा I_C = 4.0 mA है।

हल

$$\beta_{ac} = \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}\right)_{V_{CE}} ; \quad \beta_{dc} = \frac{I_C}{I_B}$$

V_{CE} तथा I_C के दिए गए मानों पर β_{ac} तथा β_{dc} के मानों को ज्ञात करने के लिए हम इस प्रकार आगे बढ़ सकते हैं। I_C के दिए गए मान से कुछ कम तथा कुछ अधिक I_B के दो मानों के लिए किन्हीं दो अभिलाक्षणिकों पर विचार करते हैं। यहाँ I_C = 4.0 mA. (I_B= 30 तथा 20 μA के लिए अभिलाक्षणिकों का चयन कीजिए) V_{CE} = 10 V पर हम ग्राफ़ से I_C के दो मान प्राप्त करते हैं।

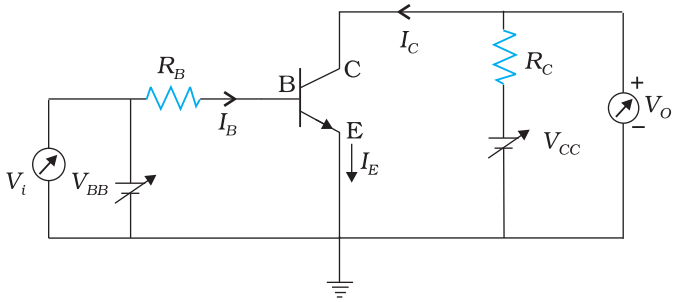
उदाहरण 14.8

उदाहरण 14.8

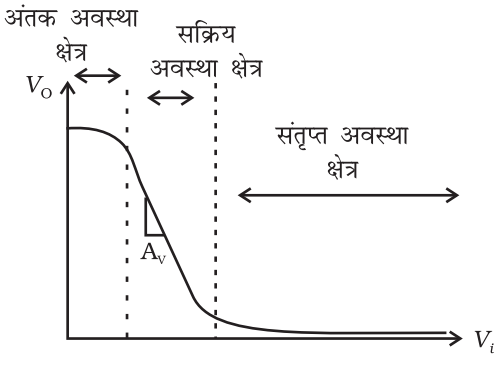
तब
$\Delta I_B = (30 - 20)\ \mu A = 10\ \mu A$, $\Delta I_C = (4.5 - 3.0)\ mA = 1.5\ mA$
अतः, $\beta_{ac} = 1.5\ mA / 10\ \mu A = 150$
β_{dc}, का मान ज्ञात करने के लिए या तो $V_{CE} = 10\ V$ पर $I_C = 4.0\ mA$ के तदनुरूपी I_B के मान का अनुमान लगाइए अथवा चयन किए गए दो अभिलाक्षणिकों के लिए β_{dc} के दो मान परिकलित कीजिए तथा इनका औसत ज्ञात कीजिए।
अतः, $I_C = 4.5\ mA$ और $I_B = 30\ \mu A$ के लिए
$\beta_{dc} = 4.5\ mA / 30\ \mu A = 150$
तथा $I_C = 3.0\ mA$ तथा $I_B = 20\ \mu A$ के लिए
$\beta_{dc} = 3.0\ mA / 20\ \mu A = 150$
इस प्रकार $\beta_{dc} = (150 + 150)/2 = 150$

14.9.3 ट्रांज़िस्टर एक युक्ति के रूप में

उपयोग किए जाने वाले विन्यास (जैसे CB, CC तथा CE), E-B तथा B-C संधियों के बायस तथा प्रचालन क्षेत्र जैसे अंतक, सक्रिय क्षेत्र तथा संतृप्त के आधार पर ट्रांज़िस्टर का उपयोग एक युक्ति के रूप में किया जा सकता है। जैसा कि हम पहले ही वर्णन कर चुके हैं हम केवल CE विन्यास तक ही सीमित रहेंगे तथा किसी युक्ति की कार्य प्रणाली को समझने के लिए उस युक्ति के प्रचालन क्षेत्र तथा बायसन तक ही अपना ध्यान केंद्रित रखेंगे।



(a)



(b)

चित्र 14.31 (a) CE विन्यास में आधार बायसित ट्रांजिस्टर (b) अंतरण अभिलक्षण।

जब ट्रांज़िस्टर का उपयोग अंतक अथवा संतृप्त अवस्था में किया जाता है तो यह एक स्विच की भाँति कार्य करता है। इसके विपरीत किसी ट्रांज़िस्टर को एक प्रवर्धक के रूप में उपयोग करने के लिए इसे सक्रिय क्षेत्र में प्रचालित करना होगा।

(i) ट्रांज़िस्टर स्विच के रूप में

हम चित्र 14.31(a) में दर्शाए CE विन्यास में आधार बायसित ट्रांज़िस्टर के व्यवहार का विश्लेषण करके ट्रांज़िस्टर का स्विच के रूप में प्रचालन समझने का प्रयास करेंगे।

इस परिपथ के निवेश तथा निर्गत पक्षों पर किरख़ोफ वोल्टता नियम का अनुप्रयोग करने पर हमें प्राप्त होता है

$$V_{BB} = I_B R_B + V_{BE} \qquad (14.12)$$

तथा

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \qquad (14.13)$$

यहाँ हम V_{BB} को dc निवेश वोल्टता V_i तथा V_{CE} को dc निर्गत वोल्टता V_o समझेंगे। अतः

$V_i = I_B R_B + V_{BE}$ तथा
$V_o = V_{CC} - I_C R_C$.

आइए यह देखें कि V_i के शून्य से आगे बढ़ने पर V_o में क्या परिवर्तन होते हैं। सिलिकॉन ट्रांज़िस्टरों में जब तक V_i का मान 0.6 V से कम होता है ट्रांज़िस्टर अंतक अवस्था में रहता है तथा I_C शून्य होती है।

अतः $V_o = V_{CC}$

जब V_i का मान 0.6 V से अधिक हो जाता है तो ट्रांज़िस्टर सक्रिय अवस्था में आ जाता है जिसमें

निर्गत में कुछ धारा I_C होती है। तथा पद $I_C R_C$ का मान बढ़ने पर निर्गत वोल्टता V_o घटती है। V_i में वृद्धि होने पर I_C में लगभग रैखिकत: वृद्धि होती है और इसीलिए V_o का मान रैखिकत: उस समय तक घटता जाता है जब तक कि मान लगभग 1.0 V से कम नहीं हो जाता।

इससे आगे, परिवर्तन अरैखित हो जाता है तथा ट्रांज़िस्टर संतृप्त अवस्था में पहुँच जाता है। V_i के मान में और वृद्धि करने पर निर्गत वोल्टता में और कमी होती है तथा यह शून्य की ओर बढ़ने लगती है। तथापि यह शून्य कभी नहीं होती। यदि हम V_o तथा V_i के बीच ग्राफ़ खींचे, [जिसे 'आधार बायसित ट्रांज़िस्टर का अंतरण अभिलक्षण' भी कहते हैं [चित्र 14.31(b)] तो हम यह पाते हैं कि अंतक अवस्था तथा सक्रिय अवस्था के बीच और संक्रिय अवस्था तथा संतृप्त अवस्था के बीच भी ऐसे क्षेत्र होते हैं जहाँ पर परिवर्तन में रैखिकता नहीं होती जो यह दर्शाता है कि अंतक अवस्था से सक्रिय अवस्था में तथा संक्रिय अवस्था से संतृप्त अवस्था में संक्रमण बहुत स्पष्ट नहीं होते।

आइए, अब हम यह देखें कि ट्रांज़िस्टर स्विच की भाँति कैसे कार्य करता है। जब तक V_i का मान कम होता है और यह ट्रांज़िस्टर को अग्रदिशिक बायसित नहीं करता, V_o का मान अधिक (V_{CC} पर) होता है। यदि V_i का मान इतना अधिक है कि यह ट्रांज़िस्टर को संतृप्त स्थिति में प्रचालित करने के लिए पर्याप्त हो तो V_o का मान बहुत कम, शून्य के अति निकट होता है। जब ट्रांज़िस्टर चालन करने की अवस्था में नहीं होता तो इसे 'स्विच ऑफ़' की स्थिति में कहते हैं तथा जब यह संतृप्त स्थिति में चला जाता है तो इसे 'स्विच ऑन' में कहा जाता है। इससे यह प्रकट होता है कि यदि हम लघु (कम) या उच्च (अधिक) अवस्था को ट्रांज़िस्टर की अंतक तथा संतृप्त अवस्था के तदनुरूपी स्तरों की किसी निश्चित वोल्टता से नीचे अथवा ऊपर के रूप में परिभाषित करें, तो हम यह कह सकते हैं कि कोई लघु निवेश ट्रांज़िस्टर का स्विच ऑफ़ कर देता है जबकि उच्च निवेश ट्रांज़िस्टर का 'स्विच ऑन' कर देता है। अन्य शब्दों में हम इसे इस प्रकार से भी कह सकते हैं कि ट्रांज़िस्टर को दिया गया लघु निवेश उच्च निर्गत प्रदान करता है जबकि ट्रांज़िस्टर को दिया गया उच्च निवेश लघु निर्गत प्रदान करता है। ट्रांज़िस्टर के स्विच परिपथ इस प्रकार डिजाइन किए जाते हैं कि ट्रांज़िस्टर कभी भी सक्रिय अवस्था में नहीं रहता।

(ii) ट्रांज़िस्टर प्रवर्धक के रूप में

ट्रांज़िस्टर को प्रवर्धक की भाँति उपयोग में लाने के लिए हम V_o तथा V_i के बीच ग्राफ़ के सक्रिय क्षेत्र का उपयोग करेंगे। इस वक्र के रैखिक भाग की प्रवणता निवेश में परिवर्तन के साथ निर्गत में परिवर्तन की दर को निरूपित करती है। यह ऋणात्मक होती है क्योंकि निर्गत का मान $V_{CC} - I_C R_C$ है $I_C R_C$ नहीं है। यही कारण है कि जैसे-जैसे किसी CE प्रवर्धक की निवेश वोल्टता में वृद्धि होती है इसकी निर्गत वोल्टता में कमी होती जाती है तथा निर्गत को निवेश की कला से बाहर कहा जाता है। यदि हम यह मानें कि ΔV_o तथा ΔV_i निर्गत तथा निवेश वोल्टताओं में अल्प परिवर्तन हैं तब $\Delta V_o / \Delta V_i$ को प्रवर्धक की लघु सिग्नल वोल्टता लब्धि A_V कहते हैं।

यदि सक्रिय क्षेत्र के मध्य बिंदु के तदनुरूपी वोल्टता V_{BB} का कोई नियत मान है, तो परिपथ $\Delta V_o / \Delta V_i$ वोल्टता लब्धि के *CE* प्रवर्धक की भाँति व्यवहार करेगा। हम ट्रांजिस्टर की वोल्टता लब्धि A_V को परिपथ के प्रतिरोधकों के पदों में तथा धारा लब्धि को नीचे दर्शाए अनुसार व्यक्त कर सकते हैं :

हमें ज्ञात है कि निर्गत वोल्टता $V_o = V_{CC} - I_C R_C$ अत:, $\Delta V_o = 0 - R_C \Delta I_C$

इसी प्रकार $V_i = I_B R_B + V_{BE}$ से

$\Delta V_i = R_B \Delta I_B + \Delta V_{BE}$

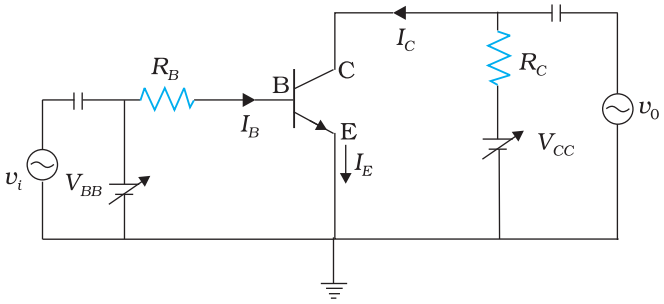
परंतु, ΔV_{BE} का मान $\Delta I_B R_B$ के मान की तुलना में नगण्य के समान है, अत: इस *CE* प्रवर्धक (चित्र 14.32) की वोल्टता लब्धि को इस प्रकार व्यक्त कर सकते हैं।

$$A_V = -R_C \Delta I_C / R_B \Delta I_B$$
$$= -\beta_{ac}(R_C / R_B) \qquad (14.14)$$

यहाँ $\beta_{ac} = \Delta I_C / \Delta I_B$ [समीकरण (14.10) से]। इस प्रकार प्रवर्धक के रूप में उपयोग करने के लिए ट्रांज़िस्टर के सक्रिय क्षेत्र के रैखिक भाग का उपयोग किया जा सकता है। ट्रांज़िस्टर को एक प्रवर्धक (CE-विन्यास) के रूप में अगले अनुभाग में विस्तार से चर्चा किया जाएगा।

14.9.4 ट्रांज़िस्टर–प्रवर्धक के रूप में (CE-विन्यास)

ट्रांज़िस्टर को प्रवर्धक के रूप में प्रचालित करने के लिए यह आवश्यक है कि हम इसके प्रचालन बिंदु को इसके सक्रिय क्षेत्र के मध्य में कहीं पर नियत करें। यदि हम अंतरण वक्र के रैखिक भाग के मध्य के बिंदु के तदनुरूपी V_{BB} का मान नियत करें तब dc आधार धारा I_B नियत होगी तथा तदनुरूपी संग्राहक धारा I_C भी नियत हो जाएगी। dc वोल्टता $V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$ भी नियत रहेगी। V_{CE} तथा I_B के प्रचालन मान प्रवर्धक के प्रचालन बिंदु को निर्धारित करते हैं।



चित्र 14.32 CE ट्रांजिस्टर प्रवर्धक का एक सरल परिपथ

यदि आपूर्ति V_{BB} के साथ श्रेणीक्रम में किसी सिग्नल के स्रोत को संयोजित करके v_s आयाम की कोई लघु ज्यावक्रीय वोल्टता dc आधार बायस पर अध्यारोपित करें तो आधार-धारा में संग्राहक धारा I_B के मान पर ज्यावक्रीय परिवर्तन अध्यारोपित हो जाएँगे। इसके परिणामस्वरूप संग्राहक धारा I_C पर भी ज्यावक्रीय परिवर्तन अध्यारोपित हो जाएँगे जो निर्गत वोल्टता V_O के मान में भी तदनुरूपी परिवर्तन उत्पन्न करेंगे। बड़े संधारित्रों द्वारा dc वोल्टताओं को अवरुद्ध करके हम निवेश तथा निर्गत के सिरों पर ac परिवर्तनों को माप सकते हैं।

प्रवर्धक के उपरोक्त विवरण में हमने किसी ac सिग्नल पर विचार नहीं किया है। व्यापक रूप में प्रवर्धकों का उपयोग प्रत्यावर्ती सिग्नलों को प्रवर्धित करने के लिए किया जाता है। मान लीजिए चित्र 14.32 में दर्शाए अनुसार हम किसी ac निवेश सिग्नल v_i (जिसे प्रवर्धित करना है) को बायस V_{BB} (dc) पर अध्यारोपित करते हैं। निर्गत को संग्राहक तथा भूमि के बीच प्राप्त किया जाता है।

किसी भी प्रवर्धक की क्रियाविधि को सरलता से समझने के लिए पहले हम यह मानते हैं कि $v_i = 0$। तब निर्गत पाश पर किरख़ोफ नियम का अनुप्रयोग करने पर, हमें प्राप्त होता है।

$$V_{cc} = V_{CE} + I_c R_L \qquad (14.15)$$

इसी प्रकार निवेश पाश के लिए

$$V_{BB} = V_{BE} + I_B R_B \qquad (14.16)$$

जब v_i शून्य नहीं है, तो

$$V_{BE} + v_i = V_{BE} + I_B R_B + \Delta I_B (R_B + r_i)$$

V_{BE} में परिवर्तन को निवेश प्रतिरोध (r_i) [समीकरण (14.8) देखिए] तथा I_B में परिवर्तन से संबद्ध किया जा सकता है। इस प्रकार

$$v_i = \Delta I_B (R_B + r_i)$$

$$= r \Delta I_B$$

I_B में परिवर्तन से I_c में भी परिवर्तन होता है। हम समीकरण (14.11) में परिभाषित प्राचल β_{dc} की ही भाँति प्राचल β_{ac} को इस प्रकार परिभाषित करते हैं:

$$\beta_{ac} = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_B} = \frac{i_c}{i_b} \qquad (14.17)$$

इसे ac *धारा लब्धि* (A_i) भी कहते हैं। प्राय: निर्गत अभिलाक्षणिक के रैखिक क्षेत्र में β_{ac} का मान β_{dc} के निकट होता है।

चूँकि V_{CC} का मान नियत है I_B के कारण I_C में परिवर्तन V_{CE} तथा प्रतिरोधक R_L के सिरों पर विभवपात में परिवर्तन उत्पन्न करता है।

इन परिवर्तनों को समीकरण (14.15) द्वारा इस प्रकार दर्शाया जा सकता है।

$\Delta V_{CC} = \Delta V_{CE} + R_L \Delta I_C = 0$

अथवा $\Delta V_{CE} = -R_L \Delta I_C$

V_{CE} में परिवर्तन निर्गत वोल्टता υ_0 है। समीकरण (14.10) से हमें प्राप्त होता है

$\upsilon_0 = \Delta V_{CE} = -\beta_{ac} R_L \Delta I_B$

प्रवर्धक की वोल्टता लब्धि है

$$A_\upsilon = \frac{\upsilon_0}{\upsilon_i} = \frac{\Delta V_{CE}}{r \Delta I_B}$$

$$= -\frac{\beta_{ac} R_L}{r} \qquad (14.18)$$

ऋणात्मक चिह्न यह निरूपित करता है कि निर्गत वोल्टता कला में निवेश वोल्टता के विपरीत है।

ट्रांज़िस्टर अभिलाक्षणिक की उपरोक्त व्याख्या में हमने यह पाया कि CE विन्यास में धारा लब्धि β_{ac} होती है। इसमें हमने वोल्टता लब्धि A_υ भी देखी। अत: हम शक्ति लब्धि A_p को धारा लब्धि तथा वोल्टता लब्धि के गुणनफल के रूप में व्यक्त कर सकते हैं। गणितीय रूप में

$$A_p = \beta_{ac} \times A_\upsilon \qquad (14.19)$$

चूँकि β_{ac} तथा A_υ के मान 1 से अधिक हैं, अत: हमें ac शक्ति लब्धि प्राप्त होती है। तथापि हमें यह बोध होना चाहिए कि ट्रांज़िस्टर कोई शक्ति जनन युक्ति नहीं है। निर्गत पर उच्च ac शक्ति के लिए आवश्यक ऊर्जा बैटरी द्वारा प्रदान की जाती है।

उदाहरण 14.9 चित्र 14.31(a) में विद्युत आपूर्ति V_{BB} में 0V से 5.0 V तक परिवर्तन किया जा सकता है। Si ट्रांजिस्टर के लिए $\beta_{dc} = 250$ तथा $R_B = 100$ kΩ; $R_C = 1$ KΩ है तथा $V_{CC} = 5.0$V है। यह मानते हुए कि जब ट्रांज़िस्टर संतृप्त अवस्था में है, तो $V_{CE} = 0$V तथा $V_{BE} = 0.8$V, (a) वह न्यूनतम आधार धारा परिकलित कीजिए जिस पर ट्रांज़िस्टर संतृप्त अवस्था में पहुँच जाएगा। (b) इस प्रकार V_1 का वह मान जिसमें ट्रांज़िस्टर 'स्विच ऑन' की भाँति कार्य करेगा। (c) V_1 का वह परिसर ज्ञात कीजिए जिसका ट्रांज़िस्टर 'स्विच ऑफ़' तथा 'स्विच ऑन' की स्थिति में रहता है।

हल

दिया हुआ है कि संतृप्तता पर $V_{CE} = 0$V, $V_{BE} = 0.8$V

$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$

$I_C = V_{CC}/R_C = 5.0\text{V}/1.0\text{k}\Omega = 5.0$ mA

इसलिए $I_B = I_C/\beta = 5.0$ mA$/250 = 20\mu$A

वह निवेश वोल्टता जिस पर ट्रांज़िस्टर संतृप्तता ग्रहण करता है

$V_{IH} = V_{BB} = I_B R_B + V_{BE}$

$= 20\mu\text{A} \times 100\ \text{k}\Omega + 0.8\text{V} = 2.8\text{V}$

वह निवेश वोल्टता जिससे नीचे ट्रांज़िस्टर अंतक स्थिति में रहता है।

$V_{IL} = 0.6$V, $V_{IH} = 2.8$V

0.0V तथा 0.6V, के बीच ट्रांज़िस्टर 'स्विच ऑफ' अवस्था में रहेगा। 2.8V तथा 5.0V के बीच यह 'स्विच ऑन' अवस्था में रहेगा।

ध्यान दीजिए, जब I_B का मान 0.0mA से 20mA के बीच परिवर्तित होता है, तो ट्रांज़िस्टर सक्रिय अवस्था में होता है। इस परिसर में, $I_C = \beta I_B$ मान्य होता है। संतृप्तता परिसर में

$I_C \leq \beta I_B$

उदाहरण 14.9

उदाहरण 14.10

उदाहरण 14.10 किसी CE-ट्रांज़िस्टर प्रवर्ध के लिए 2.0 kΩ के उत्सर्जक प्रतिरोधक के लिए सिरों पर 2.0 V है। मान लीजिए ट्रांज़िस्टर का धारा प्रवर्धक 100 है। यदि dc का आधार धारा का मान सिग्नल धारा का 10 गुना होता है, तो 2.0 V की आपूर्ति V_{BB} श्रेणीक्रम में संयोजित प्रतिरोधक R_B का क्या मान होना चाहिए। संग्राहक प्रतिरोध के सिरों पर dc विभवपात भी परिकलित कीजिए। (चित्र 14.32)।

हल निर्गत dc वोल्टता 2.0 V अत: ac संग्राहक धारा $i_C = 2.0/2000 = 1.0$ mA अत: आधार से गुजरने वाली सिग्नल धारा $i_B = i_C / \beta = 1.0$ mA/100 = 0.010 mA

dc आधार धारा = 10× 0.010 = 0.10 mA

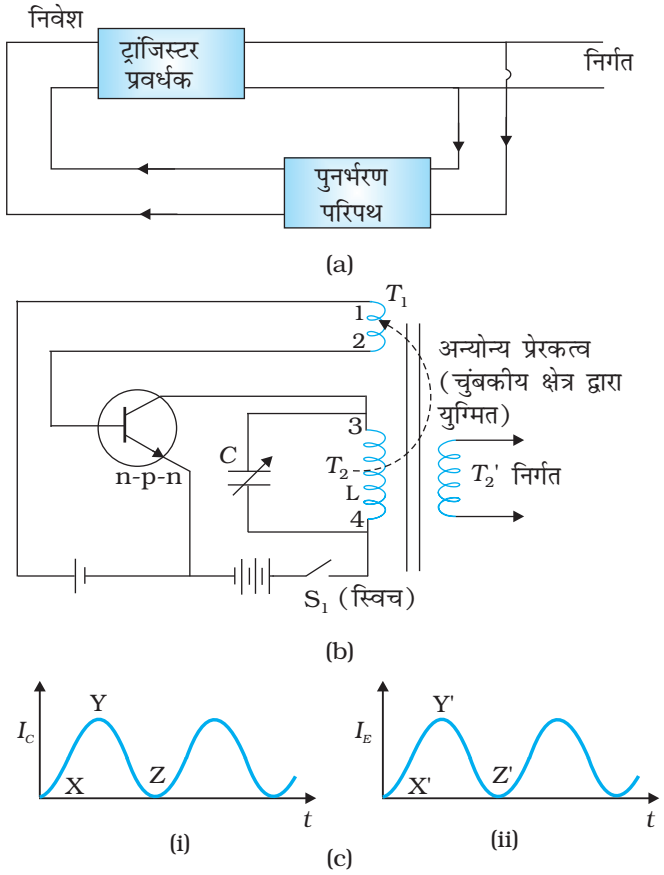
समीकरण 14.16, $R_B = (V_{BB} - V_{BE}) / I_B$. यह मानते हुए कि $V_{BE} = 0.6$ V,

$R_B = (2.0 - 0.6)/0.10 = 14$ kΩ

dc संग्राहक धारा $I_C = 100 \times 0.10 = 10$ mA

14.9.5 पुनर्भरण प्रवर्धक तथा ट्रांज़िस्टर दोलित्र

हमने देखा है कि जब किसी प्रवर्धक में एक ज्यावक्रीय निवेश सिग्नल निवेशित किया जाता है तो वह प्रवर्धित सिग्नल के रूप में निर्गत होता है। इसका अर्थ यह है कि *प्रवर्धक के निर्गत में ac सिग्नल पाने के लिए एक बाहरी निवेश सिग्नल आवश्यक है।* किसी दोलित्र में बाहरी निवेश सिग्नल लगाए बिना ही हमें ac निर्गत मिलता है। दूसरे शब्दों में, दोलित्र का निर्गत सिग्नल *स्वत: प्रतिपालित* होता है। ऐसा पाने के लिए एक प्रवर्धक ही लिया जाता है। निर्गत सिग्नल का एक भाग प्रारंभिक सिग्नल की कला में ही निवेश को वापस पुनर्भरित (फ़ीडबैक) कर दिया जाता है। इस प्रक्रिया को *धनात्मक पुनर्भरण* कहते हैं, जैसा चित्र 14.33 (a) में दिखाया गया है। पुनर्भरण प्रेरकीय युग्मन (अन्योन्य प्रेरकत्व के द्वारा) या *LC* या *RC* परिपथों के द्वारा प्राप्त किया जा सकता है। भिन्न-भिन्न प्रकार के दोलित्रों से निर्गत को निवेश से युग्मित करने के लिए भिन्न-भिन्न विधियों (पुनर्भरण परिपथ) का उपयोग करते हैं। इसके अलावा किसी निश्चित आवृत्ति पर दोलन प्राप्त करने के लिए उपयुक्त अनुनादी परिपथ उपयोग किया जाता है। दोलित्र की क्रिया को समझने के लिए आइए चित्र 14.33(b) में दिखाए गए परिपथ पर विचार करें। एक कुंडली (T_1) से दूसरी कुंडली (T_2) में प्रेरकीय युग्मन द्वारा पुनर्भरण पूरा किया जाता है। ध्यान देने योग्य बात यह है कि यहाँ कुंडलियाँ T_1 तथा T_2 एक ही क्रोड़ पर लपेटी हुई हैं और इसलिए अपने अन्योन्य प्रेरकत्व द्वारा प्रेरकीय-युग्मित हैं। एक प्रवर्धक की भाँति ही, आधार-उत्सर्जक संधि अग्रदिशिक बायस में रहती है जबकि आधार-संग्राहक संधि पश्चदिशिक बायस में रहती है। सरलता की दृष्टि से जो विस्तृत बायस परिपथ वास्तव में उपयोग में लाए जाते हैं उन्हें यहाँ नहीं दर्शाया गया है।



चित्र 14.33 (a) धनात्मक पुनर्भरण वाले एक स्वत: प्रतिपालित ट्रांजिस्टर प्रवर्धक का दोलित्र के रूप में क्रिया करने का सिद्धांत; (b) एक सरल LC दोलित्र (संग्राहक स्वरित्र); तथा (c) प्रेरकीय युग्मन के कारण धारा i_c और i_e का उत्थान एवं पतन (या निर्माण)।

अब हम यह समझने का प्रयास करेंगे कि दोलनों का गठन किस प्रकार से होता है। मान लें कि स्विच S_1 को *ऑन* करे जिससे सर्वप्रथम बायस अनुप्रयुक्त होनी

आरंभ हो सके। स्पष्टतया, ट्रांज़िस्टर में संग्राहक धारा का एक *महोर्मि* (Surge) प्रवाहित होगा। यह धारा कुंडली T_2 से होकर जाती है जिसके सिरों को चित्र 14.33 (b) में संख्या 3 और 4 दी गई है। यह धारा अपने पूरे आयाम पर तत्क्षण नहीं पहुँच पाती, बल्कि X से Y तक धीरे-धीरे बढ़ती है, जैसा चित्र 14.33 (c) (i) में दिखाया गया है। कुंडली T_2 तथा कुंडली T_1 के बीच प्रेरकीय युग्मन के कारण उत्सर्जक परिपथ में एक धारा बहने लगती है (ध्यान दें कि वास्तव में यही निवेश से निर्गत को पुनर्भरण है)। धनात्मक पुनर्भरण के कारण T_1 में यह धारा (उत्सर्जक धारा) भी X′ से Y′ तक बढ़ती है [(चित्र 14.33 (c) (ii) देखें]। संग्राहक परिपथ में जुड़ी हुई कुंडली T_2 में धारा (संग्राहक धारा) Y मान पर पहुँचती है तो ट्रांज़िस्टर *संतृप्त* हो जाता है। इसका अर्थ यह है कि इस समय संग्राहक धारा अपने अधिकतम मान पर है, तथा अब और अधिक नहीं बढ़ सकती। चूँकि अब संग्राहक धारा में और परिवर्तन नहीं हो रहा है, इसलिए T_2 के निकट चुंबकीय क्षेत्र बढ़ना बंद हो जाता है। जैसे ही क्षेत्र स्थिर हो जाएगा, वैसे ही T_2 से T_1 में पुनर्भरण रुक जाएगा। पुनर्भरण बंद होने पर उत्सर्जक धारा कम होनी शुरू हो जाती है। फलस्वरूप, संग्राहक धारा Y से Z की ओर घटती है [चित्र 14.33 (c) (i)]। परंतु, संग्राही धारा के घटने के कारण कुंडली T_2 के निकट चुंबकीय क्षेत्र का क्षय शुरू हो जाता है। इस प्रकार T_1 को T_2 में एक घटता हुआ क्षेत्र दिखता है (प्रारंभिक *स्टार्ट* क्रिया के समय जब क्षेत्र बढ़ रहा था, से यह क्रिया ठीक विपरीत है)। इसके कारण उत्सर्जक धारा उस समय तक और घटती है जब तक यह Z′ पर न पहुँच जाए और ट्रांज़िस्टर *कट-ऑफ़* (विच्छेद) हो जाए। इसका अर्थ है कि I_E तथा I_C दोनों धाराओं का प्रवाह रुक जाता है। इसलिए ट्रांज़िस्टर अपनी प्रारंभिक अवस्था (जब शक्ति प्रथम बार ऑन की गई थी) में वापस लौट आता है। इसके बाद पूरी प्रक्रिया स्वयं स्वत: दोहराती है। अर्थात, ट्रांज़िस्टर पहले संतृप्त अवस्था में जाता है, फिर कट-ऑफ़ में और फिर वापस संतृप्त अवस्था में लौट आता है। संतृप्त अवस्था से कट-ऑफ़ और फिर वापस आने तक की क्रिया में लगा समय टैंक-परिपथ या समस्वरित परिपथ (कुंडली T_2 का प्रेरकत्व L तथा संधारित्र C पार्श्वक्रम में संयोजित हैं) के स्थिरांकों पर निर्भर करता है। इस समस्वरित परिपथ की अनुनादी आवृत्ति (ν) ही वह आवृत्ति है जो निर्धारित करती है कि दोलन किस आवृत्ति पर दोलित होगा

$$\nu = \left(\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}\right) \qquad (14.20)$$

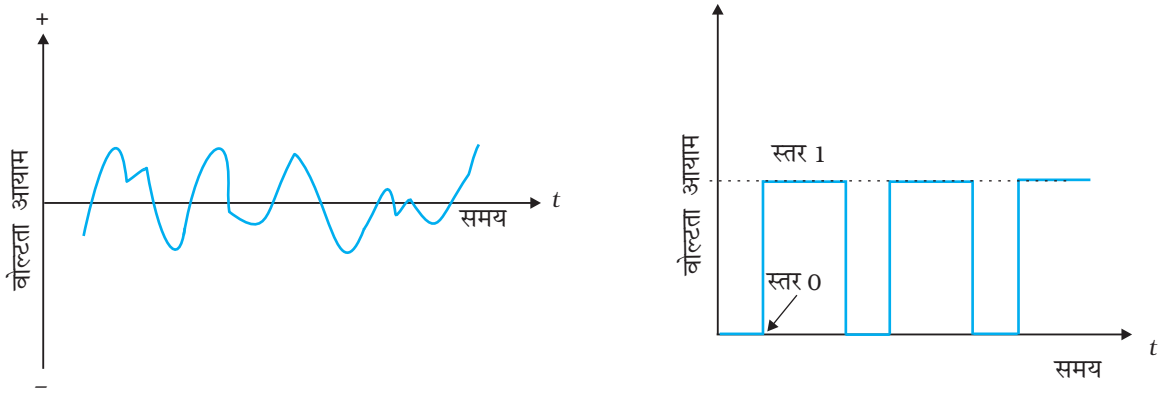
चित्र 14.33 (b) के परिपथ में टैंक या समस्वरित परिपथ संग्राहक की ओर जोड़ा गया है। इसलिए इसे *समस्वरित संग्राहक दोलित्र* कहते हैं। यदि समस्वरित परिपथ आधार की ओर हो तो इसे *समस्वरित आधार दोलित्र* कहेंगे। कई दूसरे प्रकार के टैंक परिपथ (जैसे *RC*) या पुनर्भरण परिपथ भी होते हैं जिनसे विभिन्न प्रकार के दोलित्र बनते हैं जैसे कॉलपिट दोलित्र, हार्टले दोलित्र, *RC*-दोलित्र आदि।

14.10 अंकक इलेक्ट्रॉनिकी तथा तर्क (लॉजिक) गेट

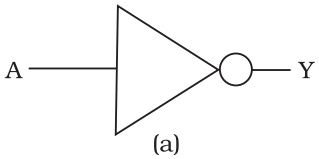
पिछले अनुभागों में जिन प्रवर्धकों, दोलित्रों जैसे इलेक्ट्रॉनिक परिपथों से आपका परिचय कराया गया था उनमें वोल्टता अथवा विद्युतधाराओं के सिग्नल सतत काल परिवर्तनीय वोल्टताओं अथवा धाराओं के रूप में थे। इस प्रकार के सिग्नलों को संतत अथवा *अनुरूप सिग्नल* कहते हैं। चित्र 14.34(a) में एक ऐसा ही प्रारूपिक अनुरूप सिग्नल दर्शाया गया है। चित्र 14.34(b) में एक स्पंद तरंग रूप दर्शाया गया है जिसमें वोल्टता के केवल विविक्त मान ही संभव हैं। इस प्रकार के सिग्नलों को निरूपित करने के लिए द्विआधारी अंकों का उपयोग सरल होता है। द्विआधारी अंकन प्रणाली में केवल दो ही अंक '0' (जैसे, 0 V) तथा '1' (जैसे, 5 V) होते हैं। अंकक इलेक्ट्रॉनिकी में हम केवल, चित्र 14.34(b) में दर्शाए अनुसार, इन्हीं दो वोल्टता स्तरों का उपयोग करते हैं। इन सिग्नलों को अंकीय *सिग्नल कहते* हैं। अंकीय परिपथों में निवेशी तथा निर्गत वोल्टताओं के केवल दो मान ही (जिन्हें 0 तथा 1 से निरूपित किया जाता है) अनुमेय हैं।

इस अनुभाग का उद्देश्य अंकक इलेक्ट्रॉनिकी को समझने के लिए प्रथम चरण प्रदान करना है। यहाँ हम अपने अध्ययन को अंकक इलेक्ट्रॉनिकी के कुछ मूलभूत रचनाखंडों (जिन्हें *लॉज़िक गेट* कहते हैं) तक ही सीमित रखेंगे। ये रचनाखंड विशिष्ट ढंग से अंकीय सिग्नलों को संसाधित करते हैं। लॉजिक गेटों का उपयोग कैलकुलेटरों, अंकीय घड़ियों, कंप्यूटरों, रोबोटों, औद्योगिक नियंत्रण प्रणालियों तथा दूरसंचारों में किया जाता है।

अंकीय परिपथ के रूप में हम अपने घरों में उपयोग होने वाले स्विचों का उदाहरण ले सकते हैं। स्विच की स्थिति के अनुसार प्रकाश 'ऑन' अथवा 'ऑफ़' पर निर्भर करता है। जब प्रकाश 'ऑन' होता है तो निर्गत मान '1' होता है तथा जब प्रकाश 'ऑफ़' होता है, तो निर्गत मान '0' होता है। निवेश प्रकाश स्विच की स्थितियाँ हैं। प्रकाश को क्रियाशील बनाने के लिए स्विच को या तो 'ऑन' अथवा 'ऑफ़' की स्थितियों में रखते हैं।



चित्र 14.34 (a) अनुरूप सिग्नल (b) अंकीय सिग्नल।



(a)

निवेश	निर्गत
A	Y
0	1
1	0

(b)

चित्र 14.35
NOT गेट की (a) तर्क प्रतीक (b) सत्यमान सारणी।

14.10.1 लॉज़िक गेट

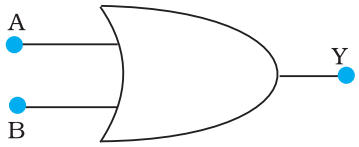
गेट एक ऐसा अंकीय परिपथ (Digital circuit) होता है जो निवेशी तथा निर्गत वोल्टताओं के बीच किसी निश्चित तार्किक संबंध का पालन करता है। इसीलिए व्यापक रूप में इन्हें *लॉजिक गेट* कहते हैं। गेट कहने का कारण यह है कि ये सूचना के प्रवाह को नियंत्रित करते हैं। व्यापक रूप में उपयोग किए जाने वाले पाँच लॉजिक गेट NOT, AND, OR, NAND तथा NOR हैं। प्रत्येक लॉजिक गेट को किसी प्रतीक द्वारा इंगित करते हैं तथा इसके प्रकार्य को एक सत्यमान सारणी द्वारा परिभाषित किया जाता है जो सभी संभव निवेशी तर्क स्तर संयोजनों तथा उनके अपने-अपने निर्गत तर्क स्तरों को दर्शाती है। सत्यमान सारणी लॉजिक गेटों के व्यवहार को समझने में सहायता करती है। इन लॉजिक गेटों को अर्धचालक युक्तियों का उपयोग करके बनाया जा सकता है।

(i) NOT गेट

यह सर्वाधिक मूलभूत गेट है जिसमें केवल एक निवेश तथा एक निर्गत होता है। यह यदि निवेश '0' है तो '1' निर्गत उत्पन्न करता है तथा यदि निवेश '1' है तो '0' निर्गत उत्पन्न करता है। अर्थात यह किसी निवेश का अपने निर्गत पर व्युत्क्रमित रूपांतर उत्पन्न करता है। यही कारण है कि इसे *उत्क्रमक* या *प्रतिलोमक* भी कहते हैं। चित्र 14.35 में इस द्वार का व्यापक रूप में उपयोग होने वाला प्रतीक तथा उसकी सत्यमान सारणी दी गयी है।

(ii) OR गेट

किसी *OR* गेट के एक निर्गत के साथ दो या अधिक निवेश होते हैं। चित्र 14.36 में इस द्वार का तर्क प्रतीक तथा सत्यमान सारणी दर्शायी गयी है। इसमें निर्गत Y '1' है जब या तो निवेश A अथवा निवेश B 1 हैं, या दोनों 1 हैं अर्थात यदि कोई भी निवेश उच्च है तो निर्गत उच्च होता है।



(a)

निवेश		निर्गत
A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

(b)

चित्र 14.36 (a) *OR* गेट का तर्क प्रतीक (b) *OR* गेट की सत्यमान सारणी।

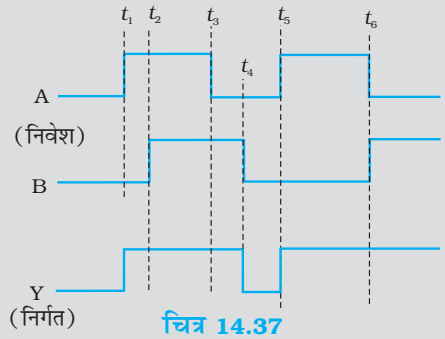
उपरोक्त गणितीय तार्किक संक्रियाओं के अतिरिक्त इस गेट का उपयोग स्पंद तरंगरूप को संशोधित करने में किया जा सकता है। इसे निम्नलिखित उदाहरण में स्पष्ट किया गया है।

उदाहरण 14.11 चित्र 14.37 में दिए गए निवेश A तथा B के लिए 'OR' गेट के निर्गत तरंगरूप को न्यायोचित ठहराइए।

हल निम्नलिखित पर ध्यान दीजिए

- $t < t_1$ पर, A = 0, B = 0; इसलिए Y = 0
- t_1 से t_2 तक, A = 1, B = 0; इसलिए Y = 1
- t_2 से t_3 तक, A = 1, B = 1; इसलिए Y = 1
- t_3 से t_4 तक, A = 0, B = 1; इसलिए Y = 1
- t_4 से t_5 तक, A = 0, B = 0; इसलिए Y = 0
- t_5 से t_6 तक, A = 1, B = 0; इसलिए Y = 1
- $t > t_6$ के लिए, A = 0, B = 1; इसलिए Y = 1

इसलिए Y का तरंगरूप वैसा ही होगा जैसा चित्र 14.37 में दिखाया गया है।

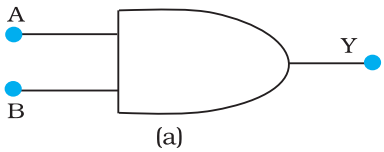


चित्र 14.37

उदाहरण 14.11

(iii) AND गेट

किसी *AND* गेट में दो या अधिक निवेश तथा एक निर्गत होते हैं। AND गेट का निर्गत Y केवल 1 होता है जब निवेश A तथा निवेश B दोनों 1 हैं। इस गेट का तर्क प्रतीक तथा सत्यमान सारणी चित्र 14.38 में दर्शायी गई हैं।



(a)

निवेश		निर्गत
A	B	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

(b)

चित्र 14.38 AND गेट का (a) तर्क प्रतीक तथा (b) सत्यमान सारणी।

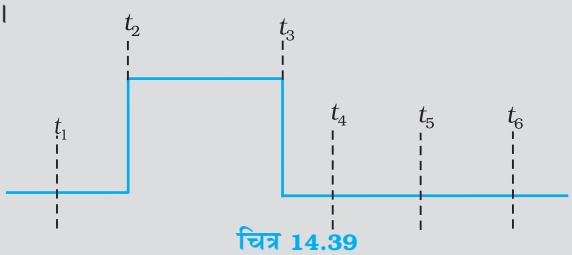
उदाहरण 14.12

उदाहरण 14.12 A और B निवेश के तरंगरूपों को उदाहरण 14.11 के समान लीजिए। AND गेट से प्राप्त निर्गत तरंगरूप को स्केच कीजिए।

हल

- $t \le t_1$ के लिए; A = 0, B = 0; इसलिए Y = 0
- t_1 से t_2 तक; A = 1, B = 0; इसलिए Y = 0
- t_2 से t_3 तक; A = 1, B = 1; इसलिए Y = 1
- t_3 से t_4 तक; A = 0, B = 1; इसलिए Y = 0
- t_4 से t_5 तक; A = 0, B = 0; इसलिए Y = 0
- t_5 से t_6 तक; A = 1, B = 0; इसलिए Y = 0
- $t > t_6$ के लिए; A = 0, B = 1; इसलिए Y = 0

इसके आधार पर, AND गेट का निर्गत तरंगरूप नीचे चित्र में दर्शाए अनुसार खींचा जा सकता है।

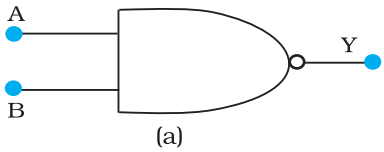


चित्र 14.39

(iv) NAND गेट

यह एक AND गेट है जिसका NOT द्वार अनुगमन करता है। यदि निवेश A तथा B दोनों '1' हैं तो निर्गत '1' नहीं होता। इस गेट को यह नाम इसके NOT AND व्यवहार के कारण दिया गया है। चित्र 14.40 में NAND गेट का तर्क प्रतीक तथा सत्यमान सारणी दर्शायी गई है।

NAND गेटों को सार्वत्रिक गेट या सार्व प्रयोजक गेट भी कहते हैं, क्योंकि इन गेटों के प्रयोग से आप अन्य मूलभूत गेट जैसे OR, AND तथा NOT प्राप्त कर सकते हैं (अभ्यास 14.16 तथा 14.17 देखिए)।



(a)

निवेश		निर्गत
A	B	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

(b)

चित्र 14.40 NAND गेट का (a) तर्क प्रतीक तथा (b) सत्यमान सारणी।

उदाहरण 14.13

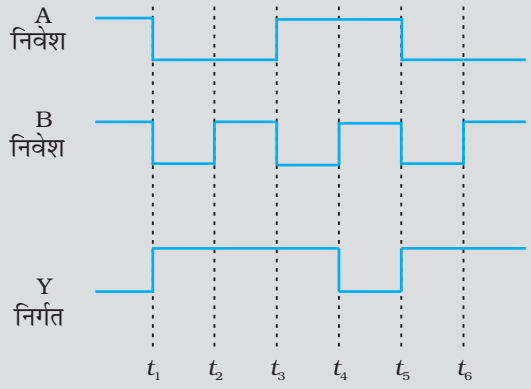
उदाहरण 14.13 नीचे दिखाए गए निवेश A तथा B के लिए NAND गेट के निर्गत Y को स्केच कीजिए।

हल

- $t < t_1$ के लिए; A = 1, B = 1; इसलिए Y = 0
- t_1 से t_2 तक; A = 0, B = 0; इसलिए Y = 1
- t_2 से t_3 तक; A = 0, B = 1; इसलिए Y = 1
- t_3 से t_4 तक; A = 1, B = 0; इसलिए Y = 1

उदाहरण 14.13

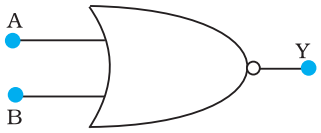
- t_4 से t_5 तक; A = 1, B = 1; इसलिए Y = 0
- t_5 से t_6 तक; A = 0, B = 0; इसलिए Y = 1
- $t > t_6$ के लिए; A = 0, B = 1; इसलिए Y = 1



चित्र 14.41

(v) NOR गेट

इसके दो या अधिक निवेश तथा एक निर्गत होता है। OR गेट के पश्चात एक NOT संक्रिया अनुप्रयुक्त करने से NOT-OR गेट (अथवा केवल NOR गेट) प्राप्त होता है। जब दोनों निवेश A तथा B '0' होते हैं तो निर्गत Y केवल '1' होता है, अर्थात न तो एक निवेश और न ही अन्य निवेश '1' है। चित्र 14.41 में NOR गेट का तर्क प्रतीक तथा सत्यमान सारणी दर्शायी गयी है।



(a)

निवेश		निर्गत
A	B	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

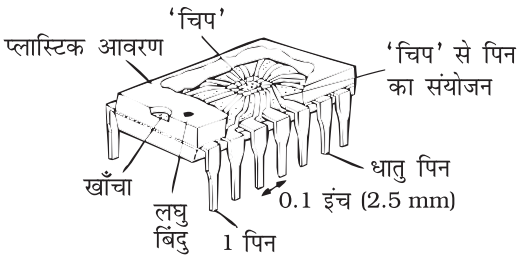
(b)

चित्र 14.42 NOR द्वार का (a) तर्क प्रतीक तथा (b) सत्यमान सारणी।

NOR द्वारों को सार्वत्रिक द्वार अथवा सार्व प्रयोजक द्वार माना जाता है। क्योंकि केवल NOR गेटों के उपयोग से आप सभी गेटों जैसे AND, OR, तथा NOT प्राप्त कर सकते हैं (अभ्यास 14.18 तथा 14.19 देखिए)

14.11 एकीकृत परिपथ

परिपथों को बनाने की परंपरागत विधि इस प्रकार है : डायोड, ट्रांज़िस्टर, *R*, *L*, *C* आदि घटकों को चुनकर उन्हें वांछित ढंग से तारों द्वारा सोल्डर करके जोड़ा जाता है। ट्रांज़िस्टर के आविष्कार के बाद जो लघुरूपण लाया जा सका उसका अनुप्रयोग करने पर भी ऐसे परिपथ स्थूल होते थे। इसके अतिरिक्त ऐसे परिपथ कम विश्वसनीय तथा कम प्रघात-रोधी होते थे। एक *संपूर्ण परिपथ* (जिसमें बहुत से अक्रिय घटक जैसे *R* और *C* तथा सक्रिय युक्तियाँ जैसे डायोड और ट्रांज़िस्टर हों) को अर्द्धचालक के किसी छोटे एकल ब्लॉक (या चिप) के ऊपर निर्मित करने की धारणा ने इलेक्ट्रॉनिक प्रौद्योगिकी में क्रांति ला दी है। ऐसे परिपथ को *एकीकृत परिपथ* (इंटीग्रेटेड सर्किट-IC) कहते हैं। सबसे विस्तृत रूप से प्रयोग की जाने वाली प्रौद्योगिकी, *मोनोलिथिक एकीकृत परिपथ* है। *मोनोलिथिक* शब्द दो ग्रीक शब्दों का संयोजन है, *मोनोस* (monos) का अर्थ



चित्र14.43 'चिप' का आवरण तथा उसके संयोजन

होता है एकल और *लिथोस* (lithos) का अर्थ होता है पत्थर। प्रभावत: इसका यह अर्थ है कि संपूर्ण परिपथ किसी एकल सिलिकॉन क्रिस्टल (या *चिप*) पर निर्मित है। *चिप* की विमाएँ बहुत छोटी, लगभग 1 mm × 1 mm या इससे भी छोटी हो सकती हैं। चित्र 14.43 में ऐसी ही एक चिप अपने संरक्षी प्लास्टिक आवरण में दर्शायी गई है। इसके कुछ भाग से प्लास्टिक आवरण हटा दिया गया है ताकि चिप से बाहर पिन तक आने वाले संयोजन को दर्शाया जा सके। इन पिनों से ही बाह्य संयोजन बनाते हैं।

निवेश सिग्नलों की प्रकृति के आधार पर एकीकृत परिपथों को दो वर्णों में बाँटा जा सकता है: (a) रैखिक अथवा अनुरूप एकीकृत परिपथ तथा (b) आंकिक एकीकृत परिपथ। रैखिक एकीकृत परिपथ अनुरूप सिग्नलों को संसाधित करके अधिकतम तथा न्यूनतम मानों के परिसर में परिवर्तित कर उन्हें निर्बाध तथा संतत बना देते हैं। निर्गत कुछ अंश तक निवेश के अनुक्रमानुपाती होता है, अर्थात वह निवेश के साथ रैखिकत: परिवर्तित होता है। रैखिक एकीकृत परिपथों में सबसे अधिक उपयोगी *संक्रियात्मक प्रवर्धक* (Operational amplifier) है।.

आंकिक एकीकृत परिपथ उन सिग्नलों का संसाधन करते हैं जिनके केवल दो मान होते हैं। इनमें लॉज़िक गेटों जैसे परिपथ होते हैं। एकीकरण के स्तर (अर्थात एकीकृत परिपथ में परिपथ अवयवों या लॉज़िक गेटों की संख्या) के आधार पर एकीकृत परिपथों का नामकरण किया जाता है। जैसे कुछ IC को स्माल स्केल इंटीग्रेशन, SSI (लॉज़िक गेटों की संख्या ≤ 10)कहते हैं तो कुछ अन्य मीडियम स्केल इंटीग्रेशन, MSI (लॉज़िक गेटों की संख्या ≤ 100), लार्ज स्केल इंटीग्रेशन, LSI (लॉज़िक गेटों की संख्या ≤ 1000) तथा वेरी लार्ज स्केल इंटीग्रेशन, VLSI (लॉज़िक गेटों की संख्या ≥ 1000)। एकीकृत परिपथों के निर्माण की प्रौद्योगिकी बहुत जटिल है परंतु बृहत स्तर पर औद्योगिक उत्पादन होने से ये अत्यधिक सस्ते हो गए हैं।

तीव्रतर एवं लघुतर : कंप्यूटर प्रौद्योगिकी का भविष्य

सभी कंप्यूटर प्रणालियों के हृदय पर एकीकृत परिपथ (IC) होता है। वास्तव में लगभग सभी वैद्युत युक्तियों जैसे कार, टेलीविज़न, CD प्लेयर, सेल फोन आदि में एकीकृत परिपथ (IC) लगे होते हैं। जिस लघुकरण के कारण आधुनिक निजी कंप्यूटर बनना संभव हो पाया उसकी रचना बिना IC के संभव नहीं हो सकती थी। IC ऐसी इलेक्ट्रॉनिक युक्तियाँ हैं जिनमें बहुत से ट्रांज़िस्टर, प्रतिरोधक, संधारित्र, संयोजी तार-सभी एक ही पैकेज़ में होते हैं। आपने 'माइक्रोप्रोसेसर' के विषय में सुना होगा। माइक्रोप्रोसेसर एक ऐसा IC होता है जो किसी कंप्यूटर में सभी सूचनाओं को संसाधित करता है जैसे यह खोज खबर रखना कि कौन सी कुंजी दबाई गई, कौन सा कार्यक्रम चलना है, खेल आदि। IC का सर्वप्रथम आविष्कार सन् 1958 में टेक्सास इंस्ट्रूमैंट पर जैक किल्की द्वारा किया गया जिसके लिए उन्हें सन् 2000 में नोबेल पुरस्कार प्रदान किया गया। IC का निर्माण अर्धचालक क्रिस्टलों के टुकड़ों (अथवा चिप) पर फोटोलिथोग्राफ़ी प्रक्रिया द्वारा किया जाता है। इस प्रकार समस्त सूचना प्रौद्योगिकी उद्योग (IT industry) अर्धचालकों पर निर्भर है। पिछले कई वर्षों में IC की जटिलताएँ बढ़ गई हैं जबकि इसके लक्षणों की आमाप निरंतर सिकुड़ रही है। पिछले पाँच दशकों में कंप्यूटर प्रौद्योगिकी में नाटकीय लघुकरण ने आधुनिक कंप्यूटर को तीव्रतर एवं लघुतर बना दिया है। INTEL के सहसंस्थापक गॉर्डन मूरे ने सन् 1970 में यह बताया था कि किसी चिप (IC) की स्मृति क्षमता हर डेढ़ वर्ष में लगभग दो गुनी हो जाती है। यह *मूरे के नियम* नाम से प्रचलित है। प्रति चिप ट्रांज़िस्टरों की संख्या में चरघातांकी रूप से वृद्धि हो रही है तथा वर्ष-दर-वर्ष कंप्यूटरों की क्षमता में वृद्धि हो रही है, फिर भी ये पहले की अपेक्षा अब सस्ते हैं। वर्तमान प्रवृत्ति के आधार पर ऐसे संकेत मिल रहे हैं कि सन् 2020 में उपलब्ध कंप्यूटर 40 GHz (40,000 MHz) पर प्रचालित होंगे, आमाप में कहीं छोटे, अधिक दक्ष, तथा आज के कंप्यूटरों की तुलना में कहीं सस्ते होंगे। अर्धचालक उद्योग तथा कंप्यूटर प्रौद्योगिकी में विस्फोटक वृद्धि को गॉर्डन मूरे के विख्यात उद्धरण द्वारा सबसे अच्छे ढंग से इस प्रकार व्यक्त किया जा सकता है: "यदि स्वचालित वाहन उद्योग अर्धचालक उद्योग की भाँति प्रगति करे तो कोई रॉल्स रॉयस (Rolls Royce) कार प्रति गैलन 5 लाख मील तय करेगी और उसे पार्क करने की अपेक्षा फेंकना सस्ता होगा।"

सारांश

1. अर्धचालक वर्तमान ठोस अवस्था अर्धचालक इलेक्ट्रॉनिक युक्तियों; जैसे– डायोड, ट्रांज़िस्टर, एकीकृत परिपथ इत्यादि में प्रयुक्त मूल पदार्थ हैं।
2. अवयव तत्वों की जालक संरचना एवं परमाणु संरचना सुनिश्चित करती है कि दिया गया विशेष पदार्थ विद्युतरोधी, धातु अथवा अर्धचालक होगा।
3. धातुओं की प्रतिरोधकता बहुत कम (10^{-2} से $10^{-8}\ \Omega m$) है, विद्युतरोधी पदार्थों की प्रतिरोधकता बहुत अधिक ($>10^{8}\ \Omega m^{-1}$) है, जबकि अर्धचालकों की प्रतिरोधकता धातुओं और विद्युतरोधी पदार्थों के मध्य होती है।
4. अर्धचालक तात्विक (Si, Ge) साथ ही साथ यौगिक (GaAs, CdS इत्यादि) हैं।
5. शुद्ध अर्धचालक 'नैज अर्धचालक' कहलाते हैं। आवेश वाहकों (इलेक्ट्रॉन और होल) की उपस्थिति पदार्थ का 'नैज' गुण है और ये ऊष्मीय उत्तेजन के परिणामस्वरूप प्राप्त होते हैं। नैज अर्धचालकों में इलेक्ट्रॉनों की संख्या (n_e) होलों की संख्या n_h समान होती है। होल आवश्यक रूप से प्रभावी धनावेश युक्त इलेक्ट्रॉन रिक्तियाँ हैं।
6. शुद्ध अर्धचालकों में उपयुक्त अपद्रव्य के 'अपमिश्रण' से आवेश वाहकों की संख्या परिवर्तित की जा सकती है। ऐसे अर्धचालकों को अपद्रव्यी अर्धचालक कहते हैं। ये दो प्रकार (n- प्रकार और p- प्रकार) के होते हैं।
7. n- प्रकार के अर्धचालक में $n_e >> n_h$ जबकि p- प्रकार के अर्धचालक में $n_h >> n_e$ होता है।
8. n- प्रकार के अर्धचालक में Si अथवा Ge को पंचसंयोजी परमाणु (दाता) जैसे As, Sb, P इत्यादि के साथ अपमिश्रण से प्राप्त किया जाता है, जबकि p- प्रकार का अर्धचालक Si अथवा Ge को त्रिसंयोजी परमाणु (ग्राही) जैसे B, Al, In इत्यादि के अपमिश्रण से प्राप्त किया जाता है।
9. सभी दशाओं में $n_e n_n = n_i^2$। इसके अतिरिक्त पदार्थ पूर्णतया *विद्युत उदासीन* होता है।
10. पदार्थ के दो भिन्न ऊर्जा बैंड (संयोजकता बैंड और चालन बैंड) होते हैं, जिनमें इलेक्ट्रॉन रहते हैं। संयोजकता बैंड की ऊर्जा चालन बैंड की ऊर्जा की अपेक्षा कम है। संयोजकता बैंड में सभी ऊर्जा स्तर पूर्ण हैं जबकि चालन बैंड पूर्णतया रिक्त अथवा आंशिक रूप से पूरित हो सकते हैं। किसी ठोस के चालन बैंड में इलेक्ट्रॉन गति करने के लिए मुक्त होते हैं और चालकता के लिए उत्तरदायी होते हैं। चालकता की सीमा संयोजकता बैंड (E_v) के शीर्ष और चालन बैंड (E_c) के तल के मध्य ऊर्जा-अंतराल E_g पर निर्भर करती है। संयोजकता बैंड से इलेक्ट्रॉन ऊष्मा, प्रकाश अथवा विद्युत ऊर्जा द्वारा चालन बैंड में उत्तेजित किए जा सकते हैं, जो अर्धचालक में प्रवाहित धारा में परिवर्तन उत्पन्न करते हैं।
11. विद्युत-रोधी हेतु $E_g > 3$ eV, अर्धचालक हेतु $E_g = 0.2$ eV से 3 eV, जबकि धातुओं के लिए $E_g \approx 0$ है।
12. p-n संधि सभी अर्धचालक युक्तियों की मूल है। जब ऐसी संधि बनती है तो इलेक्ट्रॉन अथवा होल रहित अचल आयन क्रोड़ की एक 'ह्रासी स्तर' बन जाता है जो 'संधि विभव रोधक' हेतु उत्तरदायी है।
13. बाह्य अनुप्रयुक्त वोल्टता को परिवर्तित करके संधि विभव रोधक को परिवर्तित किया जा सकता है। अग्रदिशिक बायस (n- फलक बैटरी के ऋणात्मक सिरे से और p- फलक बैटरी के धनात्मक सिरे से संबद्ध है) में रोधिका कम हो जाती है, जबकि पश्चदिशिक बायस में वृद्धि हो जाती है। अत: किसी p-n संधि डायोड में अग्रदिशिक बायस धारा का मान अधिक (mA में) होता है जबकि पश्चदिशिक बायस धारा का मान बहुत कम (μA में) होता है।

14. डायोड को प्रत्यावर्ती (ac) वोल्टता के दिष्टकरण (प्रत्यावर्ती धारा को एक दिशा में प्रतिबंधित करने) हेतु प्रयोग में लाया जा सकता है। संधारित्र अथवा उपयुक्त फिल्टर के प्रयोग से दिष्ट धारा dc वोल्टता प्राप्त की जा सकती है।
15. कुछ विशिष्ट प्रयोजन डायोड भी होते हैं।
16. ज़ेनर डायोड एक ऐसा ही विशिष्ट प्रयोजन डायोड है। ज़ेनर डायोड में, पश्चदिशिक बायस में एक निश्चित वोल्टता के पश्चात धारा एकाएक बढ़ती है (भंजन वोल्टता)। जेनर डायोड का यह गुण *वोल्टता नियंत्रक* के रूप में प्रयोग किया जाता है।
17. p-n संधि को बहुत सी फ़ोटॉनी अथवा प्रकाश इलेक्ट्रॉनिक युक्तियाँ प्राप्त करने हेतु भी प्रयोग किया गया है, जहाँ भाग लेने वाले तत्त्वों में से एक तत्त्व फ़ोटॉन है। (a) फ़ोटोडायोड, जिसमें फ़ोटॉन उत्तेजन का परिणाम प्रतीप संतृप्त धारा परिवर्तन है, प्रकाश की तीव्रता मापन में सहायक होता है। (b) सौर सेल फ़ोटॉन ऊर्जा को विद्युत-ऊर्जा में परिवर्तित करता है। (c) प्रकाश उत्सर्जक डायोड और डायोड लेसर जिनमें बायस वोल्टता द्वारा इलेक्ट्रॉन उत्तेजन के कारण प्रकाश का उत्पादन होता है।
18. ट्रांज़िस्टर एक n-p-n अथवा p-n-p संधि युक्ति है। मध्य ट्रांज़िस्टर ब्लॉक (पतला और अल्प मादित) 'आधार' जबकि अन्य दूसरे इलेक्ट्रोड 'उत्सर्जक' और 'संग्राहक' कहलाते हैं। उत्सर्जक-आधार संधि, अग्रदिशिक बायसित, जबकि संग्राहक-आधार संधि पश्चदिशिक बायसित होता है।
19. ट्रांज़िस्टर इस प्रकार से संयोजित किया जाता है कि C अथवा E अथवा B निवेश और निर्गत दोनों के उभयनिष्ठ हो सकता है। अतः, ट्रांज़िस्टर तीन विन्यासों में प्रयुक्त किया जा सकता है - उभयनिष्ठ उत्सर्जक (CE), उभयनिष्ठ संग्राहक (CC) और उभयनिष्ठ आधार (CB)। नियत I_B के लिए I_C और V_{CE} के मध्य आलेख निर्गत अभिलाक्षणिक कहलाता है, जबकि नियत V_{CE} के लिए I_B और V_{BE} के मध्य आलेख निवेशी अभिलाक्षणिक कहलाता है। CE-विन्यास हेतु महत्वपूर्ण ट्रांज़िस्टर प्राचल हैं:

निवेशी प्रतिरोध, $r_i = \left(\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B}\right)_{V_{CE}}$

निर्गत प्रतिरोध, $r_o = \left(\frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C}\right)_{I_B}$

धारा प्रवर्धन गुणक, $\beta = \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}\right)_{V_{CE}}$

20. ट्रांज़िस्टर को एक प्रवर्धक और दोलित्र की भाँति प्रयोग किया जा सकता है। वास्तव में, दोलित्र को एक ऐसे स्वपोषी प्रवर्धक की भाँति भी माना जा सकता है जिसमें निर्गत के अंश किसी को निवेश में समान कला (धनात्मक पुनर्भरण) में पुनर्भरण किया जाता है। उभयनिष्ठ उत्सर्जक विन्यास में ट्रांज़िस्टर प्रवर्धक की वोल्टता लब्धि है : $A_v = \left(\frac{v_o}{v_i}\right) = \beta\frac{R_C}{R_B}$, जहाँ R_C और R_B क्रमशः परिपथ के संग्राहक और आधार की ओर के प्रतिरोध हैं।
21. जब ट्रांज़िस्टर का उपयोग अंतक अथवा संतृप्त अवस्था में करते हैं तो वह स्विच की भाँति कार्य करता है।
22. कुछ विशेष परिपथ हैं जो 0 और 1 स्तर से बने हुए अंकीय डाटा का संचालन करते हैं। यह अंकीय इलेक्ट्रॉनिक के विषय का सृजन करता है।
23. विशेष तर्क संक्रिया पालन करने वाले महत्वपूर्ण अंकीय परिपथ तर्क द्वार (Logic gates) कहलाते हैं। ये OR, AND, NOT, NAND और NOR गेट हैं।
24. आधुनिक युग के परिपथ में, कई तर्कसंगत गेट अथवा परिपथों को एक एकल 'चिप' में एकीकृत करते हैं, जिन्हें एकीकृत परिपथ (IC) कहते हैं।

विचारणीय विषय

1. अर्धचालकों में ऊर्जा बैंड (E_C अथवा E_V) दिक्‌विस्थानित हैं, जिसका तात्पर्य है कि ये ठोस में किसी विशिष्ट स्थान में स्थित नहीं हैं। ऊर्जाएँ समग्र माध्य हैं। जब आप एक चित्र देखते हैं जिसमें E_C अथवा E_V सरल रेखाएँ खींची गई हैं तब उन्हें क्रमशः चालन बैंड ऊर्जा स्तर के *तल* पर और संयोजकता बैंड ऊर्जा स्तर के *शीर्ष* पर लेना चाहिए।
2. तात्विक अर्धचालकों (Si अथवा Ge) में और p- अर्धचालकों में अपमिश्रकों को दोष के रूप में सन्निविष्ट करके प्राप्त करते हैं। यौगिक अर्धचालकों में सापेक्ष रससमीकरणमितीय अनुपात में परिवर्तन अर्धचालक के प्रकार में भी परिवर्तन कर सकता है। उदाहरणार्थ, आदर्श GaAs में Ga और As का अनुपात 1 : 1 है, परंतु GaAs में Ga-प्रचुर वाला अथवा As-प्रचुर वाला क्रमशः $Ga_{1.1}As_{0.9}$ अथवा $Ga_{0.9}As_{1.1}$ हो सकता है। सामान्यतः दोषों की उपस्थिति अर्धचालकों के गुणों को कई प्रकार से नियंत्रित करती है।
3. ट्रांज़िस्टर में आधार क्षेत्र बारीक और अल्प मादित होता है, अन्यथा निवेश की ओर से आने वाले इलेक्ट्रॉन अथवा होल (मान लीजिए CE-विन्यास में उत्सर्जक) संग्राहक तक पहुँच नहीं सकते।
4. हमने दोलित्र का एक धनात्मक पुनर्भरण प्रवर्धक के रूप में उल्लेख किया है। स्थायी दोलनों हेतु, निर्गम वोल्टता (V_O) से वोल्टता पुनर्भरण (V_{fb}) इस प्रकार होना चाहिए कि प्रवर्धन (A) के पश्चात यह पुनः V_O हो जाना चाहिए। यदि कोई अंश β' का पुनर्भरण हो तब $V_{fb} = V_O . \beta'$ और प्रवर्धन के पश्चात इसका मान $A(v_o.\beta')$ के बराबर होना चाहिए। इसका अर्थ है कि स्थायी दोलनों के प्रतिपालन हेतु कसौटी $A\beta' = 1$ है। यह बार्कहाउज़ेन कसौटी कहलाती है।
5. दोलित्र में पुनर्भरण समान कला (धनात्मक पुनर्भरण) में है। यदि पुनर्भरण वोल्टता विपरीत कला (ऋणात्मक पुनर्भरण) में है, तो लब्धि 1 से कम है और यह कभी भी दोलित्र की भाँति कार्य नहीं कर सकता है। अपितु यह एक कम लब्धि वाला प्रवर्धक होगा। यद्यपि, ऋणात्मक पुनर्भरण प्रवर्धक में नॉयज (रव) और विरूपण को भी कम करता है, जो एक लाभदायक लक्षण है।

अभ्यास

14.1 किसी n- प्रकार के सिलिकॉन में निम्नलिखित में से कौन-सा प्रकथन सत्य है ?
(a) इलेक्ट्रॉन बहुसंख्यक वाहक हैं और त्रिसंयोजी परमाणु अपमिश्रक हैं।
(b) इलेक्ट्रॉन अल्पसंख्यक वाहक हैं और पंचसंयोजी परमाणु अपमिश्रक हैं।
(c) होल (विवर) अल्पसंख्यक वाहक हैं और पंचसंयोजी परमाणु अपमिश्रक हैं।
(d) होल (विवर) बहुसंख्यक वाहक हैं और त्रिसंयोजी परमाणु अपमिश्रक हैं।

14.2 अभ्यास 14.1 में दिए गए कथनों में से कौन-सा p-प्रकार के अर्धचालकों के लिए सत्य है?

14.3 कार्बन, सिलिकॉन और जर्मेनियम, प्रत्येक में चार संयोजक इलेक्ट्रॉन हैं। इनकी विशेषता ऊर्जा बैंड अंतराल द्वारा पृथक्कृत संयोजकता और चालन बैंड द्वारा दी गई हैं, जो क्रमशः $(E_g)_C$, $(E_g)_{Si}$ तथा $(E_g)_{Ge}$ के बराबर हैं। निम्नलिखित में से कौन-सा प्रकथन सत्य है?
(a) $(E_g)_{Si} < (E_g)_{Ge} < (E_g)_C$
(b) $(E_g)_C < (E_g)_{Ge} > (E_g)_{Si}$
(c) $(E_g)_C > (E_g)_{Si} > (E_g)_{Ge}$
(d) $(E_g)_C = (E_g)_{Si} = (E_g)_{Ge}$

14.4 बिना बायस p-n संधि से, होल p- क्षेत्र में n- क्षेत्र की ओर विसरित होते हैं, क्योंकि
(a) n- क्षेत्र में मुक्त इलेक्ट्रॉन उन्हें आकर्षित करते हैं।
(b) ये विभवांतर के कारण संधि के पार गति करते हैं।
(c) p- क्षेत्र में होल-सांद्रता, n- क्षेत्र में इनकी सांद्रता से अधिक है।
(d) उपरोक्त सभी।

14.5 जब p-n संधि पर अग्रदिशिक बायस अनुप्रयुक्त किया जाता है, तब यह
(a) विभव रोधक बढ़ाता है।
(b) बहुसंख्यक वाहक धारा को शून्य कर देता है।
(c) विभव रोधक को कम कर देता है।
(d) उपरोक्त में से कोई नहीं।

14.6 ट्रांज़िस्टर की क्रिया हेतु निम्नलिखित में से कौन-से कथन सही हैं –
(a) आधार, उत्सर्जक और संग्राहक क्षेत्रों की आमाप और अपमिश्रण सांद्रता समान होनी चाहिए।
(b) आधार क्षेत्र बहुत बारीक और कम अपमिश्रित होना चाहिए।
(c) उत्सर्जक संधि अग्रदिशिक बायस है और संग्राहक संधि पश्चदिशिक बायस है।
(d) उत्सर्जक संधि और संग्राहक संधि दोनों ही अग्रदिशिक बायस हैं।

14.7 किसी ट्रांज़िस्टर प्रवर्धक के लिए वोल्टता लब्धि
(a) सभी आवृत्तियों के लिए समान रहती है।
(b) उच्च और निम्न आवृत्तियों पर उच्च होती है तथा मध्य आवृत्ति परिसर में अचर रहती है।
(c) उच्च और निम्न आवृत्तियों पर कम होती है और मध्य आवृत्तियों पर अचर रहती है।
(d) उपरोक्त में से कोई नहीं।

14.8 अर्ध-तरंगी दिष्टकरण में, यदि निवेश आवृत्ति 50 Hz है तो निर्गम आवृत्ति क्या है? समान निवेश आवृत्ति हेतु पूर्ण तरंग दिष्टकारी की निर्गम आवृत्ति क्या है?

14.9 CE-ट्रांज़िस्टर प्रवर्धक हेतु, 2 kΩ के संग्राहक प्रतिरोध के सिरों पर ध्वनि वोल्टता 2 V है। मान लीजिए कि ट्रांज़िस्टर का धारा प्रवर्धन गुणक 100 है। यदि आधार प्रतिरोध 1 kΩ है तो निवेश संकेत (signal) वोल्टता और आधार धारा परिकलित कीजिए।

14.10 एक के पश्चात एक श्रेणीक्रम सोपानित में दो प्रवर्धक संयोजित किए गए हैं। प्रथम प्रवर्धक की वोल्टता लब्धि 10 और द्वितीय की वोल्टता लब्धि 20 है। यदि निवेश संकेत 0.01 वोल्ट है तो निर्गम प्रत्यावर्ती संकेत का परिकलन कीजिए।

14.11 कोई p-n फ़ोटोडायोड 2.8 eV बैंड अंतराल वाले अर्धचालक से संविरचित है। क्या यह 6000 nm की तरंगदैर्ध्य का संसूचन कर सकता है?

अतिरिक्त अभ्यास

14.12 सिलिकॉन परमाणुओं की संख्या 5×10^{28} प्रति m^3 है। यह साथ ही साथ आर्सेनिक के 5×10^{22} परमाणु प्रति m^3 और इंडियम के 5×10^{20} परमाणु प्रति m^3 से अपमिश्रित किया गया है। इलेक्ट्रॉन और होल की संख्या का परिकलन कीजिए। दिया है कि $n_i = 1.5 \times 10^{16}\ m^{-3}$। दिया गया पदार्थ n- प्रकार का है या p- प्रकार का?

14.13 किसी नैज अर्धचालक में ऊर्जा अंतराल E_g का मान 1.2eV है। इसकी होल गतिशीलता इलेक्ट्रॉन गतिशीलता की तुलना में काफ़ी कम है तथा ताप पर निर्भर नहीं है। इसकी 600 K तथा 300 K पर चालकताओं का क्या अनुपात है? यह मानिए कि नैज वाहक सांद्रता n_i की ताप निर्भरता इस प्रकार व्यक्त होती है –

$$n_i = n_0 \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right)$$

जहाँ n_0 एक स्थिरांक है।

14.14 किसी p-n संधि डायोड में धारा I को इस प्रकार व्यक्त किया जा सकता है

$$I = I_0 \exp\left(\frac{eV}{2k_B T} - 1\right)$$

जहाँ I_0 को उत्क्रमित संतृप्त धारा कहते हैं, V डायोड के सिरों पर वोल्टता है तथा यह अग्रदिशिक बायस के लिए धनात्मक तथा पश्चदिशिक बायस के लिए ऋणात्मक है। I डायोड से प्रवाहित धारा है, k_B बोल्ट्जमान नियतांक (8.6×10^{-5} eV/K) है तथा T परम ताप है। यदि किसी दिए गए डायोड के लिए $I_0 = 5 \times 10^{-12}$ A तथा T = 300 K है, तब

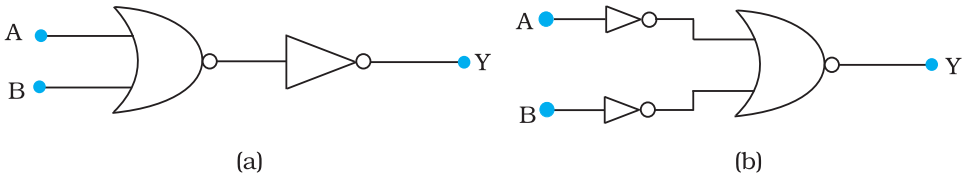
(a) 0.6 V अग्रदिशिक वोल्टता के लिए अग्रदिशिक धारा क्या होगी?

(b) यदि डायोड के सिरों पर वोल्टता को बढ़ाकर 0.7 V कर दें तो धारा में कितनी वृद्धि हो जाएगी?

(c) गतिक प्रतिरोध कितना है?

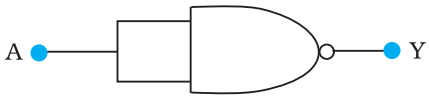
(d) यदि पश्चदिशिक वोल्टता को 1 V से 2 V कर दें तो धारा का मान क्या होगा?

14.15 आपको चित्र 14.44 में दो परिपथ दिए गए हैं। यह दर्शाइए कि परिपथ (a) OR गेट की भाँति व्यवहार करता है जबकि परिपथ (b) AND गेट की भाँति कार्य करता है।



चित्र 14.44

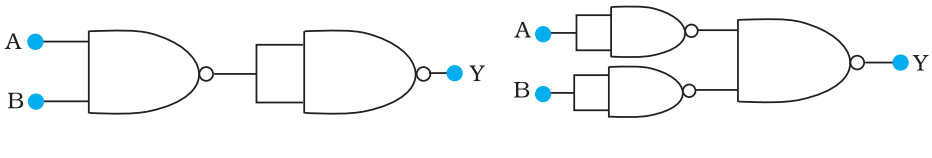
14.16 नीचे दिए गए चित्र 14.45 में संयोजित NAND गेट संयोजित परिपथ की सत्यमान सारणी बनाइए।



चित्र 14.45

अत: इस परिपथ द्वारा की जाने वाली यथार्थ तर्क संक्रिया का अभिनिर्धारण कीजिए।

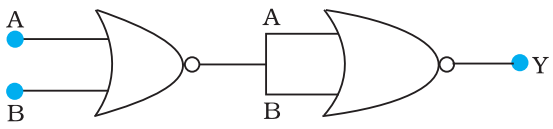
14.17 आपको निम्न चित्र 14.46 में दर्शाए अनुसार परिपथ दिए गए हैं जिनमें NAND गेट जुड़े हैं। इन दोनों परिपथों द्वारा की जाने वाली तर्क संक्रियाओं का अभिनिर्धारण कीजिए।



चित्र 14.46

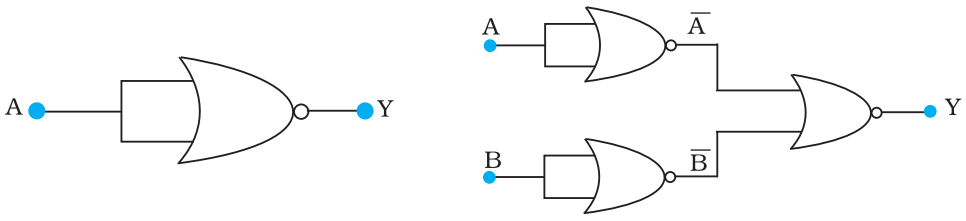
14.18 चित्र 14.47 में दिए गए NOR गेट युक्त परिपथ की सत्यमान सारणी लिखिए और इस परिपथ द्वारा अनुपालित तर्क संक्रियाओं (OR, AND, NOT) को अभिनिर्धारित कीजिए।

(*संकेत* – A = 0, B = 1 तब दूसरे NOR गेट के निवेश A और B, 0 होंगे और इस प्रकार Y = 1 होगा। इसी प्रकार A और B के दूसरे संयोजनों के लिए Y के मान प्राप्त कीजिए। OR, AND, NOT द्वारों की सत्यमान सारणी से तुलना कीजिए और सही विकल्प प्राप्त कीजिए।)



चित्र 14.47

14.19 चित्र 14.48 में दर्शाए गए केवल NOR गेटों से बने परिपथ की सत्यमान सारणी बनाइए। दोनों परिपथों द्वारा अनुपालित तर्क संक्रियाओं (OR, AND, NOT) को अभिनिर्धारित कीजिए।



(a) (b)

चित्र 14.48

अध्याय 15

संचार व्यवस्था

15.1 भूमिका

संचार सूचना के संप्रेषण की क्रिया है। इस संसार का प्रत्येक प्राणी, अपने चारों ओर के संसार के अन्य प्राणियों से, लगभग निरंतर ही सूचनाओं के आदान-प्रदान की आवश्यकता का अनुभव करता है। किसी सफल संचार के लिए यह आवश्यक है कि प्रेषक एवं ग्राही दोनों ही किसी सर्वसामान्य भाषा को समझते हों। मानव निरंतर ही यह प्रयत्न करता रहा है कि उसका मानव जाति से संचार गुणता में उन्नत हो। मानव प्रागैतिहासिक काल से आधुनिक काल तक, संचार में उपयोग होने वाली नयी-नयी भाषाओं एवं विधियों की खोज करने के लिए प्रयत्नशील रहा है, ताकि संचार की गति एवं जटिलताओं के पदों में बढ़ती आवश्यकताओं की पूर्ति हो सके। संचार प्रणाली के विकास को प्रोन्नत करने वाली घटनाओं एवं उपलब्धियों के विषय में जानकारी होना लाभप्रद है, जिसे सारणी 15.1 में प्रस्तुत किया गया है।

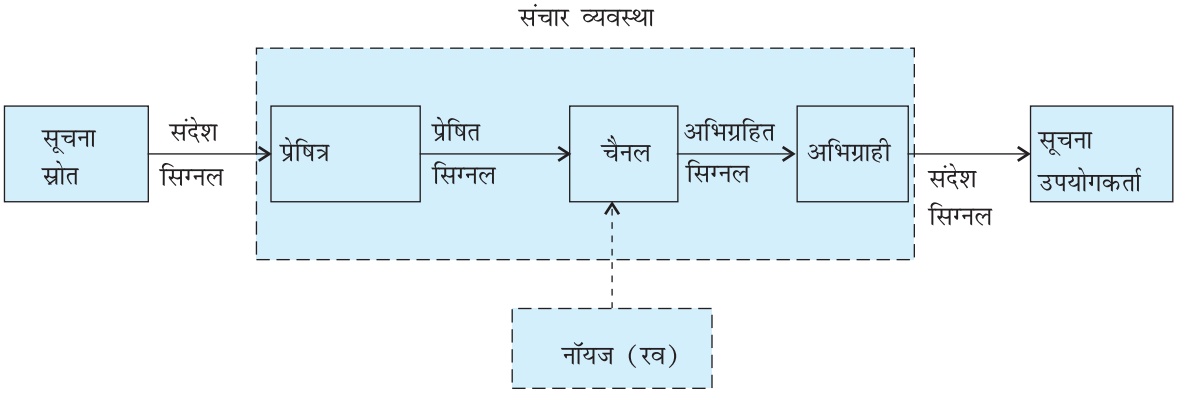
आधुनिक संचार की जड़ें 19वीं तथा 20वीं शताब्दियों में सर जगदीश चन्द्र बोस, एफ.बी. मोर्स, जी मार्कोनी तथा अलेक्जेंडर ग्राह्म बेल के कार्य द्वारा डाली गईं। 20वीं शताब्दी के पहले पचास वर्षों के पश्चात इस क्षेत्र में विकास की गति नाटकीय रूप से बढ़ी प्रतीत होती है। आगामी दशकों में हम बहुत सी अन्य महत्वपूर्ण उपलब्धियाँ देख सकते हैं। इस अध्याय का उद्देश्य संचार की अभिकल्पना, अर्थात संचार के ढंग (Mode), मॉडुलन की आवश्यकता, और आयाम-मॉडुलन के निगमन तथा उत्पादन से परिचित होना है।

15.2 संचार व्यवस्था के अवयव

संचार सभी सजीव वस्तुओं के जीवन के प्रत्येक चरण में व्याप्त है। चाहे संचार की कोई भी प्रकृति हो, प्रत्येक संचार व्यवस्था के तीन आवश्यक तत्व होते हैं– प्रेषित्र, माध्यम/चैनल तथा अभिग्राही। चित्र 15.1 में किसी संचार व्यवस्था के व्यापक रूप को ब्लॉक आरेख द्वारा दर्शाया गया है।

सारणी 15.1 संचार के इतिहास की कुछ प्रमुख उपलब्धियाँ

वर्ष	घटना	टिप्पणी
1565 ई. (लगभग)	बादशाह अकबर को किसी दूरस्थ स्थान से बेगम द्वारा बच्चे को जन्म दिये जाने की सूचना ढोल बजाकर देना	यह माना जाता है कि वज़ीर बीरबल ने बादशाह और बेगम के विश्राम-स्थलों के बीच निश्चित संख्या में ढोल बजाने वालों की व्यवस्था का प्रयोग किया था
1835	सैम्यूल एफ. बी. मोर्स तथा सर चार्ल्स व्हीटस्टोन द्वारा टेलीग्राफ़ का आविष्कार	इसके परिणामस्वरूप डाकघरों द्वारा संदेश भेजने में आश्चर्यजनक वृद्धि हुई तथा संदेशवाहकों द्वारा स्वयं यात्रा कर संदेश पहुँचाने का कार्य काफ़ी कम हो गया
1876	अलेक्ज़ैंडर ग्राह्म बेल तथा एंटोनियो मेयूस्सी द्वारा टेलीफ़ोन का आविष्कार	कदाचित मानव जाति के इतिहास में सबसे व्यापक उपयोग होने वाला संचार का साधन
1895	सर जे.सी. बोस तथा जी. मार्कोनी द्वारा बेतार के तार का निदर्शन	यह तार द्वारा संचार के युग से बे-तार द्वारा संचार के युग में एक ऊँची उड़ान थी
1936	टेलीविज़न प्रसारण (जॉन लॉगी बेयर्ड)	BBC द्वारा प्रथम टेलीविज़न प्रसारण
1955	महाद्वीप के पार पहला रेडियो फ़ैक्स प्रेषित (अलेक्ज़ैंडर बेन)	अलेक्ज़ैंडर बेन ने फ़ैक्स की अवधारणा 1843 में पेटंट कराई
1968	ARPANET पहला इंटरनेट अस्तित्व में आया (J.C.R. लिक्लीडर)	ARPANET परियोजना अमेरिका के रक्षा विभाग द्वारा संचालित की गई। इसके अंतर्गत नेटवर्क से संयोजित एक कंप्यूटर से फ़ाइल दूसरे कंप्यूटर में स्थानांतरित की गयी
1975	बेल लेबोरेट्रीज़ पर तंतु प्रकाशिकी विकसित हुई	पारंपरिक संचार व्यवस्थाओं की तुलना में तंतु प्रकाशिक संचार व्यवस्था श्रेष्ठ तथा सस्ती हैं
1989-91	टिम बर्नर-ली ने **World Wide Web** का आविष्कार किया।	WWW को ऐसे विशालकाय विश्वकोष के सदृश माना जा सकता है जिसका ज्ञान सर्वसाधारण को हर समय सुलभ रहता है



चित्र 15.1 किसी व्यापक संचार व्यवस्था का ब्लॉक आरेख।

किसी संचार व्यवस्था में प्रेषित्र किसी एक स्थान पर अवस्थित होता है, अभिग्राही किसी अन्य स्थान पर (पास अथवा दूर) अवस्थित होता है तथा चैनल एक ऐसा भौतिक माध्यम है जो इन्हें एक दूसरे से संयोजित करता है। चैनल का प्रकार संचार व्यवस्था के प्रकार पर निर्भर करता है। यह प्रेषित्र तथा अभिग्राही को संयोजित करने वाले एक तार अथवा केबल के रूप में हो सकता है अथवा वह बेतार (वायरलैस) भी हो सकता है। प्रेषित्र का उद्देश्य सूचना स्रोत द्वारा उत्पन्न संदेश सिग्नल को चैनल द्वारा प्रेषण के लिए उपयुक्त रूप में परिवर्तित करना है। यदि किसी सूचना स्रोत का निर्गत वाक् सिग्नल की भाँति अविद्युतीय हो तो कोई ट्रांसड्यूसर, इस संदेश को प्रेषित्र में देने से पूर्व विद्युत सिग्नल में रूपांतरित कर देता है। जब कोई प्रेषित सिग्नल चैनल के अनुदिश संचारित होता है तो यह चैनल में अपूर्णता के कारण विरूपित हो सकता है। इसके अतिरिक्त प्रेषित सिग्नल में नॉयज (Noise, रव) मिल जाता है, फलस्वरूप अभिग्राही प्रेषित सिग्नल का विकृत रूप प्राप्त करता है। अभिग्राही का कार्य प्राप्त सिग्नल को प्रचालित करना होता है। यह इस सूचना-सिग्नल की पुनः संरचना करके इसे मूल संदेश-सिग्नल को पहचान सकने योग्य रूप में लाता है ताकि संदेश प्राप्तकर्ता को पहुँचाया जा सके।

संचार के दो मूल ढंग हैं: बिंदु से बिंदु तक संचार, तथा प्रसारण।

बिंदु से बिंदु तक संचार विधि में एक एकल प्रेषित्र तथा एक अभिग्राही के बीच के संयोजन (Linkage) से होकर संचार होता है। इस विधि के संचार का एक उदाहरण टेलीफ़ोन व्यवस्था है। इसके विपरीत, प्रसारण विधि में किसी एकल प्रेषित्र के तदनुरूपी बहुत से अभिग्राही होते हैं। प्रसारण विधि द्वारा संचार के उदाहरण रेडियो तथा टेलीविजन हैं।

15.3 इलेक्ट्रॉनिक संचार व्यवस्थाओं में उपयोग होने वाली मूल शब्दावली

अब तक हम कुछ पदों (शब्दों) जैसे सूचना स्रोत, प्रेषित्र, अभिग्राही, चैनल, नॉयज (रव), आदि से परिचित हो चुके हैं। यदि हम निम्नलिखित मूल शब्दावली से परिचित हो जाएँ तो हमें किसी भी संचार व्यवस्था को समझना आसान हो जाएगा।

(i) *ट्रान्सड्यूसर* : कोई युक्ति जो ऊर्जा के एक रूप को किसी दूसरे रूप में परिवर्तित कर देती है उसे ट्रांसड्यूसर कहते हैं। इलेक्ट्रॉनिक संचार व्यवस्थाओं में हमें प्रायः ऐसी युक्तियों से व्यवहार करना होता है जिनका या तो निवेश अथवा निर्गत विद्युतीय रूप में होता है। किसी विद्युतीय ट्रांसड्यूसर को इस प्रकार परिभाषित किया जाता है–ऐसी युक्ति जो कुछ भौतिक चरों (दाब, विस्थापन, बल,

जगदीश चंद्र बोस (1858 – 1937)



जगदीश चंद्र बोस (1858 – 1937) उन्होंने परालघु वैद्युत-चुंबकीय तरंगों के जनन के लिए एक उपकरण बनाया और उसके अर्द्ध प्रकाशीय गुणों का अध्ययन किया। ऐसा कहा जाता है कि वे गैलेना जैसे अर्द्धचालक को वैद्युत-चुंबकीय तरंगों के स्वत: पुनर्प्राप्त संसूचक के रूप में उपयोग करने वाले पहले व्यक्ति थे। बोस ने ब्रिटिश पत्रिका *दि इलैक्ट्रीशियन* के 27 दिसंबर 1995 के अंक में तीन लेख प्रकाशित किए। 13 दिसंबर 1901 को मार्कोनी के पहले बेतार के संचार से दो वर्ष से भी अधिक पहले बोस के आविष्कार के बारे में 27 अप्रैल 1899 की *रॉयल सोसाइटी की कार्यवाही* में भी लेख प्रकाशित हो चुका था। बोस ने ऐसे अतिसंवेदी उपकरणों का आविष्कार किया जिनके द्वारा जीवित प्राणियों पर बाह्य उद्दीपकों की अतिसूक्ष्म प्रतिक्रिया को संसूचित किया जा सकता था। इनके द्वारा उन्होंने जंतु एवं वानस्पतिक ऊतकों में समांतरता स्थापित की।

ताप आदि) को अपने निर्गत पर तदनुरूपी विद्युतीय सिग्नल के चरों में रूपांतरित कर देते हैं।

(ii) *सिग्नल* : प्रेषण के लिए उपयुक्त वैद्युत रूप में रूपांतरित सूचना को सिग्नल या संकेत कहते हैं।

सिग्नल या तो *अनुरूप* (Analog) अथवा *अंकीय* (Digital) हो सकते हैं। अनुरूप सिग्नल वोल्टता अथवा धारा के सतत् विचरण होते हैं। *ये अनिवार्यत: समय के एकल मान वाले फलन होते हैं।* ज्या तरंग (Sine wave) एक मूल अनुरूप सिग्नल होती है। सभी अन्य अनुरूप सिग्नलों को इनके ज्या तरंग अवयवों के पदों में पूर्णत: समझा जा सकता है। टेलीविज़न के ध्वनि तथा दृश्य सिग्नल प्रकृति में अनुरूप सिग्नल होते हैं। अंकीय सिग्नल वे होते हैं जो क्रमवार विविक्त मान प्राप्त कर सकते हैं। अंकीय इलेक्ट्रॉनिकी में विस्तृत रूप में उपयोग होने वाली द्विआधारी पद्धति में किसी सिग्नल के केवल दो स्तर होते हैं। '0' निम्न वोल्टता धारा स्तर के तदनुरूपी है तो '1' उच्च वोल्टता-धारा स्तर के तदनुरूपी होता है। अंकीय संचार के लिए उपयोगी बहुत सी कोडन पद्धतियाँ हैं। इनमें संख्या प्रणालियों के उपयुक्त संयोजनों जैसे द्विआधारी कोडित दशमलव (Binary Coded Decimal या BCD)* का उपयोग किया जाता है। संख्याओं, अक्षरों तथा निश्चित लक्षणों को निरूपित करने वाला सार्वजनिक रूप से लोकप्रिय अंकीय कोड "American Standard Code for Information Interchange (ASCII)** है।

(iii) *रव* : रव से हमारा तात्पर्य उन अवांछनीय सिग्नलों से है जो किसी संचार व्यवस्था में संदेश सिग्नलों के प्रेषण तथा संसाधन में विक्षोभ का प्रयास करते हैं। रव उत्पन्न करने का स्रोत व्यवस्था के बाहर अथवा भीतर स्थित हो सकता है।

(iv) *प्रेषित्र* : प्रेषित्र प्रवेशी संदेश सिग्नल को संसाधित करके चैनल से होकर प्रेषण तथा इसके पश्चात अभिग्रहण के लिए उपयुक्त बनाता है।

(v) *अभिग्राही* : कोई अभिग्राही चैनल के निर्गत पर प्राप्त सिग्नल से वांछनीय संदेश सिग्नलों को प्राप्त करता है।

(vi) *क्षीणता* : माध्यम से संचरण के समय सिग्नल की प्रबलता में क्षति को क्षीणता कहते हैं।

(vii) *प्रवर्धन* : यह किसी इलेक्ट्रॉनिक परिपथ जिसे प्रवर्धक (संदर्भ अध्याय 14) कहते हैं, के उपयोग से सिग्नल आयाम (और फलस्वरूप उसकी तीव्रता) में वृद्धि करने की प्रक्रिया है। संचार व्यवस्था में क्षीणता के कारण होने वाले क्षय की क्षतिपूर्ति के लिए प्रवर्धन आवश्यक है। अतिरिक्त सिग्नल प्रबलता के लिए आवश्यक ऊर्जा DC विद्युत स्रोत से प्राप्त सिग्नल है। प्रवर्धन, स्रोत तथा लक्ष्य के बीच उस स्थान पर किया जाता है जहाँ सिग्नल की प्रबलता, अपेक्षित प्रबलता से दुर्बल हो जाती है।

* BCD में किसी अंक को प्राय: चार द्विआधारी (0 या 1) बिटों द्वारा निरूपित किया जाता है। उदाहरण के लिए दशमलव प्रणाली में अंकों 0, 1, 2, 3, 4 को 0000, 0001, 0010, 0011 तथा 0100. 1000 के द्वारा निरूपित करते हैं। 1000 आठ को निरूपित करता है।

** चूँकि कंप्यूटर केवल अंकों को ही समझ सकता है, अत: अंकों के पदों में किया गया यह लक्षण कोडन है।

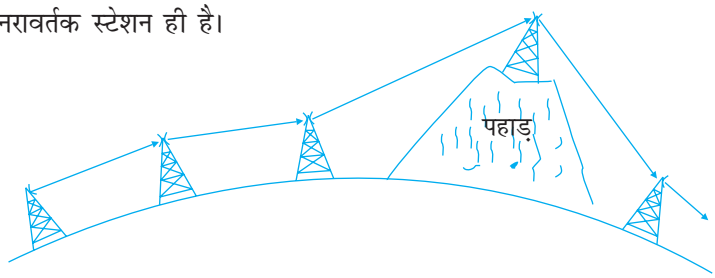
(viii) *परास* : यह स्रोत तथा लक्ष्य के बीच की वह अधिकतम दूरी है जहाँ तक सिग्नल को उसकी पर्याप्त प्रबलता से प्राप्त किया जाता है।

(ix) *बैंड चौड़ाई* : बैड चौड़ाई से हमारा तात्पर्य उस आवृत्ति परास से है जिस पर कोई उपकरण प्रचालित होता है अथवा स्पेक्ट्रम के उस भाग से होता है जिसमें सिग्नल की सभी आवृत्तियाँ विद्यमान हैं।

(x) *मॉडुलन* : अनुभाग 15.7 में दिए गए कारणों के अनुसार निम्न आवृत्ति के मूल सिग्नलों (संदेशों / सूचनाओं) को अधिक दूरियों तक प्रेषित नहीं किया जा सकता। इसीलिए प्रेषित्र पर, निम्न आवृत्ति के संदेश सिग्नलों की सूचनाओं को किसी उच्च आवृत्ति की तरंग पर अध्यारोपित कराया जाता है जो सूचना के वाहक की भाँति व्यवहार करती है। इस प्रक्रिया को *मॉडुलन* कहते हैं। जैसा कि आगे चर्चा की जाएगी मॉडुलन कई प्रकार के होते हैं जिन्हें संक्षेप में AM, FM तथा PM कहते हैं।

(xi) *विमॉडुलन* : इस प्रक्रिया को जिसमें अभिग्राही द्वारा वाहक तरंग से सूचना की पुनः प्राप्ति की जाती है, विमॉडुलन कहते हैं। यह मॉडुलन के विपरीत प्रक्रिया है।

(xii) *पुनरावर्तक* (Repeater) : पुनरावर्तक अभिग्राही तथा प्रेषित्र का संयोजन होता है। पुनरावर्तक प्रेषित्र से सिग्नल चयन करता है, उसे प्रवर्धित करता है तथा उसे अभिग्राही को पुनः प्रेषित कर देता है। कभी-कभी तो वाहक तरंगों की आवृत्ति में परिवर्तन भी कर देता है। पुनरावर्तकों का उपयोग चित्र 15.2 में दर्शाए अनुसार किसी संचार व्यवस्था का परास विस्तारित करने के लिए किया जाता है। कोई संचार उपग्रह वास्तव में अंतरिक्ष में एक पुनरावर्तक स्टेशन ही है।



चित्र 15.2 संचार के परास में वृद्धि के लिए परावर्तक स्टेशन का उपयोग।

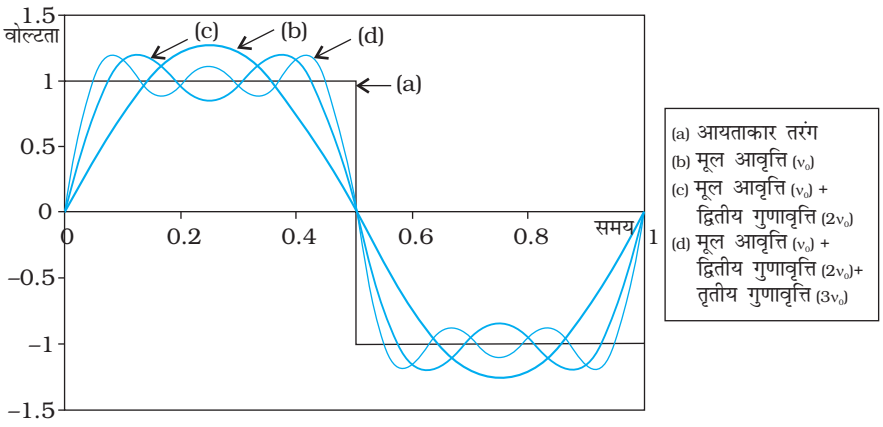
15.4 सिग्नलों की बैंड-चौड़ाई

किसी संचार व्यवस्था में संदेश सिग्नल कोई आवाज, संगीत, दृश्य अथवा कंप्यूटर आँकड़ा हो सकता है। उन सिग्नलों में प्रत्येक के आवृत्ति परास भिन्न होते हैं। किसी दिए गए सिग्नल की संचार प्रक्रिया को जिस प्रकार की संचार व्यवस्था चाहिए वह उस आवृत्ति बैंड पर निर्भर करती है जो उसके लिए आवश्यक माना जाता है।

वाक् सिग्नलों के लिए 300 Hz से 3100 Hz का आवृत्ति परास उपयुक्त माना जाता है। अतः वाक् सिग्नलों को व्यापारिक टेलीफ़ोन संचार के लिए 2800 Hz (3100 Hz – 300 Hz) बैंड चौड़ाई चाहिए। संगीत के प्रेषण के लिए वाद्य यंत्रों द्वारा उच्च आवृत्तियों के स्वर उत्पन्न करने के कारण, लगभग 20 kHz की बैंड चौड़ाई की आवश्यकता होती है। आवृत्ति का श्रव्य परिसर 20 Hz से 20 kHz तक है।

दृश्यों के प्रसारण (प्रेषण) के लिए वीडियो सिग्नलों को 4.2 MHz बैंड चौड़ाई की आवश्यकता होती है। TV सिग्नलों में दृश्य तथा श्रव्य दोनों अवयव होते हैं तथा उनके प्रेषण के लिए प्रायः 6 MHz बैंड चौड़ाई आवंटित की जाती है।

पिछले अनुच्छेद में हमने केवल अनुरूप सिग्नलों पर ही विचार किया है। अंकीय सिग्नल चित्र 15.3 में दर्शाए अनुसार आयताकार तरंग की आकृति के होते हैं। यह दर्शाया जा सकता है कि आयताकार तरंग का अपघटन (वियोजन) ν_0, $2\nu_0$, $3\nu_0$, $4\nu_0$ ... $n\nu_0$ आवृत्तियों की ज्यावक्रीय तरंगों के अध्यारोपण के रूप में किया जा सकता है। यहाँ n एक पूर्णांक है जिसे अनंत तक विस्तरित किया जा सकता है तथा $\nu_0 = 1/T_0$ है। इस तथ्य की व्याख्या के लिए एक ही आरेख में मूल आवृत्ति (ν_0); मूल आवृत्ति (ν_0) + द्वितीय गुणावृत्ति ($2\nu_0$), मूल आवृत्ति (ν_0) + द्वितीय गुणावृत्ति ($2\nu_0$) + तृतीय गुणावृत्ति ($3\nu_0$) दर्शायी गई हैं। इस आरेख से यह स्पष्ट है कि आयताकार तरंग को यथार्थ रूप में पुनरुत्पादन करने के लिए हमें सभी गुणावृत्तियों ν_0, $2\nu_0$, $3\nu_0$, $4\nu_0$..., आदि को अध्यारोपित करने की आवश्यकता होगी, जिससे यह ध्वनित होता है कि बैंड की चौड़ाई अनंत चाहिए। तथापि व्यावहारिक कार्यों के लिए उच्च गुणावृत्तियों के योगदान की उपेक्षा की जा सकती है जिससे बैंड चौड़ाई सीमित हो जाएगी। इसके परिणामस्वरूप अभिग्रहीत तरंगें प्रेषित तरंगों की तुलना में विरूपित होंगी। यदि बैंड चौड़ाई इतनी अधिक है कि इसमें कुछ गुणावृत्तियाँ समायोजित हो सकती हैं तो सूचना की कोई क्षति नहीं होती है तथा कुल मिलाकर आयताकार सिग्नल प्राप्त हो जाता है। इसका कारण यह है कि जितनी उच्च गुणावृत्ति होती है तरंग रूप के लिए इसका योगदान उतना ही कम होता है।



चित्र 15.3 मूल ज्या तरंग तथा इसकी गुणावृत्तियों के पदों में आयताकार तरंग का सन्निकटन।

15.5 प्रेषण माध्यम की बैंड-चौड़ाई

संदेश सिग्नलों की ही भाँति विभिन्न प्रकार के प्रेषण माध्यमों के लिए भिन्न-भिन्न बैंड-चौड़ाई की आवश्यकता होती है। प्रेषण में सामान्यत: उपयोग किए जाने वाले माध्यम-तार, मुक्त आकाश, तथा प्रकाशिक-तंतु केबल हैं। समाक्षी केबल व्यापक रूप से उपयोग होने वाला तार माध्यम है जो लगभग 750 MHz की बैंड-चौड़ाई प्रदान करता है। इस प्रकार का केबल सामान्यत: 18 GHz आवृत्ति से नीचे प्रचालित होता है। रेडियो तरंगों का उपयोग करके मुक्त आकाश से आवृत्तियों के एक विस्तृत परिसर (कुछ सहस्र kHz से कुछ GHz तक) में संचार होता है। इस आवृत्ति परिसर को तालिका 15.2 में दर्शाए अनुसार फिर से विभाजित कर विविध सेवाएँ प्रदान करने के लिए आवंटित किया जाता है। तंतुओं का प्रयोग करके प्रकाशिक संचार, आवृत्ति परिसर 1 THz से 1000 THz तक (सूक्ष्म तरंगों से पराबैंगनी तक), संपन्न किया जाता है। एक प्रकाशिक तंतु 100 GHz से अधिक की संचार बैंड-चौड़ाई प्रदान कर सकता है।

एक अंतर्राष्ट्रीय समझौते के परिणामस्वरूप, स्पेक्ट्रम की विभिन्न बैंड-चौड़ाइयों का आवंटन किया गया है। आवृत्ति आवंटन की वर्तमान व्यवस्था का संचालन अंतर्राष्ट्रीय दूरसंचार यूनियन (International Telecommunication Union या ITU) करती है।

सारणी 15.2 कुछ प्रमुख बेतार संचार आवृत्ति बैंड

सेवा	आवृत्ति बैंड	टिप्पणी
मानक AM प्रसारण	540-1600 kHz	
FM प्रसारण	88-108 MHz	
टेलीविज़न	54-72 MHz 76-88 MHz 174-216 MHz 420-890 MHz	VHF (अति उच्च आवृत्ति) TV UHF (परा उच्च आवृत्ति) TV
सेल्यूलर मोबाइल रेडियो	896-901 MHz 840-935 MHz	मोबाइल से आधार स्टेशन के लिए आधार स्टेशन से मोबाइल के लिए
उपग्रह संचार	5.925-6.425 GHz 3.7-4.2 GHz	उपरिलिंक अधोलिंक

15.6 वैद्युतचुंबकीय तरंगों का संचरण

रेडियो तरंगों का उपयोग करने वाले संचार में एक सिरे पर प्रेषित्र होता है जिसका ऐंटीना वैद्युत-चुंबकीय तरंगें विकरित करता है, जो अंतरिक्ष में गमन करती हुई दूसरे सिरे पर स्थित अभिग्राही के ऐंटीना पर पहुँचती हैं। जैसे-जैसे वैद्युतचुंबकीय तरंगें प्रेषित्र से दूर होती जाती है वैसे-वैसे इनकी तीव्रता कम होती जाती है। वैद्युतचुंबकीय तरंगों के संचरण तथा गमनपथ को कई कारक प्रभावित करते हैं। यहाँ पर पृथ्वी के वातावरण की संरचना को समझना भी महत्त्वपूर्ण है क्योंकि वैद्युत-चुंबकीय तरंगों के संचरण में इसकी सक्रिय भूमिका है। सारणी 15.3 में वायुमंडल की कुछ उपयोगी सतहों का संक्षिप्त विवरण दिया गया है।

15.6.1 भू-तरंगें

सिग्नलों को उच्च दक्षता से विकिरित करने के लिए ऐंटीना का साइज़ सिग्नल की तरंगदैर्घ्य λ के तुलनीय (कम से कम ~ $\lambda/4$) होना चाहिए। लंबी तरंगदैर्घ्यों (अर्थात निम्न आवृत्तियों) के लिए ऐंटीना के भौतिक साइज़ बड़े होते हैं तथा उन्हें पृथ्वी के पृष्ठ पर अथवा इसके बहुत पास लगाया जाता है। मानक आयाम-मॉडुलित (AM) प्रसारण में भू-आधारित ऊर्ध्वाधर स्तंभों (टॉवर) का व्यापक उपयोग प्रेषण ऐंटीना की भाँति होता है। इस प्रकार के ऐंटीना से सिग्नल के प्रसारण पर भूमि का प्रबल प्रभाव होता है। संचरण की इस विधि को पृष्ठीय तरंग संचरण कहते हैं तथा यह तरंग पृथ्वी की पृष्ठ पर विसर्पण करती है। यह तरंग पृथ्वी के जिस भाग से गुजरती है उस पर धारा प्रेरित करती है तथा पृथ्वी द्वारा ऊर्जा के अवशोषण के कारण तरंग क्षीण होती जाती है। आवृत्ति में वृद्धि के साथ पृष्ठीय तरंगों की क्षीणता में तीव्रता से वृद्धि होती है। अत: प्रेषित की जा सकने वाली आवृत्ति का अधिकतम परास प्रेषित शक्ति तथा इसकी आवृत्ति (कुछ MHz से कम) पर निर्भर करता है।

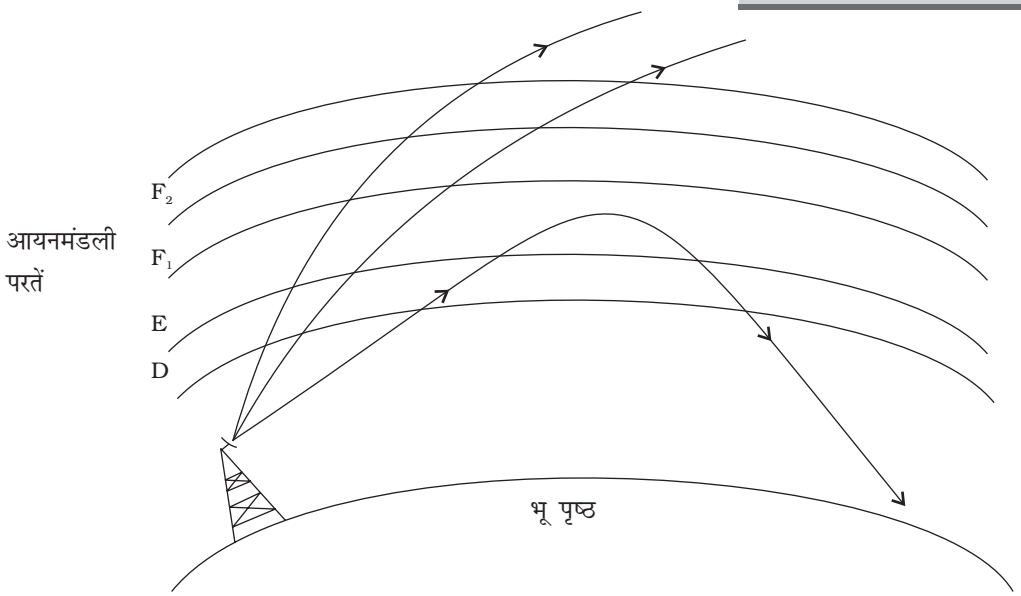
सारणी 15.3 वायुमंडल की विभिन्न सतहें तथा उनकी संचरित वैद्युतचुंबकीय तरंगों से अन्योन्य क्रिया

स्तर (सतह) का नाम		पृथ्वी के पृष्ठ से सन्निकट तुंगता	अस्तित्व की अवधि	सर्वाधिक प्रभावित आवृत्तियाँ
क्षोभ मंडल		10 km	दिन व रात	अति उच्च आवृत्ति (कई GHz तक)
D (समताप मंडल का भाग)	आयनमंडल के भाग	65-75 km	केवल दिन	निम्न आवृत्ति परावर्तित; कुछ अंश तक मध्य आवृत्ति तथा उच्च आवृत्तियाँ अवशोषित
E, (समताप मंडल का भाग)		100 km	केवल दिन	पृष्ठीय तरंगों का सहायक, उच्च आवृत्तियाँ परावर्तित
F_1 (मध्यमंडल का भाग)		170-190 km	दिन के समय, रात्रि में F_2 के साथ विलीन	उच्च आवृत्तियों का आंशिक अवशोषण करते हुए भी उन्हें F_2 तक पहुँचने देना
F_2 (थर्मोस्फीयर)		रात्रि में 300 km दिन के समय 250-400 km	दिन व रात	उच्च आवृत्ति तरंगों का दक्षतापूर्वक परावर्तन, विशेषकर रात्रि के समय

15.6.2 व्योम तरंगें

कुछ MHz से 30 से 40 MHz के आवृत्ति परिसर में अधिक दूरी का संचार, रेडियो तरंगों के आयनमंडली परावर्तन द्वारा पुनः पृथ्वी पर वापस लौटने के कारण संभव हो पाता है। इस प्रकार के संचरण को *व्योम तरंग संचरण* कहते हैं तथा इसका उपयोग लघुतरंग प्रसारण सेवाओं द्वारा किया जाता हैं। इसे आयनमंडल कहने का कारण यह है कि क्योंकि यहाँ आयन अथवा आवेशित कण अत्यधिक संख्या में होते हैं। यह आकाश में पृथ्वी के पृष्ठ से ~ 65 km से लगभग 400 km ऊँचाई तक फैला हुआ है। जब सूर्य से उच्च ऊर्जायुक्त विकिरण तथा पराबैंगनी किरणें वायु के संपर्क में आती हैं तो वायु के अणु आयनित हो जाते हैं। इसके अतिरिक्त आयनमंडल कई परतों में विभाजित होता है, जिसे विस्तार से सारणी 15.3 में दर्शाया गया है। आयनन की मात्रा तुंगता (ऊँचाई) पर निर्भर करती है। वायुमंडल का घनत्व ऊँचाई बढ़ने पर घटता है। अधिक ऊँचाइयों पर सौर विकिरण तीव्र होते हैं परंतु आयनित होने के लिए कुछ ही अणु उपलब्ध होते हैं। भू-पृष्ठ के समीप यद्यपि आण्विक सांद्रता (घनत्व) काफी अधिक होता है, परंतु विकिरणों की तीव्रता कम होने के कारण यहाँ आयनन कम होता है। तथापि, माध्य ऊँचाइयों की कुछ स्थितियों पर आयनन घनत्व के उच्च मान पाए जाते हैं। आयनमंडलीय परत, 3 MHz से 30 MHz परिसर की आवृत्तियों के लिए परावर्तक की भाँति कार्य करती है। 30 MHz से उच्च आवृत्ति की वैद्युतचुंबकीय तरंगें, आयनमंडल का भेदन करके पलायन कर जाती हैं। यह परिघटना चित्र 15.4 में दर्शायी गई है। वैद्युतचुंबकीय तरंगों के बंकन की परिघटना जिसके फलस्वरूप वे पृथ्वी के पृष्ठ की ओर मोड़ दी जाती है, प्रकाशिकी के पूर्ण आंतरिक परावर्तन के सदृश ही है।*

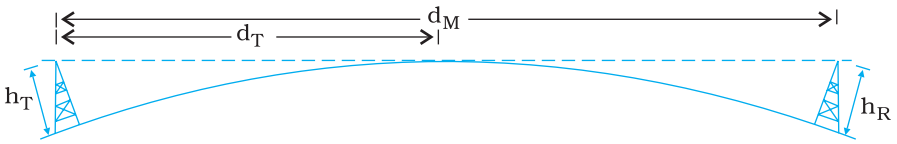
* मिराज की परिघटना से तुलना करें।



चित्र 15.4 व्योम तरंग संचरण। सारणी 15.3 में परतों का नामकरण दिया गया है।

15.6.3 आकाश तरंग

आकाश तरंगों द्वारा प्रसारण रेडियो तरंगों के प्रसारण का एक अन्य ढंग है। आकाश-तरंग, प्रेषण-ऐंटीना से अभिग्राही-ऐंटीना तक सरल रेखीय पथ पर गमन करती है। आकाश तरंगों का उपयोग दृष्टिरेखीय रेडियो संचरण [line-of-sight (LOS) radio communication] के साथ ही साथ उपग्रह संचार में भी किया जाता है। 40 MHz से अधिक आवृत्तियों पर संचार केवल दृष्टिरेखीय (LOS) रेडियो संचरण द्वारा ही संभव है। इन आवृत्तियों पर ऐंटीना का साइज़ अपेक्षाकृत छोटा होता है तथा इसे पृथ्वी के पृष्ठ से कई तरंगदैर्घ्यों की ऊँचाई पर स्थापित किया जा सकता है। LOS प्रकृति का संचार होने के कारण, चित्र 15.5 में दर्शाए अनुसार, पृथ्वी की वक्रता के कारण सीधी तरंगें किसी बिंदु पर अवरोधित हो जाती हैं। यदि सिग्नल को क्षितिज से परे प्राप्त करना है तो अभिग्राही ऐंटीना काफ़ी अधिक ऊँचाई पर स्थापित किया जाना चाहिए ताकि वह LOS तरंगों को बीच में रोक सके।



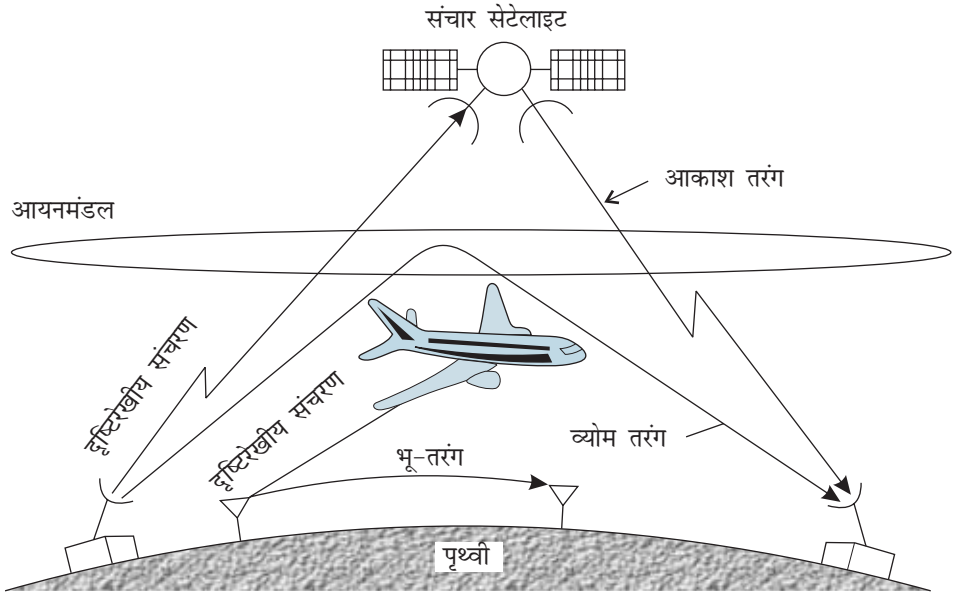
चित्र 15.5 आकाश तरंगों द्वारा दृष्टिरेखीय संचार।

यदि प्रेषक ऐंटीना h_T ऊँचाई पर है, तो आप यह दर्शा सकते हैं कि क्षितिज की दूरी d_T का मान $d_T = \sqrt{2Rh_T}$ होगा, यहाँ R पृथ्वी की वक्रता त्रिज्या (लगभग 6400 km) है। d_T को प्रेषक ऐंटीना का *रेडियो क्षितिज* भी कहते हैं। चित्र 15.5 के संदर्भ में, पृथ्वी के पृष्ठ से h_T तथा h_R ऊँचाई वाले दो ऐंटीना के बीच की अधिकतम दृष्टिरेखीय दूरी इस प्रकार व्यक्त की जा सकती है–

$$d_M = \sqrt{2Rh_T} + \sqrt{2Rh_R} \qquad (15.1)$$

यहाँ h_R अभिग्राही ऐंटीना की ऊँचाई है।

टेलीविज़न प्रसारण, माइक्रोवेव-लिंक तथा सेटेलाइट संचार उन संचार प्रणालियों के कुछ उदाहरण हैं जो आकाश तरंग प्रसारण ढंग का उपयोग करती है। चित्र 15.6 में अब तक तरंग संचरण की वर्णित विविध विधियों का सारांश दिया गया है।



चित्र 15.6 वैद्युतचुंबकीय तरंगों के संचरण की विविध विधियाँ।

उदाहरण 15.1

उदाहरण 15.1 किसी मीनार के शीर्ष पर स्थापित प्रेषक ऐंटीना की ऊँचाई 32 m तथा अभिग्राही ऐंटीना की ऊँचाई 50 m है। LOS विधा में संतोषजनक संचार के लिए दोनों ऐंटीना के बीच की अधिकतम दूरी क्या है? (पृथ्वी की त्रिज्या = 6400 km)

हल

$$d_m = \sqrt{2 \times 64 \times 10^5 \times 32} + \sqrt{2 \times 64 \times 10^5 \times 50} \text{ m}$$

$$= 64 \times 10^2 \times \sqrt{10} + 8 \times 10^3 \times \sqrt{10} \text{ m}$$

$$= 144 \times 10^2 \times \sqrt{10} \text{ m} = 45.5 \text{ km}$$

15.7 माडुलन तथा इसकी आवश्यकता

जैसा कि पहले वर्णन किया जा चुका है कि किसी संचार व्यवस्था का उद्देश्य सूचना अथवा संदेश सिग्नलों को प्रेषित करना है। संदेश सिग्नलों को *आधार बैंड सिग्नल* भी कहते हैं जो आवश्यक रूप से उस मूल सिग्नल द्वारा निरूपित आवृत्ति बैंड को निर्दिष्ट करता है, जिसे सूचना स्रोत द्वारा प्रदान किया गया है। व्यापक रूप से कोई भी सिग्नल एकल आवृत्ति का ज्यावक्र नहीं होता, वरन वह एक आवृत्ति परिसर, जिसे सिग्नल बैंड चौड़ाई कहते हैं, में फैला होता है। मान लीजिए हम श्रव्य आवृत्ति (Audio frequency या AF) के किसी इलेक्ट्रॉनिक सिग्नल (जिसकी आधार बैंड आवृत्ति 20 kHz से कम है।) को किसी लंबे परास की दूरी पर सीधे ही प्रेषित करना चाहते हैं। आइए, यह ज्ञात करें कि वे कौन-कौन से कारक हैं जो हमें ऐसा करने से रोकते हैं तथा हम उन पर कैसे पार पाते हैं।

15.7.1 ऐंटीना अथवा ऐरियल का साइज़

किसी सिग्नल को प्रेषित करने के लिए हमें किसी ऐंटीना या ऐरियल की आवश्यकता होती है। कोई ऐंटीना उस सिग्नल में समय के साथ होने वाले परिवर्तन उचित रूप से संवेदन कर सके, इसके लिए यह आवश्यक है कि उस ऐंटीना का साइज़ उस सिग्नल से संबद्ध तरंगदैर्घ्य (λ) के तुलनीय हो (साइज़ कम से कम $\lambda/4$ हो)। 20 kHz आवृत्ति की किसी वैद्युतचुंबकीय तरंग की तरंगदैर्घ्य λ =15 km होती है। स्पष्ट है कि इस लंबाई के तुलनीय साइज़ का ऐंटीना निर्मित करना तथा प्रचालित करना संभव नहीं है। अत: ऐसे आधार-बैंड सिग्नलों का सीधा प्रेषण व्यावहारिक नहीं है। यदि प्रेषण आवृत्ति उच्च (उदाहरणार्थ, यदि ν=1 MHz है तो λ = 300 m) हो, तो उपयुक्त लंबाई के ऐंटीना द्वारा प्रेषण संभव हो सकता है। अत: *हमारे न्यून आवृत्ति आधार बैंड सिग्नल में निहित सूचना को किसी उच्च रेडियो आवृत्तियों में प्रेषण से पूर्व रूपांतरित (translate) करने की आवश्यकता होती है।*

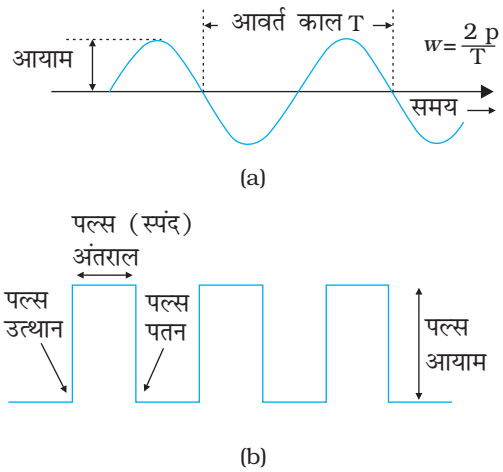
15.7.2 किसी ऐंटीना द्वारा प्रभावी शक्ति विकिरण

किसी रेखीय ऐंटीना (लंबाई = l) से होने वाले विकिरण का सैद्धांतिक अध्ययन यह दर्शाता है कि ऐंटीना द्वारा विकरित शक्ति $(l/\lambda)^2$ के अनुक्रमानुपाती होती है। इसका तात्पर्य यह है कि ऐंटीना की समान लंबाई के लिए, तरंगदैर्घ्य λ के घटने पर (अर्थात आवृत्ति में वृद्धि होने पर) विकिरित शक्ति में वृद्धि हो जाती है। अत: किसी लंबी तरंगदैर्घ्य के आधार-बैंड सिग्नल द्वारा प्रभावी शक्ति विकिरण कम होती है। अत: किसी अच्छे प्रेषण के लिए हमें उच्च शक्ति चाहिए और इसीलिए यह तथ्य हमें प्रेषण के लिए उच्च आवृत्ति के उपयोग की आवश्यकता दर्शाता है।

15.7.3 विभिन्न प्रेषित्रों से प्राप्त सिग्नलों का मिश्रण

आधार-बैंड संकेतों के सीधे प्रसारण (प्रेषण) के विरुद्ध एक अन्य महत्त्वपूर्ण तर्क अधिक व्यावहारिक है। मान लीजिए बहुत से व्यक्ति एक ही समय बातचीत कर रहे हैं अथवा एक ही क्षण कई प्रेषित्र आधार-बैंड सूचना सिग्नल प्रेषित कर रहे हैं। ये सभी सिग्नल एक-दूसरे के साथ मिल जाते हैं तथा इनमें विभेदन करने का कोई सरल उपाय नहीं हैं। यह संभावित हल के रूप में उच्च आवृत्तियों पर एक ऐसे संचार के उपयोग की ओर संकेत करता है, जिसमें प्रत्येक संदेश सिग्नल के प्रेषण के लिए आवृत्तियों का एक बैंड आवंटित किया जाता है।

उपरोक्त तर्क यह सुझाता है कि *न्यून आवृत्ति के मूल आधार बैंड या सूचना सिग्नल का प्रेषण से पूर्व किसी उच्च आवृत्ति तरंग में रूपांतरण आवश्यक है। यह रूपांतरण प्रक्रिया इस प्रकार की होनी चाहिए कि रूपांतरित सिग्नल में उन सभी सूचनाओं का समावेश रहे जो मूल सिग्नल में समाहित थी।* ऐसा करने के लिए हम किसी उच्च आवृत्ति सिग्नल, जिसे *वाहक तरंग* कहते हैं, की सहायता लेते हैं। वह प्रक्रिया जिसके द्वारा वाहक तरंग के साथ सूचना को संलग्न किया जाता है *मॉडुलन* कहलाती है। वाहक तरंग सतत (ज्यावक्रीय) अथवा स्पंद के रूप में चित्र 15.7 में दर्शाए अनुसार हो सकती है।



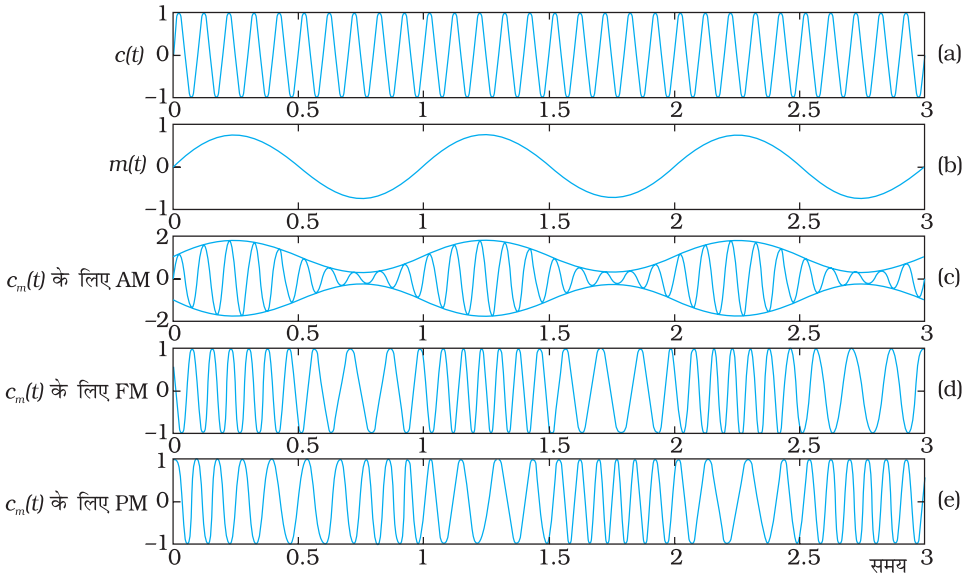
चित्र 15.7 (a) ज्यावक्रीय तथा (b) स्पंद (पल्स) आकृति सिग्नल।

किसी ज्यावक्रीय वाहक तरंग को इस प्रकार निरूपित किया जा सकता है।

$$c(t) = A_c \sin(\omega_c t + \phi) \qquad (15.2)$$

यहाँ $c(t)$ सिग्नल तीव्रता (वोल्टता अथवा धारा), A_c आयाम, ω_c (= $2\pi\nu_c$) कोणीय आवृत्ति तथा

ϕ वाहक तरंग की आरंभिक कला है। मॉडुलन की प्रक्रिया में इन तीनों प्राचलों में से वाहक तरंग के किसी भी एक प्राचल A_c, ω_c तथा ϕ को संदेश अथवा सूचना सिग्नल द्वारा नियंत्रित किया जा सकता है। इसके परिणामस्वरूप तीन प्रकार के मॉडुलन होते हैं: (i) आयाम मॉडुलन (AM); (ii) आवृत्ति मॉडुलन (FM); तथा (iii) कला मॉडुलन (PM) जैसा कि चित्र 15.8 में दर्शाया गया है।



चित्र 15.8 किसी वाहक तरंग का मॉडुलन: (a) ज्यावक्रीय वाहक तरंग, (b) मॉडुलक सिग्नल (c) आयाम मॉडुलन, (d) आवृत्ति मॉडुलन तथा (e) कला मॉडुलन

इसी प्रकार किसी स्पंद के तीन महत्वपूर्ण लक्षण होते हैं: स्पंद आयाम, स्पंद अवधि अथवा स्पंद चौड़ाई, तथा स्पंद स्थिति (जो स्पंद के आयाम में वृद्धि या गिरावट के काल को निर्दिष्ट करती है) जिन्हें चित्र15.7(b) में दर्शाया गया है। अत: स्पंद माडुलन के विभिन्न प्रकार है : (a) स्पंद आयाम माडुलन (PAM), (b) स्पंद अवधि माडुलन (PDM) अथवा स्पंद चौड़ाई माडुलन (PWM), तथा (c) स्पंद स्थिति माडुलन (PPM)। इस अध्याय के अंतर्गत हम अपनी चर्चा को आयाम माडुलन तक ही सीमित रखेंगे।

15.8 आयाम माडुलन

आयाम माडुलन में वाहक तरंग के आयाम में सूचना सिग्नल के अनुसार परिवर्तन होता है। यहाँ पर किसी ज्यावक्रीय सिग्नल को माडुलक सिग्नल के रूप में उपयोग करके, हम आयाम माडुलन प्रक्रिया को स्पष्ट करेंगे।

मान लीजिए $c(t) = A_c \sin \omega_c t$ वाहक तरंग को निरूपित करती है, तथा $m(t) = A_m \sin \omega_m t$ माडुलक सिग्नल अथवा संदेश को निरूपित करती है जबकि, $\omega_m = 2\pi f_m$ संदेश सिग्नल की कोणीय आवृत्ति है। तब माडुलित सिग्नल $c_m(t)$ को इस प्रकार व्यक्त किया जा सकता है।

$$c_m(t) = (A_c + A_m \sin \omega_m t) \sin \omega_c t$$

$$= A_c \left(1 + \frac{A_m}{A_c} \sin \omega_m t\right) \sin \omega_c t \qquad (15.3)$$

ध्यान दीजिए, अब संदेश सिग्नल माडुलित सिग्नल में अंतर्विष्ट है। इसे चित्र 15.8(c) में भी देखा जा सकता है। समीकरण (15.3) से हम यह लिख सकते हैं,

$$c_m(t) = A_c \sin w_c t + mA_c \sin w_m t \sin w_c t \qquad (15.4)$$

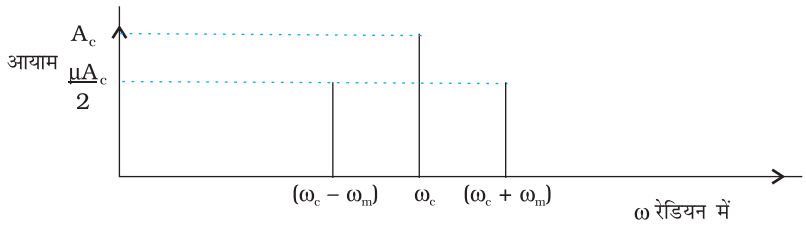
माडुलन और विमाडुलन
http://www.williamson_labs.com/480_mod.htm
PHYSICS

यहाँ $\mu = A_m/A_c$ माडुलन सूचकांक है। विरूपण से बचाव के लिए व्यवहार में $\mu \leq 1$ रखा जाता है।

त्रिकोणमितीय संबंध $\sin A \sin B = \frac{1}{2}[\cos(A-B) - \cos(A+B)]$ का उपयोग करके हम समीकरण 15.4 के $c_m(t)$ को इस प्रकार व्यक्त कर सकते हैं।

$$c_m(t) = A_c \sin \omega_c t + \frac{\mu A_c}{2} \cos(\omega_c - \omega_m)t - \frac{\mu A_c}{2} \cos(\omega_c + \omega_m)t \qquad (15.5)$$

यहाँ पर $(\omega_c - \omega_m)$ तथा $(\omega_c + \omega_m)$ को क्रमशः *निम्न पार्श्व आवृत्ति* तथा *उच्च पार्श्व आवृत्ति* कहते हैं। इस प्रकार अब माडुलित सिग्नल में ω_c आवृत्ति की वाहक तरंग के साथ दो ज्यावक्रीय तरंगें, जिनकी आवृत्तियाँ से कुछ भिन्न होती हैं, और जिन्हें *पार्श्व बैंड* कहते हैं, अंतर्विष्ट होती हैं। चित्र 15.9 में माडुलित सिग्नल का आवृत्ति स्पेक्ट्रम दर्शाया गया है।



चित्र 15.9 किसी आयाम माडुलित सिग्नल का आयाम व ω के बीच ग्राफ़।

जब तक प्रसारित आवृत्तियाँ (वाहक तरंगें) पर्याप्त दूरियों पर रखी जाती हैं ताकि पार्श्व बैंड एक दूसरे पर अतिव्यापित न हों, विभिन्न स्टेशन एक दूसरे में बिना बाधा पहुँचाए प्रचालित हो सकते हैं।

उदाहरण 15.2

उदाहरण 15.2 10 kHz आवृत्ति तथा 10 V शिखर वोल्टता के संदेश सिग्नल का उपयोग किसी 1 MHz आवृत्ति तथा 20 V शिखर वोल्टता की वाहक तरंग को माडुलित करने में किया गया है। (a) माडुलन सूचकांक तथा (b) उत्पन्न पार्श्व बैंड ज्ञात कीजिए।

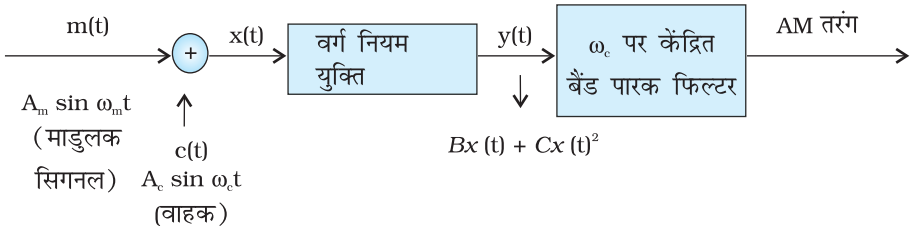
हल

(a) माडुलन सूचकांक =10/20 = 0.5

(b) पार्श्व बैंड (1000+10) kHz =1010 kHz तथा (1000–10 kHz) = 990 kHz पर हैं।

15.9 आयाम माडुलित तरंग को उत्पन्न करना

आयाम माडुलन उत्पन्न करने के विविध ढंग हो सकते हैं। चित्र 15.10 में ब्लॉक आरेख में इसकी एक सरल संकल्पनात्मक विधि दर्शायी गई है।



चित्र 15.10 AM सिग्नल प्राप्त करने के लिए सरल माडुलक का ब्लॉक आरेख।

यहाँ सिग्नल $x(t)$ को उत्पन्न करने के लिए माडुलक सिग्नल $A_m \sin \omega_m t$ को वाहक सिग्नल $A_c \sin \omega_c t$ में मिलाया जाता है। इस सिग्नल $x(t) = A_m \sin\omega_m t + A_c \sin \omega_c t$ को फिर वर्ग नियम युक्ति, जो कि एक अरैखिक युक्ति है, से गुज़ारते हैं। इस प्रकार उत्पन्न निर्गत है :

$$y(t) = B\,x(t) + Cx^2(t) \qquad (15.6)$$

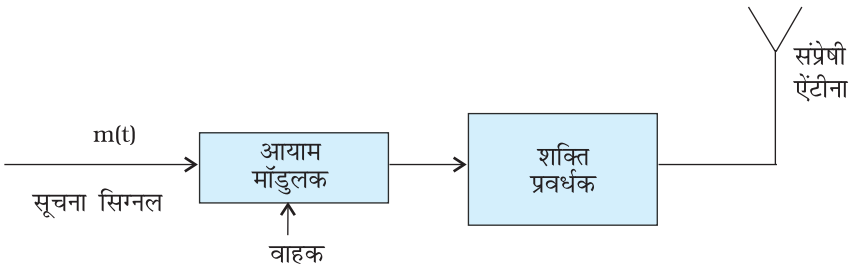
यहाँ B तथा C नियतांक हैं। इस प्रकार

$$y(t) = BA_m \sin \omega_m t + BA_c \sin \omega_c t +$$
$$C[A_m^2 \sin^2\omega_m t + A_c^2 \sin^2\omega_c t + 2A_m A_c \sin\omega_m t \sin\omega_c t] \qquad (15.7)$$
$$= BA_m \sin \omega_m t + BA_c \sin \omega_c t$$
$$+ \frac{CA_m^2}{2} + A_c^2 - \frac{CA_m^2}{2}\cos 2\omega_m t - \frac{CA_c^2}{2}\cos 2\omega_c t$$
$$+ CA_m A_c \cos(\omega_c - \omega_m)\, t - CA_m A_c \cos(\omega_c + \omega_m)\, t \qquad (15.8)$$

यहाँ पर, त्रिकोणमितीय संबंधों $\sin^2 A = (1 - \cos 2A)/2$ तथा $\sin A \sin B$ के लिए संबंध, जिसे पहले भी उपयोग किया जा चुका है, का उपयोग किया गया है।

समीकरण (15.8) एक dc पद $C/2\left(A_m^2 + A_c^2\right)$ तथा आवृत्तियों ω_m, $2\omega_m$, ω_c, $2\omega_c$, $\omega_c - \omega_m$, $\omega_c + \omega_m$ के ज्यावक्र हैं जैसा कि चित्र 15.10 में दर्शाया गया है। इस सिग्नल को बैंड पारक फिल्टर* से गुज़ारते हैं जो dc अवयव तथा आवृत्तियों ω_m, $2\omega_m$ तथा $2\omega_c$ के ज्यावक्रों का निराकरण करके ω_c, $\omega_c - \omega_m$, $\omega_c + \omega_m$ आवृत्तियों को प्रतिधारित कर लेता है। इस प्रकार बैंड पारक फिल्टर का निर्गत का समीकरण (15.5) के समान रूप होता है, अत: यह एक AM तरंग होती है।

यहाँ यह उल्लेख करना आवश्यक है कि माडुलित सिग्नल को ऐसे ही प्रेषित नहीं किया जा सकता। माडुलक का अनुगमन एक शक्ति प्रवर्धक करता है जो सिग्नल को आवश्यक शक्ति प्रदान करता है। इस प्रकार प्राप्त माडुलित सिग्नल का संभरण किसी उपयुक्त साइज़ के ऐंटीना को किया जाता है जो चित्र 15.11 में दर्शाए अनुसार सिग्नल को विकिरित कर देता है।



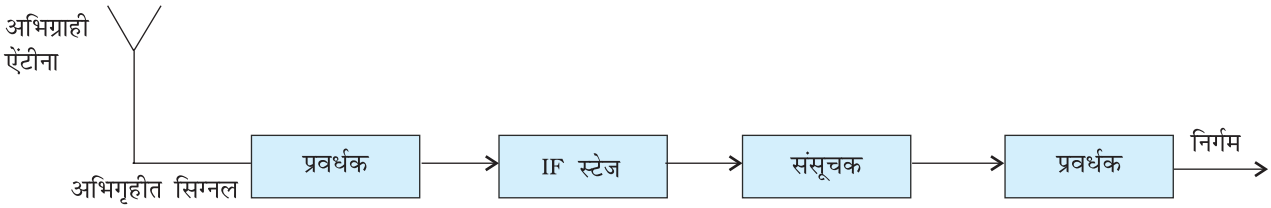
चित्र 15.11 प्रेषित्र का ब्लॉक-आरेख।

15.10 आयाम माडुलित तरंग का संसूचन

चैनल से प्रसारण में प्रेषित संदेश क्षीण हो जाता है। अत: अभिग्राही ऐंटीना किसी प्रवर्धक तथा संसूचक का अनुगमन करता है। साथ ही, संसाधन की सुविधा के लिए वाहक आवृत्ति को प्राय: किसी मध्य आवृत्ति *(IF)* चरण पर संसूचन से पूर्व निम्न आवृत्ति में परिवर्तित कर लेते हैं। संसूचित

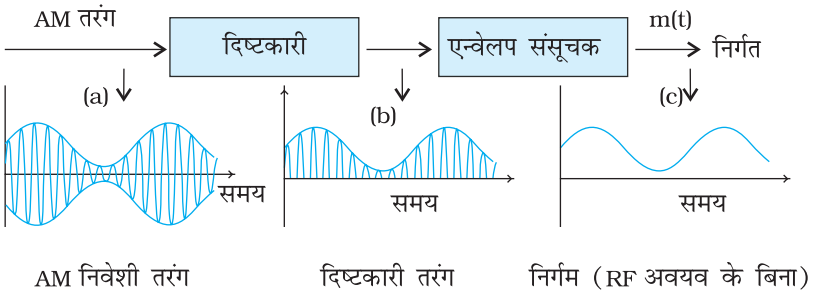
* बैंड पारक फिल्टर न्यून तथा उच्च आवृत्तियों का निराकरण कर देता है तथा आवृत्तियों के एक बैंड को गुज़रने देता है।

सिग्नल इतना प्रबल नहीं होता कि उसका उपयोग किया जा सके, अत: उसे प्रवर्धित करने की आवश्यकता होती है। चित्र 15.12 में किसी प्ररूपी अभिग्राही का ब्लॉक-आरेख दर्शाया गया है।



चित्र 15.12 अभिग्राही का ब्लॉक-आरेख।

संसूचन वह प्रक्रिया है जिसके द्वारा माडुलित वाहक तरंग से माडुलिक सिग्नल की पुन: प्राप्ति की जाती है। हमने अभी यह देखा था कि माडुलित वाहक तरंग में ω_c तथा $\omega_c \pm \omega_m$ आवृत्तियाँ होती हैं। इससे आवृत्ति ω_m वाले कोणीय मूल संदेश सिग्नल $m(t)$ को प्राप्त करने की एक सरल विधि चित्र 15.13 में ब्लॉक-आरेख के रूप में दर्शायी गई है।



चित्र 15.13 AM सिग्नल के संसूचक का ब्लॉक-आरेख। y-अक्ष के लिए भौतिक राशि वोल्टता अथवा धारा हो सकती है।

माडुलित सिग्नल, जिसका रूप चित्र 15.13(a) में दर्शाया गया है, दिष्टकारी से गुज़ारा जाता है जिसके फलस्वरूप (b) में दर्शाए अनुसार निर्गम प्राप्त होता है। सिग्नल (b) का यह एन्वेलप ही मूल सिग्नल है। सिग्नल $m(t)$ की पुन: प्राप्ति के लिए इस संदेश सिग्नल (b) को एन्वेलप संसूचक (जो एक सरल RC परिपथ होता है) से गुज़ारा जाता है।

इस अध्याय में हमने संचार तथा संचार व्यवस्थाओं की कुछ मूल संकल्पनाओं के विषय में चर्चा की है। इसमें हमने एक विशिष्ट प्रकार के अनुरूप माडुलन–आयाम माडुलन (AM) के विषय में भी चर्चा की है। माडुलन के अन्य प्रकारों तथा अंकीय संचार व्यवस्था की भी आधुनिक संचार में महत्वपूर्ण भूमिका है। इस क्षेत्र में प्रतिदिन अन्य उत्तेजनापूर्ण विकास कार्य हो रहे हैं।

अब तक हमने अपनी चर्चा को कुछ मूल संचार व्यवस्थाओं तक ही सीमित रखा है। इस अध्याय को समाप्त करने से पहले हम आपको आधुनिक समय की कुछ उन संचार व्यवस्थाओं की झलक दिखाना चाहते हैं जिनसे हमारे दैनिक जीवन में सूचनाओं के आदान-प्रदान के ढंग में आमूलचूल परिवर्तन उत्पन्न हो गया है।

अतिरिक्त जानकारी

इंटरनेट

इस व्यवस्था का सारे संसार में करोड़ों उपभोक्ता उपयोग कर रहे हैं। इस व्यवस्था के अंतर्गत किसी विशाल एवं जटिल नेटवर्क से संयोजित दो या अधिक कंप्यूटरों के बीच हर प्रकार की सूचनाओं का आदान-प्रदान एवं संचार का अवसर प्राप्त होता है। यह 1960 में आरंभ हुआ तथा सर्वसाधारण के लिए 1990 से सुलभ किया गया। समय के साथ उसमें विस्फोटक वृद्धि हुई है जो अपनी पहुँच का निरंतर विस्तार कर रही है। इसके निम्नलिखित अनुप्रयोग हैं:

(i) *ई-मेल* : यह ई-मेल सॉफ़्टवेयर का उपयोग करके पाठ्यसामग्री/आलेखी सामग्री के आदान-प्रदान की सुविधा प्रदान करता है। हम कोई पत्र लिखकर उसे ISP's (इंटरनेट सेवा प्रदानकर्ता) के द्वारा पत्र पाने वाले के पास भेज सकते हैं। यहाँ ISP डाकघर के रूप में पत्र भेजने और प्राप्त करने का कार्य करता है।

(ii) *फाइल ट्रांसफर* : फाइल स्थानांतर कार्यक्रम (FTP) इंटरनेट से जुड़े एक कंप्यूटर से दूसरे कंप्यूटर को फाइल/सॉफ़्टवेयर स्थानांतरित करने का अवसर प्रदान करता है।

(iii) *वर्ल्ड वाइड वेब* (*WWW*) : ऐसे कंप्यूटर जो दूसरे से बाँटने के लिए अपने भीतर कुछ विशिष्ट सूचना संग्रहित करते हैं या तो स्वयं ही अथवा वेब सेवा प्रदान करने वालों के द्वारा कोई वेबसाइट प्रदान करते हैं। शासकीय विभाग, कम्पनियाँ, अशासकीय संगठन (NGO) तथा कोई व्यक्ति भी अपने क्रियाकलापों के विषय में सीमित अथवा मुक्त उपयोग के लिए अपनी सूचना इसमें दे सकते हैं। यह जानकारी इसके उपभोक्ताओं के लिए सुलभ (पहुँच के भीतर) हो जाती है। बहुत से सर्च इंजन जैसे याहू, गूगल आदि संबंधित वेबसाइटों की सूची बनाकर जानकारी प्राप्त करने में हमारी सहायता करते हैं। वेब का एक अत्यंत शक्तिशाली लक्षण *हाइपर टैक्स्ट* है जो स्वत: ही हमें प्रासंगिक जानकारी देने के लिए जोड़ *HTML* (हाइपर टेक्स्ट मार्कअप लेंग्वेज) का उपयोग करके वेब के एक पृष्ठ को दूसरे पृष्ठ से जोड़ देता है।

(iv) *ई-कॉमर्स* : इलेक्ट्रॉनिक साधनों जैसे क्रेडिट कार्ड का उपयोग करके इंटरनेट के उपयोग द्वारा व्यापार को प्रोन्नत करना, ई-कॉमर्स कहलाता है। ग्राहक विविध उत्पादों एवं सेवाओं के प्रतिबिंबों को देखकर विभिन्न कंपनियों के वेबसाइट द्वारा उनके उत्पादों एवं सेवाओं के विषय में जानकारी प्राप्त कर लेते हैं। वे घर अथवा ऑफिस से वस्तुओं की ऑन लाइन खरीदारी कर सकते हैं। कंपनियाँ वस्तुएँ अथवा अपनी सेवाएँ डाक द्वारा अथवा कूरियर सेवा द्वारा प्रदान कर देती हैं।

(v) *बातचीत-गपशप* : समान रुचि के व्यक्तियों द्वारा टाइप किए हुए संदेशों द्वारा बातचीत को चैट (Chat) करना कहते हैं। चैट ग्रुप में सम्मिलित कोई भी व्यक्ति तात्कालिक संदेश प्राप्त करके तुरंत ही उत्तर दे सकता है।

अनुलिपि (FAX)

यह इलेक्ट्रॉनिक सिग्नल उत्पन्न करने के लिए किसी लिखित प्रमाण की विषय वस्तु का (प्रतिबिंब के रूप में विषय वस्तु की भाँति नहीं) क्रमवीक्षण करता है। ये सिग्नल फिर उसकी मंजिल (दूसरी FAX मशीन) तक सामान्य ढंग से टेलीफ़ोन की लाइन द्वारा भेजे जाते हैं। मंजिल पर पहुँचने के पश्चात सिग्नलों को FAX मशीन मूल लिखित प्रमाणों की प्रतिकृति में पुन: परिवर्तित कर देती है। ध्यान देने योग्य बात यह है कि FAX मशीन, किसी स्थिर लिखित प्रमाण का प्रतिबिंब प्रदान करती है, टेलीविज़न की भाँति गतिशील वस्तुओं के प्रतिबिंब प्रदान नहीं कर सकती।

मोबाइल टेलीफ़ोनी

मोबाइल टेलीफ़ोनी की परिकल्पना सर्वप्रथम 1970 के दशक में विकसित की गई और अगले दशक में इसे पूर्णत: लागू कर दिया गया। इस व्यवस्था की केंद्रीय अभिधारणा के अनुसार समस्त सेवा क्षेत्र को उचित संख्या के कक्षों में बाँट लेते हैं। ये कक्ष किसी ऑफिस जिसे *मोबाइल टेलीफ़ोन स्विचिंग ऑफिस* (MTSO) कहते हैं पर केंद्रित रखते हैं। प्रत्येक कक्ष के पास एक निम्न शक्ति प्रेषित्र है जिसे *बेस स्टेशन* कहते हैं, तथा यह मोबाइल रिसीवरों (जिसे बोलचाल में सेल फ़ोन कहते हैं) की बड़ी संख्या को सेवा प्रदान करता है। प्रत्येक कक्ष के पास कुछ वर्ग किलोमीटर अथवा इससे भी कम क्षेत्र होता है जो उपभोक्ताओं की संख्या पर निर्भर करता है। जब कोई मोबाइल रिसीवर किसी एक बेस स्टेशन के क्षेत्र से बाहर किसी अन्य क्षेत्र में जाता है तो यह आवश्यक है कि उस मोबाइल उपभोक्ता को उसी बेस स्टेशन पर स्थानांतरित किया जाए। इस कार्यविधि को *हैंडओवर* या *हैंडऑफ़* कहते हैं। यह प्रक्रिया अत्यधिक तीव्रता से चलाई जाती है तथा उपभोक्ता इस पर ध्यान तक नहीं दे पाता। मोबाइल टेलीफ़ोन प्ररूपी ढंग से आवृत्तियों के UHF परिसर (लगभग 800-950 MHz) में प्रचालित किए जाते हैं।

सारांश

1. इलेक्ट्रॉनिक संचार का तात्पर्य सूचना अथवा संदेशों (जो वैद्युत वोल्टता या धारा के रूप में उपलब्ध होते हैं) को एक बिंदु से दूसरे बिंदु तक विश्वसनीय ढंग से स्थानांतरित करना है।
2. किसी संचार व्यवस्था के तीन मूल एकक–संप्रेषक, संप्रेषण–चैनल, तथा अभिग्राही होते हैं।
3. संचार व्यवस्था के दो महत्वपूर्ण प्रकार अनुरूप तथा अंकीय संचार हैं। अनुरूप संचार में प्रसारित की जाने वाली सूचना व्यापक रूप से संतत तरंगवत होती है, जबकि अंकीय संचार में मात्र विविक्त अथवा क्वांटित स्तर के होते हैं।
4. प्रत्येक संदेश सिग्नल का एक आवृत्ति परिसर होता है। किसी संदेश सिग्नल की बैंड–चौड़ाई का तात्पर्य उस आवृत्ति–बैंड से होता है जो उस संदेश सिग्नल में अंतर्विष्ट सूचना संतोषजनक प्रेषण के लिए आवश्यक होता है। इसी प्रकार कोई भी व्यावहारिक संचार–व्यवस्था आवृत्ति के केवल किसी परिसर को ही प्रेषण का अवसर प्रदान करती है और इसी को उस संचार व्यवस्था की बैंड–चौड़ाई कहा जाता है।
5. निम्न आवृत्तियों को लंबी दूरी तक संप्रेषित नहीं किया जा सकता है। अत: इसे एक विशेष प्रक्रिया जिसे माडुलन कहते हैं, के द्वारा किसी उच्च आवृत्ति के वाहक सिग्नल पर अध्यारोपित किया जाता है।
6. माडुलन में वाहक सिग्नल के कुछ लक्षण जैसे आयाम, आवृत्ति अथवा कला, माडुलक अथवा संदेश सिग्नल के अनुरूप परिवर्तित हो जाते हैं। तदनुसार विभिन्न माडुलित तरंगों को आयाम माडुलित (AM), आवृत्ति माडुलित (FM), अथवा कला माडुलित (PM) तरंग कहते हैं।
7. स्पंद माडुलन का वर्गीकरण इस प्रकार किया जाता है : स्पंद आयाम माडुलन (PAM), स्पंद अवधि माडुलन (PDM) अथवा स्पंद चौड़ाई माडुलन (PWM), तथा स्पंद स्थिति माडुलन (PPM)
8. लंबी दूरियों तक संप्रेषण के लिए सिग्नलों को आकाश में कुछ युक्तियों के द्वारा विकिरित किया जाता है जिन्हें ऐंटीना कहते हैं। ये विकिरित सिग्नल वैद्युतचुंबकीय तरंगों के रूप में प्रसारित होते हैं तथा उनके प्रसारण की विधा को पृथ्वी तथा इसका वायुमंडल प्रभावित करता है। पृथ्वी के पृष्ठ के निकट वैद्युतचुंबकीय तरंगें पृष्ठीय तरंगों के रूप में प्रसारित होती हैं। पृष्ठीय प्रसारण कुछ MHz आवृत्तियों तक ही उपयोगी होता है।
9. पृथ्वी के किन्हीं दो बिंदुओं के बीच लंबी दूरी का संचार आयनमंडल द्वारा वैद्युतचुंबकीय तरंगों के परावर्तन द्वारा संभव हो पाता है। इस प्रकार की तरंगों को व्योम तरंगें कहते हैं। व्योम तरंगों का प्रसारण लगभग 30 MHz आवृत्ति तक ही हो सकता हैं। इस आवृत्ति से अधिक आवृत्ति की वैद्युतचुंबकीय तरंगें अनिवार्य रूप से आकाश तरंगों के रूप में प्रसारित होती है। आकाश तरंगों का उपयोग दृष्टिरेखीय संचार तथा उपग्रह संचार में होता है।
10. यदि कोई ऐंटीना h_T ऊँचाई से वैद्युतचुंबकीय तरंगें विकिरित करता है, तो उसके परिसर d_T को $\sqrt{2Rh_T}$ द्वारा व्यक्त किया जाता है, यहाँ R पृथ्वी की त्रिज्या है।
11. आयाम माडुलित सिग्नल में $(\omega_c - \omega_m)$, ω_c तथा $(\omega_c + \omega_m)$. आवृत्तियाँ होती हैं।
12. संदेश सिग्नल तथा वाहक तरंग को किसी अरैखिक युक्ति पर अनुप्रयुक्त करके तथा फिर उसे बैंड पारक फिल्टर से गुजारकर, आयाम माडुलित सिग्नल प्राप्त किया जाता है।
13. AM संसूचन किसी AM तरंग रूप से माडुलक सिग्नल की पुन: प्राप्ति की वह प्रक्रिया है जिसके संचालन में किसी दिष्टकारी तथा एन्वेलप संसूचक का उपयोग किया जाता है।

विचारणीय विषय

1. संदेश/सूचना सिग्नल के संप्रेषण तथा अभिग्रहण की प्रक्रिया में सिग्नल के साथ नॉयज (रव) जुड़ जाता है। क्या आप इस नॉयज के कुछ स्रोत बता सकते हैं?
2. माडुलन की प्रक्रिया में नयी आवृत्तियाँ जिन्हें पार्श्वबैंड कहते हैं, वाहक तरंग आवृत्ति के दोनों ओर (वाहक आवृत्ति से अधिक तथा कम) उत्पन्न हो जाते हैं। इनका परिमाण अधिकतम माडुलक आवृत्ति के बराबर होता है। क्या (a) केवल पार्श्वबैंडों, (b) केवल एक पार्श्वबैंड को प्रेषित करके संदेश की पुन:प्राप्ति संभव हो सकती है?
3. आयाम माडुलन में माडुलन सूचकांक $\mu \leq 1$ का उपयोग किया जाता है। यदि $\mu > 1$ हो तो क्या होगा?

अभ्यास

15.1 व्योम तरंगों के उपयोग द्वारा क्षितिज के पार संचार के लिए निम्नलिखित आवृत्तियों में से कौन सी आवृत्ति उपयुक्त रहेगी?

(a) 10 kHz
(b) 10 MHz
(c) 1 GHz
(d) 1000 GHz

15.2 UHF परिसर की आवृत्तियों का प्रसारण प्राय: किसके द्वारा होता है?

(a) भू-तरंगें
(b) व्योम तरंगें
(c) पृष्ठीय तरंगें
(d) आकाश तरंगें

15.3 अंकीय सिग्नल :

(i) मानों का संतत समुच्चय प्रदान नहीं करते।
(ii) मानों को विविक्त चरणों के रूप में निरूपित करते हैं।
(iii) द्विआधारी पद्धति का उपयोग करते हैं।
(iv) दशमलव के साथ-साथ द्विआधारी पद्धति का भी उपयोग करते हैं।

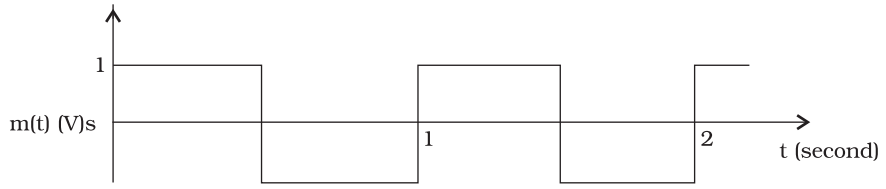
उपरोक्त प्रकथनों में कौन से सत्य हैं?

(a) केवल (i) तथा (ii)
(b) केवल (ii) तथा (iii) ,
(c) (i), (ii) तथा (iii) परन्तु (iv) नहीं
(d) (i), (ii), (iii) तथा (iv) सभी

15.4 दृष्टिरेखीय संचार के लिए क्या यह आवश्यक है कि प्रेषक ऐंटीना की ऊँचाई अभिग्राही ऐंटीना की ऊँचाई के बराबर हो? कोई TV प्रेषक ऐंटीना 81 m ऊँचा है। यदि अभिग्राही ऐंटीना भूस्तर पर है तो यह कितने क्षेत्र में सेवाएँ प्रदान करेगा?

15.5 12 V शिखर वोल्टता की वाहक तरंग का उपयोग किसी संदेश सिग्नल के प्रेषण के लिए किया गया है। माडुलन सूचकांक 75% के लिए माडुलक सिग्नल की शिखर वोल्टता कितनी होनी चाहिए ?

15.6 चित्र 15.14 में दर्शाए अनुसार कोई माडुलक सिग्नल वर्ग तरंग है।



चित्र 15.14

दिया गया है कि वाहक तरंग $c(t) = 2\sin(8\pi t)$ V

(i) आयाम माडुलित तरंग रूप आलेखित कीजिए।

(ii) माडुलन सूचकांक क्या है?

15.7 किसी माडुलित तरंग का अधिकतम आयाम 10V तथा न्यूनतम आयाम 2V पाया जाता है। माडुलन सूचकांक μ का मान निश्चित कीजिए।

यदि न्यूनतम आयाम शून्य वोल्ट हो तो माडुलन सूचकांक क्या होगा?

15.8 आर्थिक कारणों से किसी AM तरंग का केवल ऊपरी पार्श्व बैंड ही प्रेषित किया जाता है, परंतु ग्राही स्टेशन पर वाहक तरंग उत्पन्न करने की सुविधा होती है। यह दर्शाइए कि यदि कोई ऐसी युक्ति उपलब्ध हो जो दो सिग्नलों की गुणा कर सके, तो ग्राही स्टेशन पर माडुलक सिग्नल की पुन:प्राप्ति संभव है।

अभ्यासों के उत्तर

अध्याय 9

9.1 $v = -54$ cm । प्रतिबिंब वास्तविक, उलटा तथा आवर्धित है। प्रतिबिंब का साइज़ 5.0 cm है। जब $u \to f$, $v \to \infty$; $u < f$ के लिए प्रतिबिंब आभासी बनेगा।

9.2 $v = 6.7$ cm। आवर्धन = 5/9, अर्थात प्रतिबिंब का साइज़ 2.5 cm है। जैसे ही $u \to \infty$; $v \to f$ (परंतु फोकस से आगे कभी नहीं बढ़ता) जबकि $m \to 0$

9.3 1.33; 1.7 cm

9.4 $n_{ga} = 1.51$; $n_{wa} = 1.32$; $n_{gw} = 1.144$; जिससे $\sin r = 0.6181$ अर्थात $r \simeq 38°$ प्राप्त होता है।

9.5 $r = 0.8 \times \tan i_c$ तथा $\sin i_c = 1/1.33 \cong 0.75$, जहाँ r सबसे बड़े वृत्त की त्रिज्या मीटर में है तथा i_c पानी-वायु अंतरापृष्ठ के लिए क्रांतिक कोण है। क्षेत्रफल = 2.6 m^2

9.6 $n \cong 1.53$ तथा जल में प्रिज्म के लिए $D_m \cong 10°$

9.7 $R = 22$ cm

9.8 यहाँ बिंब आभासी तथा प्रतिबिंब वास्तविक है। $u = +12$ cm (बिंब दाहिनी ओर है; आभासी)
(a) $f = +20$ cm । प्रतिबिंब वास्तविक है तथा लेंस से 7.5 cm दूर दाहिनी ओर है।
(b) $f = -16$ cm । प्रतिबिंब वास्तविक है तथा लेंस से 48 cm दूर दाहिनी ओर है।

9.9 $v = 8.4$ cm । प्रतिबिंब सीधा तथा आभासी है। यह साइज़ में छोटा है, साइज़ = 1.8 cm। जैसे $u \to \infty$, $v \to f$ (लेकिन f से आगे नहीं जाता जबकि $m \to 0$) ।
ध्यान दीजिए, जब वस्तु अवतल लेंस ($f = 21$ cm) के फोकस पर रखी होती है, तब उसका प्रतिबिंब लेंस से 10.5 cm दूर बनता है (अनंत पर नहीं बनता जैसा कि गलती से कोई सोच सकता है)।

9.10 60 cm फोकस दूरी का अपसारी लेंस।

9.11 (a) $v_e = -25$ cm तथा $f_e = 6.25$ cm से $u_e = -5$ cm; $v_0 = (15 - 5)$ cm = 10 cm प्राप्त होता है,
$f_o = u_o = -2.5$ cm; आवर्धन क्षमता = 20
(b) $u_0 = -2.59$ cm; आवर्धन क्षमता = 13.5

9.12 25 cm दूरी पर प्रतिबिंब बनने के लिए नेत्रिका का कोणीय आवर्धन

$$= \frac{25}{2.5} + 1 = 11; \quad |u_e| = \frac{25}{11} \text{cm} = 2.27 \text{ cm}; \quad v_0 = 7.2 \text{ cm}$$

पृथकन दूरी = 9.47 cm; आवर्धन क्षमता = 88

9.13 24; 150 cm

9.14 (a) कोणीय आवर्धन = 1500
(b) प्रतिबिंब का व्यास = 13.7 cm

9.15 वांछित परिणाम ज्ञात करने के लिए दर्पण के समीकरण तथा दर्पण की सीमा का प्रयोग कीजिए।
(a) $f < 0$ (अवतल दर्पण); $u < 0$ (बिंब बाईं ओर)
(b) $f > 0$ के लिए; $u < 0$
(c) $f > 0$ (उत्तल दर्पण) तथा $u < 0$
(d) $f < 0$ (अवतल दर्पण); $f < u < 0$

9.16 पिन 5.0 cm ऊपर उठी हुई प्रतीत होती है। यह स्पष्ट प्रकाश किरण आरेख द्वारा देखा जा सकता है कि उत्तर काँच के गुटके की स्थिति पर निर्भर नहीं करता (छोटे आपतन कोणों के लिए)।

9.17 (a) $\sin i'_c = 1.44/1.68$ जिससे $i'_c = 59°$ प्राप्त होता है। पूर्ण आंतरिक परावर्तन $i > 59°$ अथवा जब $r < r_{max} = 31°$ पर होता है। अब, $(\sin i_{max} / \sin r_{max}) = 1.68$, जिससे $i_{max} \simeq 60°$ प्राप्त होता है। इस प्रकार कोण के परिसर $0 < i < 60°$ की सभी आपतित किरणों का पाइप में पूर्ण आंतरिक परावर्तन होगा (यदि पाइप की लंबाई परिमित है, जो कि व्यवहार में होती है, तब i पर निम्न सीमा पाइप के व्यास तथा उसकी लंबाई के अनुपात द्वारा निर्धारित होगी।)
(b) यदि कोई बाह्य आवरण नहीं है, जो $i'_c = \sin^{-1}(1/1.68) = 36.5°$। अब, $i = 90°$ के लिए $r = 36.5°$ तथा $i' = 53.5°$ होंगे, जो i'_c से अधिक है। इस प्रकार [परिसर में सभी आपतित किरणें $(53.5° < i < 90°)$] पूर्ण आंतरिक परावर्तित होंगी।

9.18 (a) किसी समतल अथवा उत्तल दर्पण के 'पीछे' किसी बिंदु पर अभिसरित किरणें दर्पण के सामने परदे पर किसी बिंदु पर परावर्तित हो जाती हैं। दूसरे शब्दों में, कोई समतल दर्पण अथवा उत्तल दर्पण आभासी बिंब के लिए वास्तविक प्रतिबिंब उत्पन्न कर सकता है। कोई उचित प्रकाश किरण आरेख खींचकर स्वयं को संतुष्ट कीजिए।
(b) जब परावर्तित अथवा अपवर्तित किरणें अपसारी होती हैं तो प्रतिबिंब आभासी होता है। अपसारी किरणों को उचित अभिसारी लेंस की सहायता से परदे पर अभिसरित किया जा सकता है। नेत्र का आभासी लेंस ठीक यही करता है। यहाँ आभासी प्रतिबिंब लेंस के लिए बिंब की भाँति कार्य करता है और वास्तविक प्रतिबिंब बनता है। ध्यान दीजिए, यहाँ आभासी प्रतिबिंब की स्थिति पर परदे को अवस्थित नहीं किया जाता है। यहाँ कोई अपवाद नहीं है।
(c) अधिक लंबा।
(d) लगभग अभिलंबत: देखने की तुलना में तिरछे देखने के लिए आभासी गहराई कम हो जाती है। प्रेक्षक की विभिन्न स्थितियों के लिए प्रकाश किरण आरेख खींचकर इस तथ्य को स्वयं स्वीकार कीजिए।
(e) हीरे का अपवर्तनांक लगभग 2.42 होता है जो सामान्य काँच के अपवर्तनांक (लगभग 1.5) से काफी अधिक होता है। हीरे का क्रांतिक कोण लगभग 24° है जो काँच के क्रांतिक कोण की अपेक्षा काफी कम है। कोई हीरे को तराशने वाला दक्ष व्यक्ति आपतन कोण (हीरे के भीतर) के बड़े परिसर 24° से 90° का लाभ यह सुनिश्चित करने में उठा लेता है कि हीरे से बाहर निकलने से पूर्व प्रकाश कई फलकों से पूर्ण परावर्तित हो–इस प्रकार से कि हीरे का चमकदार प्रभाव उत्पन्न हो।

9.19 परदे तथा वस्तु के बीच निश्चित दूरी s के लिए, लेंस समीकरण उस स्थिति में u तथा v के लिए वास्तविक हल प्रदान नहीं करती, जब f का मान $s/4$ से अधिक होता है।

अत: $f_{max} = 0.75$ m

9.20 21.4 cm

9.21 (a) (i) मान लीजिए कि कोई समांतर प्रकाश-पुंज बाईं ओर से पहले उत्तल लेंस पर आपतित होता है। तब

$f_1 = 30$ cm, $u_1 = -\infty$ से प्राप्त होता है $v_1 = +30$ cm। यह प्रतिबिंब दूसरे लेंस के लिए आभासी बिंब बन जाता है।

$f_2 = -20$ cm, $u_2 = +(30 - 8)$ cm $= +22$ cm, जिससे $v_2 = -220$ cm प्राप्त होता है। समांतर आपतित किरण-पुंज दो लेंसों के निकाय के केंद्र से 216 cm दूर किसी बिंदु से अपसारित होता प्रतीत होता है।

(ii) मान लीजिए कि कोई समांतर प्रकाश-पुंज बाईं ओर से पहले अवतल लेंस पर आपतित होता है। तब $f_1 = -20$ cm, $u_1 = -\infty$ से प्राप्त होता है $v_1 = -20$ cm। यह प्रतिबिंब दूसरे लेंस के लिए वास्तविक बिंब बन जाता है। $f_2 = +30$ cm, $u_2 = -(20 + 8)$ cm $= -28$ cm, से $v_2 = -420$ cm प्राप्त होता है। समांतर प्रकाश-पुंज दो लेंसों के तंत्र के मध्य बिंदु की बाईं ओर से 416 cm दूर स्थित बिंदु से अपसरित होता प्रतीत होता है।

स्पष्ट है कि उत्तर इस पर निर्भर करता है कि लेंस तंत्र के किस ओर समांतर प्रकाश-पुंज आपतित होता है। *साथ ही, हमारे पास कोई ऐसी सरल लेंस समीकरण नहीं है जो सभी u (तथा v) के मानों के लिए, निकाय के निश्चित नियतांक के पदों में सत्य हो। (निकाय के स्थिरांक f_1 तथा f_2 तथा दोनों लेंसों के बीच पृथकन दूरी द्वारा निर्धारित होते हैं।)* प्रभावी फोकस दूरी की धारणा, इसलिए इस तंत्र के लिए अर्थपूर्ण प्रतीत नहीं होती।

(b) $u_1 = -40$ cm, $f_1 = 30$ cm से $v_1 = 120$ cm प्राप्त होता है।

पहले (उत्तल) लेंस के कारण आवर्धन का परिमाण $= 120/40 = 3$

$u_2 = +(120 - 8)$ cm $= +112$ cm (बिंब आभासी)

$f_2 = -20$ cm से $v_2 = -\dfrac{112 \times 20}{92}$ cm प्राप्त होता है।

अर्थात दूसरे (अवतल) लेंस के कारण आवर्धन का परिमाण $= 20/92$

आवर्धन का नेट परिमाण $= 3 \times (20/92) = 0.652$

प्रतिबिंब का साइज़ $= 0.652 \times 1.5$ cm $= 0.98$ cm

9.22 यदि प्रिज़्म में अपवर्तित किरण दूसरे फलक पर क्रांतिक कोण i_c पर आपतित होती है तो, पहले फलक पर अपवर्तन कोण r का मान $(60° - i_c)$ होता है।

अब $i_c = \sin^{-1}(1/1.524) \simeq 41°$

अत: $r = 19°$ तथा $\sin i = 0.4962$, तथा $i = \sin^{-1} 0.4965 \simeq 30°$।

9.23 समान काँच के बने दो सर्वसम प्रिज़्मों को स्पर्श करते हुए यदि इस प्रकार समायोजित किया जाए कि उनके आधार एक दूसरे के विपरीत हों, तो वे एक काँच के स्लैब की भाँति कार्य करेंगे तथा इससे प्रकाश पुंज न तो विचलित होता है और न ही विक्षेपित होता है; परंतु पुंज का मात्र समांतर विस्थापन होता है।

(a) बिना विक्षेपण प्रकाश-पुंज को विचलित करने के लिए, किसी पदार्थ जैसे क्राउन काँच का एक पहला प्रिज़्म लीजिए तथा किसी उचित अपवर्तन कोण का फ्लिंट काँच का दूसरा प्रिज़्म चुनिए [दूसरे प्रिज़्म (फ्लिंट काँच) का अपवर्तन कोण क्राउन काँच के प्रिज़्म से छोटा लीजिए क्योंकि फ्लिंट काँच अपेक्षाकृत अधिक विक्षेपण करता है]। इन दोनों प्रिज़्मों को एक-दूसरे के सापेक्ष उलटा रखने पर एक प्रिज़्म दूसरे प्रिज़्म के विक्षेपण को निरस्त कर देता है।

(b) बिना विचलन के प्रकाश के विक्षेपण के लिए फ्लिंट काँच के प्रिज़्म के अपवर्तन कोण में वृद्धि कीजिए (अधिक और अधिक अपवर्तन कोण के फ्लिंट काँच के प्रिज़्म लेकर प्रयास कीजिए) ताकि दोनों प्रिज़्मों द्वारा उत्पन्न विचलन एक-दूसरे के समान तथा विपरीत हों। (फ्लिंट काँच का अपवर्तन क्राउन काँच की अपेक्षा अधिक होने के कारण अभी भी फ्लिंट काँच के प्रिज़्म का अपवर्तन कोण क्राउन काँच के प्रिज़्म की तुलना में छोटा होता है) क्योंकि इसमें बहुत से वर्णों के लिए समायोजन करना होता है, अत: यह वांछित उद्देश्य के लिए परिशुद्ध व्यवस्था नहीं होती।

9.24 वस्तुओं को अनंत पर देखने के लिए नेत्र अपनी न्यूनतम अभिसरित क्षमता का उपयोग करता है। यह क्षमता (40 + 20) डाइऑप्टर = 60 डाइऑप्टर है। इससे दृष्टिपटल तथा कॉर्निया नेत्र लेंस के बीच की दूरी r की स्थूल धारणा मिलती है : (5/3) cm। किसी बिंब को निकट बिंदु ($u = -25$ cm) पर फोकसित कर दृष्टिपटल ($v = 5/3$ cm) पर प्रतिबिंब प्राप्त करने के लिए फोकस दूरी

$$\left[\frac{1}{25}+\frac{3}{5}\right]^{-1} = \frac{25}{16}\text{cm}$$ होनी चाहिए।

यह 64 डाइऑप्टर अभिसरित क्षमता के तदनुरूप है। तब नेत्र लेंस की क्षमता (64 – 20) डाइऑप्टर = 24 डाइऑप्टर है। नेत्र लेंस की समंजन का परिसर लगभग 20 से 24 डाइऑप्टर होता है।

9.25 नहीं। किसी व्यक्ति के नेत्र लेंस की समंजन की योग्यता (क्षमता) सामान्य होते हुए भी उसमें *निकट दृष्टि* अथवा *दीर्घ दृष्टि दोष* हो सकता है। निकट दृष्टि दोष नेत्र गोलक के सामने तथा पीछे से बहुत छोटा होने पर उत्पन्न होता है। व्यवहार में इसके साथ-साथ नेत्र लेंस भी अपनी समंजन क्षमता खो देता है। जब नेत्र गोलक की अपनी लंबाई सामान्य होती है परंतु नेत्र-लेंस अपनी समंजन क्षमता को आंशिक रूप में खो देता है (जैसा आयु में वृद्धि होने पर किसी भी सामान्य नेत्र में हो सकता है) तब इस दृष्टि 'दोष' को *जरा दूरदर्शिता* कहते हैं तथा इसका निराकरण *दीर्घ दृष्टि दोष* की ही भाँति किया जाता है।

9.26 व्यक्ति का दूर बिंदु 100 cm है, जबकि उसका निकट बिंदु सामान्य (लगभग 25 cm) हो सकता था। चश्मा लगाने पर अनंत पर रखी वस्तु का आभासी प्रतिबिंब 100 cm दूर बनता है। इससे पास की वस्तुओं, अर्थात् जो कि (जिनके चश्मे के द्वारा प्रतिबिंब) 100 cm और 25 cm के बीच हैं, तो व्यक्ति अपने नेत्र लेंस की समंजन क्षमता की योग्यता का उपयोग करता है। प्राय: यह योग्यता का अधिक आयु होने पर आंशिक ह्रास हो जाता है (जरा दूरदर्शिता)। ऐसे व्यक्ति का निकट बिंदु 50 cm दूर चला जाता है। वस्तुओं को 25 cm दूरी पर देखने के लिए व्यक्ति को +2 डाइऑप्टर क्षमता के चश्मे की आवश्यकता है।

9.27 अबिंदुकता नामक दृष्टि दोष अपवर्ती तंत्र (कॉर्निया + नेत्र लेंस) होने पर होता है। [नेत्र प्राय: गोलीय होता है, अर्थात इसकी विभिन्न तलों में वक्रता समान होती है, परंतु अबिंदुकता की स्थिति में कॉर्निया गोलीय नहीं होती]। वर्तमान स्थिति में, ऊर्ध्वाधर तल की वक्रता पर्याप्त है, अत: ऊर्ध्वाधर धारियों का स्पष्ट प्रतिबिंब रेटिना पर बन सकता है। परंतु क्षैतिज तल में वक्रता पर्याप्त नहीं है, अत: क्षैतिज धारियाँ धुँधली प्रतीत होती हैं। इस दोष की संशुद्धि ऊर्ध्वाधर के अनुदिश अक्ष वक्रता के सिलिंडरी लेंस द्वारा की जा सकती है। स्पष्ट है कि ऊर्ध्वाधर तल की समांतर किरणें कोई अतिरिक्त अपवर्तित नहीं होंगी, परंतु जो क्षैतिज तल में हैं, यदि सिलिंडरी पृष्ठ की वक्रता का चयन उचित प्रकार से किया गया हो तो सिलिंडरी लेंस के वक्रित पृष्ठ से वे वांछनीय अतिरिक्त अभिसरित हो सकती हैं।

9.28 (a) निकटतम दूरी = $4\frac{1}{6}\text{cm} \approx 4.2\text{cm}$ तथा दूरतम दूरी = 5 cm

(b) अधिकतम कोणीय आवर्धन = [25/(25/6)] = 6; न्यूनतम कोणीय आवर्धन = [25/5] = 5

9.29 (a) $\frac{1}{v}+\frac{1}{9}=\frac{1}{10}$, अर्थात् $v = -90$ cm

आवर्धन का परिमाण = 90/9 = 10

आभासी प्रतिबिंब में प्रत्येक वर्ग का क्षेत्रफल = $10 \times 10 \times 1\ \text{mm}^2 = 100\ \text{mm}^2 = 1\ \text{cm}^2$

(b) आवर्धन क्षमता = 25/9 = 2.8

(c) नहीं, किसी लेंस द्वारा आवर्धन तथा किसी प्रकाशिक यंत्र की कोणीय आवर्धन [अथवा आवर्धन क्षमता] दो भिन्न अभिधारणाएँ हैं। कोणीय आवर्धन वस्तु के कोणीय साइज़ (जो कि प्रतिबिंब के आवर्धित होने पर प्रतिबिंब के कोणीय साइज़ के बराबर होता है।) तथा उस स्थिति में वस्तु के कोणीय साइज़ (जबकि उसे निकट बिंदु 25 cm पर रखा जाता है), का अनुपात होता है। इस प्रकार, आवर्धन का परिमाण $|(v/u)|$ होता है तथा आवर्धन क्षमता $(25/|u|)$ होती है। केवल तब जब प्रतिबिंब निकट बिंदु पर $|v| = 25$ cm पर है तो केवल तभी दोनों राशियाँ समान होती हैं।

9.30 (a) प्रतिबिंब के निकट बिंदु (25 cm) पर बनने पर अधिकतम आवर्धन क्षमता प्राप्त होती है। अत:

$u = -7.14$ cm

(b) आवर्धन का परिमाण = $(25/|u|) = 3.5$

(c) आवर्धन क्षमता = 3.5

हाँ, आवर्धन क्षमता (जब प्रतिबिंब 25 cm पर बनता है) आवर्धन के परिमाण के समान होती है।

9.31 आवर्धन $\sqrt{(6.25/1)} = 2.5$

$v = +2.5\ u$; अत:

$$+\frac{1}{2.5u}-\frac{1}{u}=\frac{1}{10}$$

अर्थात् $u = -6$ cm

$|v| = 15$ cm

आभासी प्रतिबिंब सामान्य निकट बिंदु (25 cm) से भी पास बनता है तथा इसे नेत्र स्पष्ट नहीं देख सकता।

9.32 (a) यदि प्रतिबिंब का निरपेक्ष साइज़ वस्तु के साइज़ से बड़ा भी है, तो भी प्रतिबिंब का कोणीय साइज़ वस्तु के कोणीय साइज़ के समान होता है। कोई आवर्धक लेंस हमारी इस रूप में सहायता करता है : यदि आवर्धक लेंस नहीं है तो वस्तु 25 cm से कम दूरी पर नहीं रखी जा सकती; आवर्धक लेंस होने पर हम वस्तु को अपेक्षाकृत बहुत निकट रख सकते हैं। वस्तु निकट हो तो उसका कोणीय साइज़ 25 cm दूर रखने की तुलना में कहीं अधिक होता है। हमारे कोणीय आवर्धन पाने या उपलब्ध करने का यही अर्थ है।

(b) हाँ, यह थोड़ा कम होता है, क्योंकि नेत्र पर अंतरित कोण लेंस पर अंतरित कोण से थोड़ा छोटा होता है। यदि प्रतिबिंब बहुत दूर हो तो यह प्रभाव नगण्य होता है। [**नोट :** जब नेत्र को लेंस से पृथक् रखते हैं, तो प्रथम वस्तु द्वारा नेत्र पर अंतरित कोण तथा इसके प्रतिबिंब द्वारा नेत्र पर अंतरित कोण समान नहीं होते।]

(c) प्रथम, अत्यंत छोटे फोकस दूरी के लेंसों की घिसाई आसान नहीं है। इससे अधिक महत्त्वपूर्ण बात है कि यदि आप फोकस दूरी कम करते हैं तो इससे विपथन (गोलीय तथा वर्ण) बढ़ जाता है। अत: व्यवहार में, आप किसी सरल उत्तल लेंस से 3 या अधिक की आवर्धन क्षमता नहीं प्राप्त कर सकते हैं। तथापि, किसी विपथन संशोधित लेंस प्रणाली के उपयोग से इस सीमा को 10 या इसके सन्निकट कारक से बढ़ा सकते हैं।

(d) किसी नेत्रिका का कोणीय आवर्धन $[(25/f_e) + 1]$ (f_e cm में) होता है जिसके मान में f_e के घटने पर वृद्धि होती है। पुन: अभिदृश्यक का आवर्धन $\frac{v_0}{|u_0|} = \frac{1}{(|u_0|/f_0)-1}$ से प्राप्त होता है जो अधिक होता है यदि $|u_0|$, f_0 से कुछ अधिक हो। सूक्ष्मदर्शी का उपयोग अति निकट की वस्तुओं को देखने के लिए किया जाता है। अत: $|u_0|$ कम होता है और तदनुसार f_0 भी।

(e) नेत्रिका के अभिदृश्यक के प्रतिबिंब को 'निर्गम द्वारक' कहते हैं। वस्तु से आने वाली सभी किरणें अभिदृश्यक से अपवर्तन के पश्चात निर्गम द्वारक से गुजरती हैं। अत: हमारे नेत्र से देखने के लिए यह एक आदर्श स्थिति है। यदि हम अपने नेत्र को नेत्रिका के बहुत ही निकट रखें तो नेत्रिका बहुत अधिक प्रकाश का अधिग्रहण नहीं कर पाएगी तथा दृष्टि-क्षेत्र भी घट जाएगा। यदि हम अपने नेत्र को निर्गम-द्वारक पर रखें तथा हमारे नेत्र की पुतली का क्षेत्रफल निर्गम-द्वारक के क्षेत्रफल से अधिक या समान हो तो हमारे नेत्र अभिदृश्यक से अपवर्तित सभी किरणों को अभिगृहित कर लेंगे। निर्गम-द्वारक का सटीक स्थान सामान्यत: अभिदृश्यक एवं नेत्रिका के अंतराल पर निर्भर करता है। जब हम किसी सूक्ष्मदर्शी से, इसके एक सिरे पर अपने नेत्र को लगाकर देखते हैं तो नेत्र एवं नेत्रिका के मध्य आदर्श दूरी यंत्र के डिज़ाइन में अंतर्निहित होती है।

9.33 मान लीजिए कि सूक्ष्मदर्शी सामान्य उपयोग में है अर्थात प्रतिबिंब 25 cm पर है। नेत्रिका का कोणीय आवर्धन

$$= \frac{25}{5} + 1 = 6$$

अभिदृश्यक का आवर्धन

$$= \frac{30}{6} = 5, \text{ अत:}$$

$$\frac{1}{5u_0} - \frac{1}{u_0} = \frac{1}{1.25}$$

जिससे $u_0 = -1.5$ cm.; $v_0 = 7.5$ cm ; $|u_e| = (25/6)$ cm = 4.17 cm प्राप्त होता है। अभिदृश्यक एवं नेत्रिका के बीच दूरी (7.5 + 4.17) cm = 11.67 cm होनी चाहिए। अपेक्षित आवर्धन प्राप्त करने के लिए वस्तु को अभिदृश्यक से 1.5 cm दूर रखना होगा।

9.34 (a) $m = (f_0/f_e) = 28$

(b) $m = \frac{f_0}{f_e}\left[1+\frac{f_0}{25}\right] = 33.6$

9.35 (a) $f_0 + f_e = 145$ cm

(b) मीनार द्वारा अंतरित कोण = (100/3000) = (1/30) rad; अभिदृश्यक द्वारा बनाए प्रतिबिंब से अंतरित कोण = h/f_0; f_0 = 140 cm। दोनों कोणों के मानों की तुलना करने पर h = 4.7 cm प्राप्त होता है।

(c) नेत्रिका का आवर्धन = 6 अंतिम प्रतिबिंब की ऊँचाई = 28 cm

9.36 बड़े दर्पण (अवतल) द्वारा बनाया गया प्रतिबिंब छोटे दर्पण (उत्तल) के लिए आभासी बिंब का कार्य करता है। अनंत पर रखे बिंब से आने वाली समांतर किरणें, बड़े दर्पण से 110 mm दूर फोकसित होंगी। छोटे दर्पण के लिए आभासी बिंब की दूरी = (110 –20) = 90 mm होगी। छोटे दर्पण की फोकस दूरी 70 mm है। दर्पण सूत्र का उपयोग करने पर हम देखेंगे कि प्रतिबिंब छोटे दर्पण से 315 mm दूर बनता है।

9.37 परावर्तित किरणें दर्पण के घूर्णन कोण से दोगुने कोण पर विक्षेपित होती हैं। अत: $d/1.5 = \tan 7°$; d = 18.4 cm

9.38 n = 1.33

अध्याय 10

10.1 (a) परावर्तित प्रकाश : (तरंगदैर्घ्य, आवृत्ति, चाल आपतित प्रकाश के समान हैं)

λ = 589 nm, $\nu = 5.09 \times 10^{14}$ Hz, $c = 3.00 \times 10^8$ m s^{-1}

(b) अपवर्तित प्रकाश : (आवृत्ति, आपतित आवृत्ति के समान है)

$\nu = 5.09 \times 10^{14}$Hz

$v = (c/n) = 2.26 \times 10^8$ m s^{-1}, $\lambda = (v/\nu)$ = 444 nm

10.2 (a) गोलीय

(b) समतल

(c) समतल (बड़े गोले की सतह का एक छोटा क्षेत्र लगभग समतलीय होता है)

10.3 (a) 2.0×10^8 m s^{-1}

(b) हाँ, क्योंकि अपवर्तनांक और इसलिए माध्यम में प्रकाश की चाल तरंगदैर्घ्य पर निर्भर करती है [जब कोई विशिष्ट तरंगदैर्घ्य या प्रकाश का रंग न दिया गया हो तो हम दिए गए अपवर्तनांक का मान पीले प्रकाश के लिए ले सकते हैं]। अब हम जानते हैं कि बैंगनी प्रकाश का विचलन काँच के प्रिज़्म में लाल प्रकाश से अधिक होता है। अर्थात $n_v > n_r$ इसलिए, श्वेत प्रकाश का बैंगनी अवयव, लाल अवयव से धीमी गति से गमन करता है।

10.4 $\lambda = \frac{1.2\times10^{-2}\times0.28\times10^{-3}}{4\times1.4}$ m = 600 nm

10.5 $K/4$

10.6 (a) 1.17 mm (b) 1.56 mm

10.7 0.15°

10.8 $\tan^{-1}(1.5) \simeq 56.3°$

10.9 5000 Å, 6×10^{14} Hz; 45°

10.10 40 m

10.11 सूत्र

$$\lambda' - \lambda = \frac{v}{c}\lambda \text{ का उपयोग करने से}$$

$$\text{अर्थात } v = \frac{c}{\lambda}(\lambda' - \lambda)$$

$$= \frac{3\times10^8\times15}{6563}$$

$$= 6.86 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$$

10.12 न्यूटन के कणिका सिद्धांत के अनुसार, अपवर्तन में, विरल माध्यम से सघन माध्यम में प्रवेश करते समय आपतित कण सतह के लंबवत आकर्षण बल का अनुभव करता है। इसकी परिणति वेग के अभिलंब घटक की वृद्धि में होगी। लेकिन पृष्ठ के अनुदिश घटक नियत रहता है। इसका तात्पर्य

$c \sin i = v \sin r$ या $\frac{v}{c} = \frac{\sin i}{\sin r} = n$; क्योंकि $n > 1$, $v > c$ है।

यह अवधारणा प्रायोगिक परिणामों के विरुद्ध है ($v < c$)। प्रकाश का तरंग सिद्धांत प्रयोग संगत है।

10.13 बिंदु बिंब को केंद्र लेकर दर्पण को स्पर्श करते हुए एक वृत्त खींचिए। यह गोलीय तरंगाग्र का बिंब से दर्पण पर पहुँचने वाला समतलीय भाग है। अब दर्पण की उपस्थिति एवं अनुपस्थिति में t समय के बाद उसी तरंगाग्र की इन्हीं स्थितियों को आरेखित कीजिए। आप दर्पण के दोनों ओर स्थित दो एक जैसे चाप पाएँगे। सरल ज्यामिति के उपयोग से, परावर्तित तरंगाग्र का केंद्र (बिंब का प्रतिबिंब) दर्पण से बिंब की बराबर दूरी पर दिखाई देगा।

10.14 (a) निर्वात में प्रकाश की चाल एक सार्वत्रिक नियतांक है जो सूचीबद्ध कारकों में से किसी पर भी निर्भर नहीं है। विशेषत: यह एक आश्चर्यजनक तथ्य है कि यह स्रोत तथा प्रेक्षक की सापेक्ष गति पर भी निर्भर नहीं करता है। यह तथ्य आइंसटाइन के आपेक्षिकता के विशिष्ट सिद्धांत का मूल अभिगृहीत है।

(b) प्रकाश की चाल की माध्यम पर निर्भरता

(i) स्रोत की प्रकृति पर निर्भर नहीं है (प्रकाश की चाल का निर्धारण माध्यम के संचरण गुणों से है। यह तथ्य अन्य तरंगों के लिए भी सत्य है, जैसे ध्वनि-तरंगों एवं जल-तरंगों आदि के लिए)।

(ii) समदैशिक माध्यम के लिए संचरण दिशा पर निर्भर नहीं करता है।

(iii) स्रोत तथा माध्यम की सापेक्ष गति पर निर्भर नहीं करता लेकिन प्रेक्षक तथा माध्यम की सापेक्ष गति पर निर्भर करता है।

(iv) तरंगदैर्घ्य पर निर्भर करता है।

(v) तीव्रता पर निर्भर नहीं करता (यद्यपि अधिक तीव्र किरण-पुंज के लिए यह स्थिति अधिक जटिल है तथा यहाँ हमारे लिए महत्वपूर्ण नहीं है)।

10.15 ध्वनि-तरंगों के संचरण के लिए माध्यम आवश्यक है। यद्यपि (i) तथा (ii) स्थिति में संगत समान सापेक्ष गति (स्रोत तथा प्रेक्षक के मध्य) भौतिक रूप से समरूपी नहीं है, क्योंकि माध्यम के

सापेक्ष प्रेक्षक की गति इन दोनों स्थितियों में भिन्न है। अत:, (i) तथा (ii) स्थितियों में हम ध्वनि के लिए डॉप्लर के सूत्रों की समानता की अपेक्षा नहीं कर सकते। निर्वात में प्रकाश-तरंगों के लिए, स्पष्टतया (i) तथा (ii) स्थिति के बीच कोई भेद नहीं है। यहाँ मात्र स्रोत तथा प्रेक्षक की सापेक्ष गतियाँ ही अर्थ रखती हैं तथा आपेक्षिकीय डॉप्लर का सूत्र (i) तथा (ii) स्थिति के लिए समान है। माध्यम में प्रकाश संचरण के लिए पुन: ध्वनि-तरंगों के समान, दोनों स्थितियाँ समान नहीं हैं तथा (i) तथा (ii) स्थितियों के लिए हमें डॉप्लर के सूत्र के भिन्न होने की अपेक्षा रखनी चाहिए।

10.16 3.4×10^{-4} m

10.17 (a) आकार $\sim \lambda/d$ सूत्र के अनुसार, आकार आधा रह जाता है। तीव्रता चार गुनी बढ़ जाती है।

(b) द्वि-झिरी समायोजन में व्यतिकरण फ्रिंजों की तीव्रता प्रत्येक झिरी के विवर्तन पैटर्न द्वारा माडुलित (modulated) होती है।

(c) वृत्तीय अवरोध के किनारों से विवर्तित तरंगें छाया के केंद्र पर संपोषी व्यतिकरण द्वारा प्रदीप्त बिंदु उत्पन्न करती हैं।

(d) तरंगों के बड़े कोण पर विवर्तन अथवा मुड़ने के लिए अवरोधों/द्वारकों का आकार, तरंग की तरंगदैर्घ्य के समकक्ष होना चाहिए। यदि अवरोध/द्वारक का आकार तरंगदैर्घ्य की तुलना में बहुत बड़ा है तो विवर्तन छोटे कोण से होगा। यहाँ आकार कुछ मीटरों की कोटि का होता है। प्रकाश की तरंगदैर्घ्य लगभग 5×10^{-7} m है, जबकि ध्वनि-तरंगों; जैसे 1k Hz आवृत्ति वाली ध्वनि की तरंगदैर्घ्य लगभग 0.3 m है। इस प्रकार ध्वनि-तरंगें विभाजक के चारों ओर मुड़ सकती हैं जबकि प्रकाश तरंगें नहीं मुड़ सकतीं।

(e) न्यायसंगतता का आधार (d) में उल्लेखित है। साधारण प्रकाशिक यंत्रों में प्रयुक्त द्वारकों का आकार प्रकाश की तरंगदैर्घ्य से बहुत बड़ा होता है।

10.18 12.5 cm

10.19 0.2 nm

10.20 (a) ऐंटीना द्वारा प्राप्त सीधे संकेत तथा गुज़रने वाले वायुयान से परावर्तित संकेतों का व्यतिकरण।

(b) अध्यारोपण का सिद्धांत तरंगगति को नियंत्रित करने वाली अवकल (differential) समीकरण के रेखीय चरित्र से प्रतिपादित है। यदि y_1 और y_2 इस समीकरण के हल हैं, तो y_1 और y_2 का रेखीय योग भी उनका हल होगा। जब आयाम बड़े हों (उदाहरण के लिए उच्च तीव्रता का लेज़र किरण-पुंज) तथा अरैखिक प्रभाव महत्वपूर्ण हो तो यह स्थिति और भी जटिल हो जाती है, जिसका समझना यहाँ आवश्यक नहीं है।

10.21 किसी एकल झिरी को n छोटी झिरियों में बाँटिए जिनमें प्रत्येक की चौड़ाई $a' = a/n$ है। कोण $\theta = n\lambda/a = \lambda/a'$। प्रत्येक छोटी झिरी से कोण θ की दिशा में तीव्रता शून्य है। इनका संयोजन भी शून्य तीव्रता प्रदान करता है।

अध्याय 11

11.1 (a) 7.24×10^{18} Hz (b) 0.041 nm

11.2 (a) 0.34 eV = 0.54×10^{-19}J (b) 0.34 V (c) 344 km/s

11.3 1.5 eV = 2.4×10^{-19} J

11.4 (a) 3.14×10^{-19}J, 1.05×10^{-27} kg m/s (b) 3×10^{16} फोटॉन/s (c) 0.63 m/s

11.5 4×10^{21} फोटॉन/m^2 s

11.6 6.59×10^{-34} J s

11.7 (a) 3.38×10^{-19} J = 2.11 eV (b) 3.0×10^{20} फोटॉन/s

11.8 2.0 V

11.9 नहीं, क्योंकि $\nu < \nu_o$

11.10 4.73×10^{14} Hz

11.11 2.16 eV = 3.46×10^{-19}J

11.12 (a) 4.04×10^{-24} kg m s^{-1} (b) 0.164 nm

11.13 (a) 5.92×10^{-24} kg m s^{-1} (b) 6.50×10^{6} m s^{-1} (c) 0.112 nm

11.14 (a) 6.95×10^{-25} J = 4.34 μeV (b) 3.78×10^{-28} J = 0.236 neV

11.15 (a) 1.7×10^{-35} m (b) 1.1×10^{-32} m (c) 3.0×10^{-23} m

11.16 (a) 6.63×10^{-25} kg m/s (दोनों के लिए) (b) 1.24 keV (c) 1.51 eV

11.17 (a) 6.686×10^{-21} J = 4.174×10^{-2} eV (b) 0.145 nm

11.18 $\lambda = h/p = h/(h\nu/c) = c/\nu$

11.19 0.028 nm

11.20 (a) $eV = (m\upsilon^2/2)$ का उपयोग कीजिए अर्थात, $\upsilon = [(2eV/m)]^{1/2}$; $\upsilon = 1.33 \times 10^7$ m s^{-1}
(b) यदि हम $V = 10^7$ V के लिए उसी सूत्र का प्रयोग करें, तो $\upsilon = 1.88 \times 10^9$ m s^{-1} आता है। यह स्पष्ट रूप से गलत है, क्योंकि कोई भी द्रव्य कण प्रकाश के वेग ($c = 3 \times 10^8$ m s^{-1}) से अधिक वेग से नहीं चल सकता। वस्तुतः गतिज ऊर्जा के लिए उपरोक्त सूत्र ($mv^2/2$) केवल (υ/c) << 1 के लिए वैध है। बहुत अधिक चाल पर, जब (υ/c) के लगभग तुल्य (यद्यपि हमेशा 1 से कम) होता है, तो आपेक्षिकीय प्रभाव-क्षेत्र के कारण निम्नलिखित सूत्र वैध होते हैं :

आपेक्षिकीय संवेग $p = m\upsilon$

कुल ऊर्जा $E = mc^2$

गतिज ऊर्जा $K = mc^2 - m_o c^2$

जहाँ आपेक्षिकीय द्रव्यमान m निम्नानुसार दिया जाता है

$$m = m_0\left(1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}\right)^{-1/2}$$

m_o कण का विराम द्रव्यमान कहलाता है। इन संबंधों से प्राप्त होता है :

$E = (p^2c^2 + m_0^2c^4)^{1/2}$

ध्यान दीजिए कि आपेक्षिकीय प्रभाव-क्षेत्र में, जब υ/c लगभग 1 के बराबर होता है, तो कुल ऊर्जा $E \geq m_o c^2$ (विराम द्रव्यमान ऊर्जा)। इलेक्ट्रॉन की विराम द्रव्यमान ऊर्जा लगभग

0.51 MeV होती है। इसलिए 10 MeV की गतिज ऊर्जा, जो इलेक्ट्रॉन की विराम द्रव्यमान ऊर्जा से बहुत अधिक है, आपेक्षिकीय प्रभाव-क्षेत्र को व्यक्त करती है। आपेक्षिकीय सूत्रों के प्रयोग से v (10 MeV गतिज ऊर्जा के लिए) = 0.999 c

11.21 (a) 22.7 cm

(b) नहीं। जैसा कि ऊपर स्पष्ट किया गया है, 20 MeV का एक इलेक्ट्रॉन आपेक्षिकीय गति से चलेगा। परिणामस्वरूप, अ-आपेक्षिकीय सूत्र $R = (m_0 v/eB)$ वैध नहीं रहता। आपेक्षिकीय सूत्र है

$$R = p/eB = mv/eB \text{ या } \quad R = m_0 v / \left(eB\sqrt{1 - v^2/c^2}\right)$$

11.22 $eV = (mv^2/2)$ तथा $R = (mv/eB)$ के प्रयोग से $(e/m) = (2V/R^2B^2)$; तथा दिए गए आँकड़ों के प्रयोग से प्राप्त होता है : $(e/m) = 1.73 \times 10^{11}$ C kg^{-1}

11.23 (a) 27.6 keV (b) 30 kV की कोटि का।

11.24 $\lambda = (hc/E)$ के प्रयोग से, जहाँ $E = 5.1 \times 1.602 \times 10^{-10}$J $\lambda = 2.43 \times 10^{-16}$ m

11.25 (a) $\lambda = 500$ m के लिए $E = (hc/\lambda) = 3.98 \times 10^{-28}$J प्रति सेकंड उत्सर्जित फोटॉनों की संख्या

$= 10^4 \text{J s}^{-1}/3.98 \times 10^{-28}\text{J} \simeq 3 \times 10^{31}\text{ s}^{-1}$

हम देखते हैं कि रेडियोफोटॉन की ऊर्जा बहुत कम है और रेडियो पुंज में प्रति सेकंड उत्सर्जित फोटॉनों की संख्या बहुत अधिक है। इसलिए यहाँ ऊर्जा के न्यूनतम क्वांटम (फोटॉन) के अस्तित्व को उपेक्षित करने और रेडियो तरंग की कुल ऊर्जा को सतत मानने से नगण्य त्रुटि आती है।

(b) $\nu = 6 \times 10^{14}$ Hz के लिए $E \simeq 4 \times 10^{-19}$J न्यूनतम तीव्रता के संगत फोटॉनों का अभिवाह (फ्लक्स)

$= 10^{-10}\text{ W m}^{-2}/4\times10^{-19}\text{J} = 2.5 \times 10^8\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$

आँख की पुतली में प्रवेश करने वाले फोटॉनों की संख्या प्रति सेकंड = $2.5 \times 10^8 \times 0.4 \times 10^{-4}\text{ s}^{-1} = 10^4\text{ s}^{-1}$। यद्यपि यह फोटॉनों की संख्या (a) की तरह अत्यधिक नहीं है, फिर भी हमारे लिए यह काफी अधिक है, क्योंकि हम कभी भी अपनी आँखों से फोटॉनों को न तो अलग-अलग देख सकते हैं, न ही गिन सकते हैं।

11.26 $\phi_0 = h\nu - eV_0 = 6.7 \times 10^{-19}$J = 4.2 eV; $\nu_0 = \dfrac{\phi_0}{h} = 1.0 \times 10^{15}$ Hz; $\nu = 4.7 \times 10^{14}$ Hz < ν_0 के संगत $\lambda = 6328$Å है।

चाहे लेसर के प्रकाश की तीव्रता कितनी भी अधिक क्यों न हो, फोटोसेल इस प्रकाश के लिए अक्रियाशील ही रहेगा।

11.27 दोनों स्रोतों के लिए $eV_0 = h\nu - \phi_0$ का उपयोग कीजिए। प्रथम स्रोत के लिए दिए गए आँकड़ों से, $\phi_0 = 1.40$ eV। अतः, दूसरे स्रोत के लिए $V_0 = 1.50$ V ।

11.28 V_0 और ν में आरेख खींचिए। आरेख का ढाल (h/e) और ν-अक्ष पर इसका अंतःखंड ν_0 को प्रदर्शित करता है। पहले चार बिंदु लगभग सरल रेखा पर आते हैं, जो ν-अक्ष को $\nu_0 = 5.0 \times 10^{14}$ Hz (देहली आवृत्ति) पर काटती है। पाँचवाँ बिंदु $\nu < \nu_0$ के लिए होता है, जहाँ प्रकाश विद्युत उत्सर्जन नहीं होता और इसलिए धारा को रोकने के लिए निरोधी विभव की आवश्यकता नहीं होती। आरेख का ढाल 4.15×10^{-15} V s है। $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C तथा $h = 6.64 \times 10^{-34}$ J s (h का मानक मान = 6.626×10^{-34} J s) के प्रयोग से, $\phi_0 = h\nu_0 = 2.11$ V

11.29 यह पाया गया है कि दी हुई आपतित आवृत्ति ν, ν_0 (Na) तथा ν_0 (K) से अधिक है, परंतु ν_0 (Mo) तथा ν_0 (Ni) से कम है। इसलिए Mo तथा Ni प्रकाश विद्युत उत्सर्जन नहीं करेंगे। यदि लेसर निकट लाया जाता है, तो विकिरण की तीव्रता बढ़ती है, लेकिन इससे Mo तथा Ni संबंधी परिणामों पर कोई प्रभाव नहीं पड़ता। फिर भी Na और K से प्रकाश विद्युत धारा, विकिरण की तीव्रता बढ़ने के साथ बढ़ेगी।

11.30 प्रति परमाणु एक चालन इलेक्ट्रॉन और प्रभावी परमाण्विक क्षेत्रफल $\sim 10^{-20}\,m^2$ मानने पर, 5 सतहों में इलेक्ट्रॉनों की संख्या

$$= \frac{5\times 2\times 10^{-4}\,m^2}{10^{-20}\,m^2} = 10^{17}$$

आपतित शक्ति

$= 10^{-5}\,W\,m^{-2} \times 2 \times 10^{-4}\,m^2$

$= 2 \times 10^{-9}\,W$

तरंग चित्रण (प्रकृति) में, आपतित शक्ति सभी इलेक्ट्रॉनों द्वारा सतत रूप से एकसमान अवशोषित होती है। परिणामस्वरूप, प्रति इलेक्ट्रॉन प्रति सेकंड अवशोषित ऊर्जा

$$= \frac{2\times 10^{-9}}{10^{17}} = 2 \times 10^{-26}\,W$$

प्रकाश विद्युत उत्सर्जन के लिए आवश्यक समय

$$= \frac{2\times 1.6\times 10^{-19}\,J}{2\times 10^{-26}\,W} = 1.6 \times 10^{7}\,s$$

जो लगभग आधा (0.5) वर्ष है।

महत्त्व : प्रायोगिक रूप से, प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन लगभग तात्क्षणिक ($\sim 10^{-9}\,s$) प्रेक्षित होता है। इसलिए तरंग-प्रकृति प्रयोग से पूर्ण असहमति में है। फोटॉन-चित्रण में, ऊपरी सतह में विकिरण की ऊर्जा सभी इलेक्ट्रॉनों द्वारा समान रूप से साझित नहीं होती है। बल्कि, ऊर्जा असतत 'क्वांटा' के रूप में आती है और ऊर्जा का अवशोषण धीरे-धीरे नहीं होता। फोटॉन या तो अवशोषित नहीं होता है, या लगभग तात्क्षणिक रूप से इलेक्ट्रॉन द्वारा अवशोषित होता है।

11.31 $\lambda = 1$ Å के लिए, इलेक्ट्रॉन की ऊर्जा = 150 eV; फोटॉन की ऊर्जा = 12.4 keV

इसलिए, समान तरंगदैर्घ्य के लिए, फोटॉन की ऊर्जा, इलेक्ट्रॉन की ऊर्जा से काफी अधिक होती है।

11.32 (a) $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2\,m\,K}}$

इसलिए समान K के लिए, λ, द्रव्यमान m के साथ $(1/\sqrt{m})$ के अनुसार घटती है। अब $(m_n/m_e) = 1838.6$; अतः समान ऊर्जा 150 eV के लिए (अभ्यास 11.31 की तरह), न्यूट्रॉन की तरंगदैर्घ्य $= \left(\frac{1}{\sqrt{18386}}\right) \times 10^{-10}\,m = 2.33 \times 10^{-12}\,m$। अंतरापरमाण्विक (Interatomic) दूरियाँ इससे लगभग सौ गुना बड़ी हैं। इसलिए 150 eV ऊर्जा का न्यूट्रॉन-पुंज विवर्तन प्रयोगों के लिए उपयुक्त नहीं है।

(b) $\lambda = (h/\sqrt{3\,m\,k\,T})$ के प्रयोग से $\lambda = 1.45 \times 10^{-10}$ m, जो क्रिस्टल में अंतरापरमाण्विक दूरियों के तुलनीय है। स्पष्टतया ऊपर (a) तथा (b) से, तापीय न्यूट्रॉन विवर्तन प्रयोगों के लिए उपयुक्त अन्वेषी (कण) हैं। इसलिए उच्च ऊर्जा के न्यूट्रॉन-पुंज को विवर्तन के लिए प्रयुक्त करने से पूर्व तापित कर लेना चाहिए।

11.33 $\lambda = 5.5 \times 10^{-12}$ m

λ (पीला प्रकाश) 5.9×10^{-7}m

विभेदन क्षमता, तरंगदैर्घ्य के व्युत्क्रमानुपाती है। इसलिए इलेक्ट्रॉन सूक्ष्मदर्शी की विभेदन क्षमता, प्रकाशीय सूक्ष्मदर्शी की विभेदन क्षमता से लगभग 10^5 गुना है। व्यवहार में दूसरे (ज्यामितीय) कारकों का अंतर इस तुलना को थोड़ा सा परिवर्तित कर सकता है।

11.34 संवेग के लिए

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{6.63\times10^{-34}\,\text{J s}}{10^{-15}\,\text{m}}$$

$$= 6.63 \times 10^{-19}\ \text{kg m s}^{-1}$$

ऊर्जा के लिए आपेक्षिकीय सूत्र के प्रयोग से

$$E^2 = c^2p^2 + m_0^2c^4 = 9 \times (6.63)^2 \times 10^{-22} + (0.511 \times 1.6)^2 \times 10^{-26}$$

$$\simeq 9 \times (6.63)^2 \times 10^{-22}\ \text{J}^2$$

द्वितीय पद (विराम द्रव्यमान ऊर्जा) नगण्य हो जाता है।

इसलिए, $E = 1.989 \times 10^{-10}$ J = 1.24 BeV

अत: त्वरक (accelerator) से निकले इलेक्ट्रॉन की ऊर्जा कुछ BeV की कोटि की अवश्य होनी चाहिए।

11.35 $\lambda = \dfrac{h}{\sqrt{3\ m\ k\ T}}$; $m_{\text{He}} = \dfrac{4\times10^{\ 3}}{6\times10^{23}}$ kg के प्रयोग से

$\lambda = 0.73 \times 10^{-10}$ m माध्य पृथक्करण (दूरी)

$r = (V/N)^{1/3} = (kT/p)^{1/3}$

$T = 300$ K, $p = 1.01 \times 10^5$ Pa के लिए $r = 3.4 \times 10^{-9}$ m प्राप्त होता है। हम पाते हैं कि $r >> \lambda$

11.36 अभ्यास 11.35 वाला समान सूत्र प्रयोग करने पर $\lambda = 6.2 \times 10^{-9}$ m जो दी गई अंतराइलेक्ट्रॉनिक दूरी से बहुत अधिक है।

11.37 (a) क्वार्क, न्यूट्रॉन या प्रोटॉन में ऐसे बलों से बँधे माने जाते हैं, जो उनको दूर खींचने पर प्रबल होते हैं। इसलिए ऐसा प्रतीत होता है कि यद्यपि प्रकृति में भिन्नात्मक आवेश हो सकते हैं, तथापि प्रेक्षणीय आवेश e के पूर्ण गुणज होते हैं।

(b) विद्युत तथा चुंबकीय क्षेत्रों के लिए क्रमश: दोनों मूल संबंध $eV = (1/2)\ mv^2$ या $eE = ma$ तथा $eBv = mv^2/r$, प्रदर्शित करते हैं कि इलेक्ट्रॉन की गतिकी e एवं m दोनों द्वारा अलग-अलग निर्धारित नहीं होती, बल्कि e/m द्वारा निर्धारित होती है।

(c) निम्न दाबों पर आयनों की, उनके संगत इलेक्ट्रोडों पर पहुँचने और धारा की रचना करने की संभावना होती है। सामान्य दाबों पर, गैस अणुओं से टक्कर और पुनर्संयोजन के कारण आयनों की ऐसी कोई संभावना नहीं होती।

(d) कार्य-फलन, इलेक्ट्रॉन को चालन बैंड के ऊपरी स्तर से धातु से बाहर निकालने के लिए आवश्यक न्यूनतम ऊर्जा मात्र है। धातु के सभी इलेक्ट्रॉन इस स्तर (ऊर्जा अवस्था) में नहीं

होते। वे स्तरों की संतत बैंड में रहते हैं। परिणामस्वरूप, एक ही आपतित विकिरण के लिए, विभिन्न स्तरों से निकले इलेक्ट्रॉन, विभिन्न ऊर्जाओं के साथ निर्गत होते हैं।

(e) किसी कण की ऊर्जा E (न कि संवेग p) का परम मान एक योगात्मक स्थिरांक के अधीन स्वतंत्र है। इसलिए जहाँ λ भौतिक रूप से महत्वपूर्ण है, वहीं एक इलेक्ट्रॉन की द्रव्य तरंग के लिए v के परम मान का कोई सीधा भौतिक महत्व नहीं होता है। इसी तरह कला चाल $v\lambda$ भी भौतिक कण से महत्वपूर्ण नहीं है। समूह चाल

$$\frac{dv}{d(1/\lambda)}=\frac{dE}{dp} = \frac{d}{dp}\left(\frac{p^2}{2m}\right)=\frac{p}{m}$$

भौतिक रूप से अर्थपूर्ण है।

अध्याय 12

12.1 (a) से भिन्न नहीं

(b) टॉमसन मॉडल, रदरफोर्ड मॉडल

(c) रदरफोर्ड मॉडल

(d) टॉमसन मॉडल, रदरफोर्ड मॉडल

(e) दोनों मॉडल

12.2 हाइड्रोजन परमाणु का नाभिक प्रोट्रॉन है। इसका द्रव्यमान 1.67×10^{-27}kg है, जबकि आपतित ऐल्फ़ा कण का द्रव्यमान 6.64×10^{-27} kg है। क्योंकि प्रकीर्ण होने वाले कण का द्रव्यमान लक्ष्य नाभिक (प्रोटॉन) से अत्यधिक है इसलिए प्रत्यक्ष संघट्ट में भी ऐल्फ़ा-कण वापस नहीं आएगा। यह ऐसा ही है जैसे कि कोई फुटबाल, विरामावस्था में टेनिस की गेंद से टकराए। इस प्रकार प्रकीर्णन बड़े कोणों पर नहीं होगा।

12.3 820 nm

12.4 5.6×10^{14} Hz

12.5 13.6 eV; – 27.2 eV

12.6 9.7×10^{-8} m; 3.1×10^{15} Hz

12.7 (a) 2.18×10^{6} m/s; 1.09×10^{6} m/s; 7.27×10^{5} m/s

(b) 1.52×10^{-16}s ; 1.22×10^{-15} s; 4.11×10^{-15} s

12.8 2.12×10^{-10} m; 4.77×10^{-10}m

12.9 लाइमैन श्रेणी: 103 nm तथा 122 nm

बामर श्रेणी: 665 nm

12.10 2.6×10^{74}

12.11 (a) लगभग समान

(b) काफ़ी कम

(c) यह संकेत करता है कि प्रकीर्णन मुख्यत: एक संघट्ट के कारण है क्योंकि एक संघट्ट की संभावना लक्ष्य परमाणुओं की संख्या के साथ रैखिकत: बढ़ती है और इसलिए मोटाई के साथ रैखिकत: बढ़ती है।

(d) टॉमसन मॉडल में, एक संघट्ट के कारण बहुत कम विक्षेप होता है। प्रेक्षित औसत प्रकीर्णन कोण की व्याख्या केवल बहुप्रकीर्णन को ध्यान में रखकर ही की जा सकती है। अत: टॉमसन

मॉडल में बहुप्रकीर्णन की उपेक्षा गलत है। रदरफोर्ड मॉडल में अधिकतर प्रकीर्णन एक संघट्ट के कारण होता है और बहुप्रकीर्णन प्रभाव की प्रथम सन्निकटन पर उपेक्षा की जा सकती है।

12.12 बोर मॉडल की प्रथम कक्षा की त्रिज्या a_0 जिसका मान है $a_0 = \dfrac{4\pi\varepsilon_0 (h/2\pi)^2}{m_e e^2}$

यदि हम परमाणु गुरुत्वीय बल ($G m_p m_e / r^2$), द्वारा बँधा मानते हैं, तब हमें ($e^2/4\,\pi\,\varepsilon_0$) के स्थान पर $G m_p m_e$ प्रतिस्थापित करना चाहिए। अर्थात बोर मॉडल की प्रथम कक्षा की त्रिज्या $a_0^G = \dfrac{(h/2\pi)^2}{G m_p m_e^2} \cong 1.2 \times 10^{29}$ m होनी चाहिए। यह संपूर्ण विश्व के आकलित आकार से कहीं अधिक है।

12.13 $\nu = \dfrac{me^4}{(4\pi)^3 \varepsilon_0^2 (h/2\pi)^3}\left[\dfrac{1}{(n-1)^2} - \dfrac{1}{n^2}\right] = \dfrac{me^4(2n-1)}{(4\pi)^3 \varepsilon_0^2 (h/2\pi)^3 n^2 (n-1)^2}$

n के अधिक मान के लिए, $\nu \cong \dfrac{me^4}{32\pi^3 \varepsilon_0^2 (h/2\pi)^3 n^3}$

कक्षीय आवृत्ति $\nu_c = (v/2\,\pi\,r)$ है।

बोर मॉडल में $v = \dfrac{n(h/2\pi)}{mr}$, और $r = \dfrac{4\,\pi\varepsilon_0 (h/2\pi)^2}{me^2} n^2$ है।

अत: $\nu_c = \dfrac{n(h/2\pi)}{2\pi m r^2} = \dfrac{me^4}{32\pi^3 \varepsilon_0^2 (h/2\pi)^3 n^3}$

जो n के अधिक मान के लिए ν के मान के समान है।

12.14 (a) राशि $\left(\dfrac{e^2}{4\,\pi\varepsilon_0 mc^2}\right)$ की विमा लंबाई की विमा है। इसका मान 2.82×10^{-15} m है जो प्ररूपी परमाण्वीय आमाप से काफ़ी कम है।

(b) राशि $\dfrac{4\pi\varepsilon_0 (h/2\pi)^2}{me^2}$ की विमा, लंबाई की विमा है। इसका मान 0.53×10^{-10} m है जो परमाण्वीय साइज़ों की कोटि का है। (ध्यान दीजिए कि विमीय तर्क वास्तव में यह नहीं बता सकते कि हमें सही साइज़ प्राप्त करने के लिए h के स्थान पर 4π और $h/2\pi$ प्रतिस्थापित करना चाहिए।

12.15 बोर मॉडल में, $mvr = n\hbar$ और $\dfrac{mv^2}{r} = \dfrac{Ze^2}{4\,\pi\varepsilon_0 r^2}$

अत: $T = \dfrac{1}{2}mv^2 = \dfrac{Ze^2}{8\pi\varepsilon_0 r}; r = \dfrac{4\pi\varepsilon_0 h^2}{Ze^2 m} n^2$

इन संबंधों पर स्थितिज ऊर्जा के लिए शून्य के चयन का कोई प्रभाव नहीं है। अब स्थितिज ऊर्जा के शून्य स्तर को अनंत पर चयन करने पर

$V = -(Ze^2/4\,\pi\,\varepsilon_0 r)$

जिससे $V = -2T$ और $E = T + V = -T$ प्राप्त होता है

(a) E का उद्धृत मान = – 3.4 eV अनंत पर स्थितिज ऊर्जा शून्य स्तर के प्रथागत चयन पर आधारित है। $E = -T$ प्रयोग करने पर, इलेक्ट्रॉन की इस अवस्था में गतिज ऊर्जा + 3.4 eV है।

(b) $V = -2T$ के प्रयोग से, इलेक्ट्रॉन की स्थितिज ऊर्जा = 6.8 eV प्राप्त होती है।

(c) यदि स्थितिज ऊर्जा के शून्य स्तर का भिन्न तरीके से चयन किया जाता है तो गतिज ऊर्जा अपरिवर्तित रहती है। गतिज ऊर्जा का मान + 3.4 eV, स्थितिज ऊर्जा के शून्य स्तर के चयन पर निर्भर नहीं करता है। यदि स्थितिज ऊर्जा का शून्य स्तर भिन्न ढंग से चयनित किया जाता है तो इलेक्ट्रॉन की स्थितिज ऊर्जा एवं कुल ऊर्जा अवस्था परिवर्तित हो जाएगी।

12.16 ग्रहीय गति से संबद्ध कोणीय संवेग $\hbar$ के सापेक्ष अद्वितीय रूप से बड़ा है। उदाहरणार्थ, अपनी कक्षीय गति में पृथ्वी का कोणीय संवेग $10^{70}\hbar$ कोटि का है। बोर के क्वांटमीकरण अभिगृहीत के पदों में, यह n के बहुत बड़े (10^{70} की कोटि का) मान के संगत है। n के इतने बड़े मान के लिए बोर मॉडल के क्वांटित स्तरों के उत्तरोत्तर ऊर्जाओं और कोणीय संवेगों के अंतर व्यावहारिक उद्देश्यों के संतत स्तरों की क्रमशः ऊर्जाओं और कोणीय संवेगों की तुलना में बहुत कम हैं।

12.17 बोर मॉडल के सूत्रों में m_e को m_μ से प्रतिस्थापित करने की आवश्यकता है। अतः अन्य पदों को नियत रखते हुए हम पाते हैं कि $r \alpha (1/m)$ और $E \alpha m$

अतः $r_\mu = \frac{r_e m_e}{m_\mu} = \frac{0.53 \times 10^{-13}}{207} = 2.56 \times 10^{-13}$ m

$$E_\mu = \frac{E_e m_\mu}{m_e} = -(13.6 \times 207)\ \text{eV} \cong -2.8\ \text{keV}$$

अध्याय 13

13.1 (a) 6.941 u (b) 19.9%, 80.1%

13.2 20.18 u

13.3 104.7 MeV

13.4 8.79 MeV, 7.84 MeV

13.5 1.584×10^{25} MeV अथवा 2.535×10^{12} J

13.6 i) $^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^{4}_{2}\text{He}$ ii) $^{242}_{94}\text{Pu} \rightarrow {}^{238}_{92}\text{U} + {}^{4}_{2}\text{He}$

iii) $^{32}_{15}\text{P} \rightarrow {}^{32}_{16}\text{S} + e^- + \bar{\nu}$ iv) $^{210}_{83}\text{B} \rightarrow {}^{210}_{84}\text{Po} + e^- + \bar{\nu}$

v) $^{11}_{6}\text{C} \rightarrow {}^{11}_{5}\text{B} + e^+ + \nu$ vi) $^{97}_{43}\text{Tc} \rightarrow {}^{97}_{42}\text{Mo} + e^+ + \nu$

vii) $^{120}_{54}\text{Xe} + e^+ \rightarrow {}^{120}_{53}\text{I} + \nu$

13.7 (a) 5 T वर्ष (b) 6.65 T वर्ष

13.8 4224 वर्ष

13.9 7.126×10^{-6} g

13.10 7.877×10^{10} Bq अथवा 2.13 Ci

13.11 1.23

13.12 (a) Q = 4.93 MeV, E_α = 4.85 MeV (b) Q = 6.41 MeV, E_α = 6.29 MeV

13.13 ${}^{11}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{11}_{6}\mathrm{B} + \mathrm{e}^{+} + \nu + Q$

$$Q = \left[m_N\left({}^{11}_{6}\mathrm{C}\right) - m_N\left({}^{11}_{6}\mathrm{B}\right) - m_e\right]c^2,$$

यहाँ इंगित द्रव्यमान परमाणुओं के न होकर नाभिकों के हैं। यदि परमाण्वीय द्रव्यमानों का उपयोग करने के लिए हमें ${}^{11}\mathrm{C}$ के लिए $6m_e$ तथा ${}^{11}\mathrm{B}$ के लिए $5m_e$ द्रव्यमानों का और योग करना होगा। अत:

$$Q = \left[m\left({}^{11}_{6}\mathrm{C}\right) - m\left({}^{11}_{6}\mathrm{B}\right) - 2m_e\right]c^2$$

दिए गए द्रव्यमानों के उपयोग से Q = 0.961 MeV

$Q = E_d + E_e + E_\nu$

विघटनज नाभिक e^{+} तथा ν की तुलना में अधिक भारी है, अत: विघटनज नाभिक की ऊर्जा नगण्य ($E_d \approx 0$) होती है। यदि न्यूट्रिनों की गतिज ऊर्जा (E_ν) न्यूनतम (अर्थात शून्य) हो तो पॉजीट्रान की ऊर्जा अधिकतम होगी, जो व्यावहारिक रूप से Q के बराबर होगी अर्थात E_e का अधिकतम मान Q होगा।

13.14 ${}^{23}_{10}\mathrm{Ne} \rightarrow {}^{23}_{11}\mathrm{Na} + \mathrm{e}^{-} + \bar{\nu} + Q$; $Q = \left[m_N\left({}^{23}_{10}\mathrm{Ne}\right) - m_N\left({}^{23}_{11}\mathrm{Na}\right) - m_e\right]c^2$, अभ्यास 13.13 के समान ही, यहाँ प्रयुक्त द्रव्यमान नाभिकों के लिए है, परमाणुओं के नहीं। परमाण्वीय द्रव्यमानों के मान प्रयोग करने पर $Q = \left[m\left({}^{23}_{10}\mathrm{Ne}\right) - m\left({}^{23}_{11}\mathrm{Na}\right)\right]c^2$; Q = 4.37 MeV। अभ्यास 13.13 के समान ही इलेक्ट्रॉन की अधिकतम गतिज ऊर्जा Q = 4.37 MeV ।

13.15 (i) Q = –4.03 MeV; ऊष्माशोषी

(ii) Q =4.62 MeV; ऊष्माउन्मोची

13.16 $Q = m\left({}^{56}_{26}\mathrm{Fe}\right) - 2m\left({}^{28}_{13}\mathrm{Al}\right) = 26.90$ MeV; असंभव

13.17 4.536×10^{26} MeV

13.18 ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ की प्रति ग्राम उत्पादित ऊर्जा = $\dfrac{6 \times 10^{23} \times 200 \times 1.6 \times 10^{-13}}{235}\ \mathrm{J\,g^{-1}}$

5 वर्ष के समय में 80% समय के लिए उपयोग किए जाने पर रिएक्टर में व्ययित ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ की मात्रा

$$= \frac{5 \times 0.8 \times 3.154 \times 10^{16} \times 235}{1.2 \times 1.6 \times 10^{13}}\ \mathrm{g} = 1544\ \mathrm{kg}$$

${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ की प्रारंभिक मात्रा = 3088 kg

13.19 लगभग 4.9×10^{4} y

13.20 360 KeV

13.22 प्रतियोगी प्रक्रमों पर विचार कीजिए :

${}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}\mathrm{Y} + \mathrm{e}^{+} + \nu_e + Q_1$ (पाजीट्रॉन परिग्रहण)

$e^{-} + {}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}\mathrm{Y} + \nu_e + Q_2$ (इलेक्ट्रॉन परिग्रहण)

$Q_1 = \left[m_N\left({}^{A}_{Z}\mathrm{X}\right) - m_N\left({}^{A}_{Z-1}\mathrm{Y}\right) - m_e\right]c^2$

$= \left[m_N\left({}^{A}_{Z}\mathrm{X}\right) - Z m_e - m\left({}^{A}_{Z-1}\mathrm{Y}\right) - (Z-1)m_e - m_e\right]c^2$

$= \left[m\left({}^{A}_{Z}\mathrm{X}\right) - m\left({}^{A}_{Z-1}\mathrm{Y}\right) - 2m_e\right]c^2$

$Q_2 = \left[m_N\left({}^{A}_{Z}\mathrm{X}\right) + m_e - m_N\left({}^{A}_{Z-1}\mathrm{Y}\right)\right]c^2 \qquad = \left[m\left({}^{A}_{Z}\mathrm{X}\right) - m\left({}^{A}_{Z-1}\mathrm{Y}\right)\right]c^2$

अत: $Q_1 > 0$ तथा $Q_2 > 0$ परंतु $Q_2 > 0$ का अर्थ $Q_1 > 0$ आवश्यक नहीं है।

13.23 ${}^{25}_{12}\mathrm{Mg}$: 9.3%, ${}^{26}_{12}\mathrm{Mg}$:11.7%

13.24 एक नाभिक ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ की न्यूट्रॉन पृथक्करण ऊर्जा S_n के लिए समीकरण है,

$$S_n = \left[m_N\left({}^{A-1}_{Z}\mathrm{X}\right) + m_n - m_N\left({}^{A}_{Z}\mathrm{X}\right)\right]c^2$$

दिए हुए आँकड़ों एवं c^2 = 931.5 MeV/u का उपयोग करने पर हम पाते हैं

$S_n\left({}^{41}_{20}\mathrm{Ca}\right) = 8.36\ \mathrm{MeV}$ एवं $S_n\left({}^{27}_{13}\mathrm{Al}\right) = 13.06\ \mathrm{MeV}$

13.25 209 d

13.26 ${}^{14}_{6}\mathrm{C}$ के उत्सर्जन के लिए

$Q = [m_N({}^{223}_{88}\mathrm{Ra}) - m_N({}^{209}_{82}\mathrm{Pb}) - m_N({}^{14}_{6}\mathrm{C})]c^2$

$= [m({}^{223}_{88}\mathrm{Ra}) - m({}^{209}_{82}\mathrm{Pb}) - m({}^{14}_{6}\mathrm{C})]c^2 = 31.85\ \mathrm{MeV}$

${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ के उत्सर्जन के लिए, $Q = [m({}^{223}_{88}\mathrm{Ra}) - m({}^{219}_{86}\mathrm{Rn}) - m({}^{4}_{2}\mathrm{He})]c^2 = 5.98\ \mathrm{MeV}$

13.27 $Q = [m({}^{238}_{92}\mathrm{U}) + m_n - m({}^{140}_{58}\mathrm{Ce}) - m({}^{99}_{44}\mathrm{Ru})]c^2 = 231.1\ \mathrm{MeV}$

13.28 (a) $Q = [m({}^{2}_{1}\mathrm{H}) + m({}^{3}_{1}\mathrm{H}) - m({}^{4}_{2}\mathrm{He}) - m_n]c^2 = 17.59\ \mathrm{MeV}$

(b) कूलॉम प्रतिकर्षण के निरसन के लिए आवश्यक गतिज ऊर्जा = 480.0 KeV

480.0 keV = 7.68×10^{-14} J = $3kT$

$$\therefore T = \frac{7.68\times10^{-14}}{3\times1.381\times10^{-23}} \qquad (\text{चूँकि } k = 1.381\times10^{-23}\ \mathrm{J\,K^{-1}})$$

= 1.85×10^{9} K (आवश्यक ताप)

13.29 $K_{max}\left(\beta_1^-\right) = 0.284\ \mathrm{MeV},\ K_{max}\left(\beta_2^-\right) = 0.960\ \mathrm{MeV}$

$\nu(\gamma_1) = 2.627\times10^{20}\ \mathrm{Hz},\ \nu(\gamma_2) = 0.995\times10^{20}\ \mathrm{Hz},\ \nu(\gamma_3) = 1.632\times10^{20}\ \mathrm{Hz}$

13.30 (a) नोट करें कि सूर्य के अभ्यंतर में चार ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$ नाभिक मिलकर (संलयन) एक ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ नाभिक बनाते हैं तथा प्रति संलयन लगभग 26 MeV की ऊर्जा विमुक्त होती है।

1kg हाइड्रोजन के संलयन में विमुक्त ऊर्जा = 39×10^{26} MeV

(b) 1kg ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ के विखंडन में विमुक्त ऊर्जा = 5.1×10^{26} MeV

1 kg हाइड्रोजन के संलयन में विमुक्त ऊर्जा, 1 kg यूरेनियम के विखंडन में विमुक्त ऊर्जा की लगभग 8 गुनी है।

13.31 3.076×10^{4} kg

अध्याय 14

14.1 (c)

14.2 (d)

14.3 (c)

14.4 (c)

14.5 (c)

14.6 (b), (c)

14.7 (c)

14.8 अर्धतरंग के लिए 50 Hz ; पूर्ण तरंग के लिए100 Hz

14.9 v_i = 0.01 V ; I_B= 10 μA

14.10 2 V

14.11 नहीं ($h\nu$ का मान E_g से अधिक ही है)

14.12 $n_e \approx 4.95 \times 10^{22}$; $n_h = 4.75 \times 10^9$; n-प्रकार का, चूँकि $n_e >> n_h$

संकेत : आवेश उदासीनता के लिए $N_D - N_A = n_e - n_h$; $n_e.n_h = n_i^2$

इन समीकरणों को हल करने पर, $n_e = \frac{1}{2}\left[(N_D - N_A) + \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2}\right]$

14.13 1×10^5

14.14 (a) 0.0629 A, (b) 2.97 A, (c) 0.336 Ω

(d) दोनों वोल्टताओं के लिए धारा I का मान लगभग I_0 के समान होगा, इससे ज्ञात होता है कि पश्चदिशिक बायस में गतिक प्रतिरोध का मान अनंत होगा!

14.16 NOT ;

A	Y
0	1
1	0

14.17 (a) AND (b) OR

14.18 OR गेट

14.19 (a) NOT, (b) AND

अध्याय 15

15.1 (b) 10 kHz का विकिरण नहीं होगा (ऐंटेना साइज़), 1 GHz एवं 1000 GHz पार चले जाएँगे।

15.2 (d) सारणी 15.2 देखिए।

15.3 (c) दशमलव प्रणाली संतत मानों का समुच्चय है।

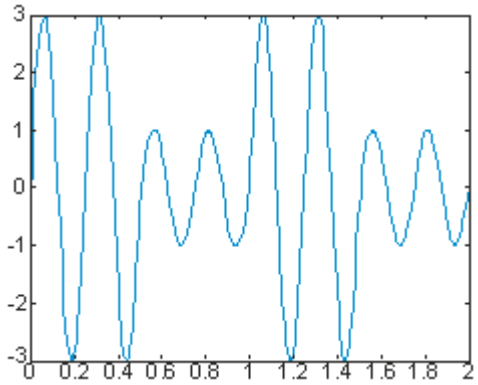
15.4 नहीं। जिस क्षेत्र में सेवाएँ पहुँचेंगी उसका क्षेत्रफल है $A = p\, d_T^2 =$

$$\frac{22}{7} \times 162 \times 6.4 \times 10^6 = 3258\,\text{km}^2$$

15.5 $\mu = 0.75 = \dfrac{A_m}{A_c}$

$$A_m = 0.75 \times 12 = 9\,\text{V}$$

15.6 (a)



(b) $\mu = 0.5$

15.7 चूँकि AM तरंग $(A_c + A_m \sin\omega_m t) \cos \omega_c t$, द्वारा व्यक्त होती है, इसका अधिकतम आयाम $M_1 = A_c + A_m$ होगा जबकि न्यूनतम आयाम $M_2 = A_c - A_m$ होगा। अतः माडुलन सूचकांक है,

$$m = \frac{A_m}{A_c} = \frac{M_1 - M_2}{M_1 + M_2} = \frac{8}{12} = \frac{2}{3}$$

यदि $M_2 = 0$ तो स्पष्ट रूप से ही $m = 1$ चाहे M_1 का मान कुछ भी हो।

15.8 सरलता की दृष्टि से माना कि अभिग्राही सिग्नल
$A_1 \cos (\omega_c + \omega_m)\, t$ है।
वाहक सिग्नल $A_c \cos \omega_c t$, अभिग्राही स्टेशन पर उपलब्ध है।
दोनों सिग्नलों को गुणा करने पर हमें प्राप्त होता है,
$A_1 A_c \cos (\omega_c + \omega_m)\, t \cos \omega_c t$

$$= \frac{A_1 A_c}{2}\left[\cos(2\omega_c + \omega_m)t + \cos\omega_m t\right]$$

यदि इस सिग्नल को निम्न पारक फिल्टर से गुजारा जाए तो हम माडुलित सिग्नल

$\dfrac{A_1 A_c}{2} \cos\omega_m t$ प्राप्त कर लेते हैं।

परिशिष्ट

परिशिष्ट A 1

ग्रीक वर्णमाला

एल्फा	A	α	न्यू	N	ν
बीटा	B	β	ज़ाई	Ξ	ξ
गामा	Γ	γ	ओमीक्रॉन	O	o
डेल्टा	Δ	δ	पाई	Π	π
एप्सिलॉन	E	ε	र्‌हो	P	ρ
जीटा	Z	ζ	सिग्मा	Σ	σ
ईटा	H	η	टॉअ	T	τ
थीटा	Θ	θ	अपसिलॉन	Y	υ
आयोटा	I	ι	फाइ	Φ	ϕ, φ
कप्पा	K	κ	काइ	X	χ
लैम्डा	Λ	λ	साइ	Ψ	ψ
म्यू	M	μ	ओमेगा	Ω	ω

परिशिष्ट A2

सामान्य SI पूर्व-लग्न तथा अपवर्त्यों और अपवर्तकों के प्रतीक

गुणज (अपवर्त्य)			अपवर्तक		
गुणक	**पूर्वलग्न**	**प्रतीक**	**गुणक**	**पूर्वलग्न**	**प्रतीक**
10^{18}	एक्जा	E	10^{-18}	एटो	a
10^{15}	पेटा	P	10^{-15}	फैम्टो	f
10^{12}	टेरा	T	10^{-12}	पीको	p
10^{9}	गीगा	G	10^{-9}	नैनो	n
10^{6}	मेगा	M	10^{-6}	माइक्रो	μ
10^{3}	किलो	k	10^{-3}	मिली	m
10^{2}	हेक्टो	h	10^{-2}	सेंटी	c
10^{1}	डेका	da	10^{-1}	डेसि	d

परिशिष्ट A 3

कुछ महत्वपूर्ण नियतांक

नाम	प्रतीक	मान
निर्वात में प्रकाश की चाल	c	$2.9979 \times 10^{8}\ m\ s^{-1}$
इलेक्ट्रॉन का आवेश	e	$1.602 \times 10^{-19} C$
गुरुत्वीय नियतांक	G	$6.673 \times 10^{-11}\ N\ m^2 kg^{-2}$
प्लांक नियतांक	h	$6.626 \times 10^{-34}\ J\ s$
बोल्ट्ज़मान नियतांक	k	$1.381 \times 10^{-23}\ J K^{-1}$
आवोगाद्रो संख्या	N_A	$6.022 \times 10^{23}\ mol^{-1}$
सार्वत्रिक गैस नियतांक	R	$8.314\ J\ mol^{-1} K^{-1}$
इलेक्ट्रॉन का द्रव्यमान	m_e	$9.110 \times 10^{-31}\ kg$
न्यूट्रॉन का द्रव्यमान	m_n	$1.675 \times 10^{-27}\ kg$
प्रोटॉन का द्रव्यमान	m_p	$1.673 \times 10^{-27}\ kg$
इलेक्ट्रॉन-आवेश व द्रव्यमान अनुपात	e/m_e	$1.759 \times 10^{11}\ C/kg$
फैराडे नियतांक	F	$9.648 \times 10^{4}\ C/mol$
रिडबर्ग नियतांक	R	$1.097 \times 10^{7}\ m^{-1}$
बोहर त्रिज्या	a_0	$5.292 \times 10^{-11}\ m$
स्टेफॉन-बोल्ट्ज़मान नियतांक	σ	$5.670 \times 10^{-8}\ W\ m^{-2} K^{-4}$
वीन नियतांक	b	$2.898 \times 10^{-3}\ m\ K$
मुक्त आकाश का परावैद्युतांक	ε_0 $1/4\pi\ \varepsilon_0$	$8.854 \times 10^{-12}\ C^2 N^{-1} m^{-2}$ $8.987 \times 10^{9}\ N\ m^2 C^{-2}$
मुक्त आकाश की चुंबकशीलता	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}\ T\ m\ A^{-1}$ $\cong 1.257 \times 10^{-6}\ Wb A^{-1} m^{-1}$

अन्य उपयोगी नियतांक

नाम	प्रतीक	मान
ऊष्मा का यांत्रिक तुल्यांक	J	$4.186\ J\ cal^{-1}$
मानक वायुमंडलीय दाब	1 atm	$1.013 \times 10^{5} Pa$
परम शून्य	0 K	–273.15 °C
इलेक्ट्रॉन वोल्ट	1 eV	$1.602 \times 10^{-19}\ J$
परमाण्वीय द्रव्यमान मात्रक	1 u	$1.661 \times 10^{-27}\ kg$
इलेक्ट्रॉन विराम ऊर्जा	mc^2	0.511 MeV
1u का ऊर्जा तुल्यांक	$u\ c^2$	931.5 MeV
आदर्श गैस का आयतन (0°C तथा 1 atm)	V	$22.4\ L\ mol^{-1}$
गुरुत्वीय त्वरण (समुद्र तल, विषुवत वृत्त पर)	g	$9.78049\ m\ s^{-2}$

पारिभाषिक शब्दावली

अंकक इलेक्ट्रॉनिकी	Digital electronics
अंकीय सिग्नल	Digital signal
अंतक विभव	Cut off potential
अंतक विभव	Cut-off voltage/Stopping potential
अंतक वोल्टता	Cut-off voltage/Stopping potential
अंत:क्षिप्त वाहक	Injected carriers
अंतराकाशी आवेश	Space charge
अंतरापृष्ठ	Interface
अग्रदिशिक बॉयस	Forward bias
अतिक्रांतिक रिएक्टर	Super saturated reacter
अदीप्त फ्रिंज	Dark fringe
अनिश्चितता सिद्धांत	Uncertainty Principle
अनुमत ऊर्जा	Permissible energy
अनुमत मान	Rated value
अनुरूप सिग्नल, संतत सिग्नल	Analog signal
अपद्रव्यी अर्धचालक, अशुद्धि अर्धचालक	Extrinsic semiconductor
अपमिश्रक	Dopant
अपरिक्षेपी माध्यम	Non-dispersive medium
अपवर्तनांक	Refractive index
अपवाह वेग	Drift
अपसरित	Diaverge
अपूरित बंध	Empty band
अबिंदुकता	Astigmatism
अभिदृश्यक	Objective
अभिरक्त विस्थापन	Red shift
अभिसारित	Converge
अर्ध-आयु	Half life
अर्धचालक	Semiconductors
अर्धचालक डायोड	Semiconductors diode
अर्ध-तरंग दिष्टकारी	Half-wave rectifier
अध्रुवित तरंग	Unpolarised wave
अल्पांश आवेश वाहक	Minority charge carriers
अल्पांश वाहक	Minority carriers
अवपरमाण्विक डोमेन	Sub-atomic domain
अवमंदक	Moderator
अवशोषण स्पेक्ट्रम	Absorption spectra
अविकिरणी कक्षा	Non-radiating orbit
आइंस्टाइन का प्रकाश-विद्युत समीकरण	Einstein's photoelectric equation
आकाश तरंगें	Space wave
आधार बैंड सिग्नल	Base Band Signal
आपेक्षिकीय	Relativistic
ऑप्टोइलेक्ट्रॉनिक संधि युक्तियाँ	Optoelectric Junction Devices
आयनन ऊर्जा	Ionisation energy
आयाम माडुलन	Amplitude modulation
आयाम माडुलित तरंग को उत्पन्न करना	Production of amplitude modulated wave

पारिभाषिक शब्दावली

आयाम माडुलित तरंग का संसूचन	Detection of amplitude modulated wave
उत्तेजित अवस्था	Excited state
उत्सर्जक	Emitter
उत्सर्जन स्पेक्ट्रम	Emission spectra
उभयावतल लेंस	Double concave lens
उभयोत्तल लेंस	Double convex lens
ऊर्जा अंतराल	Band gap
ऊर्जा बैंड	Energy band
एकल झिरी विवर्तन	Single slit Diffraction
एकल मान फलन	Single Values function
एकवर्णीय प्रकाश	Monochromatic light
एकीकृत परिपथ	Integrated circuits (IC)
ऐल्फा-कण प्रकीर्णन	Alpha-particle scattering
ऐल्फा-क्षय	Alpha-decay
AND गेट	AND gate
OR गेट	OR gate
औसत आयु	Mean life
कणिका	Carpuscle
कला	Phase
कला असंबद्ध	Incoherent
कला संबद्ध	Coherent
कला संबद्ध स्रोत	Coherent source
कार्य फलन	Work function
काल-पश्चता	Time log
क्रांतिक कोण	Critical angle
कैसेग्रेन दूरदर्शक	Cassegrain telescope
कृष्णिका	Black-body
क्रमवीक्षण	Scanning
क्रिस्टल जालक	Crystal Lattices
क्यूरी	Curie
क्वांटम यांत्रिकी	Quantum mechanics
क्वांटम संख्या	Quantum number
क्षय-स्थिरांक	Decay-constant
क्षीणता	Attenuation
क्षोभमंडल	Troposphere
खंड (आधार)	Base
गवाक्ष	Window
गामा-क्षय	Gamma-decay
गुणन कारक (विखंडन)	Multiplication factor (fission)
गोलीय दर्पण	Spherical mirror
गोलीय विपथन	Spherical aberration
ग्राही	Receiver
चालकता	Conductivity
चालन बैंड	Conduction band
चुंबकीय फ्लक्स	Magnetic flux
चैनल	Channel
जरा दूरदर्शिता	Presbyopia
जेनर डायोड	Zener diode
ज्योति तीव्रता	Luminous intensity
ज्योति फ्लक्स	Luminous flux
ज्योतिर्मयता	Luminance
ट्रांजिस्टर दोलित्र	Transistor oscillator
ट्रांजिस्टर प्रवर्धक के रूप में	Transistor as an amplifier
ट्रांजिस्टर स्विच के रूप में	Transistor as a switch
ट्रान्सड्युसर	Transducer
ठोस अवस्था अर्धचालक इलेक्ट्रॉनिकी	Solid state semiconductor electronics
डाइऑप्टर	Dioptre
डॉप्लर प्रभाव	Doppler effect
तरंगाग्र	Wavefront
तरंगाग्र गोलीय	Wavefront spherical
तरंगाग्र समतल	Wavefront plane
तापनाभिकीय संलयन	Thermonuclear fusion
तापायनिक उत्सर्जन	Thermionic emission
तारों में ऊर्जा जनन	Energy generation in stars
तीव्र प्रजनक रिएक्टर	Fast breeder reactor
दाता	Donar

भौतिकी

दीप्त	Glow
दीप्त फ्रिंज	Bright fringe
दीर्घदृष्टि दोष	Hypermetropia
देहली आवृत्ति	Threshold frequency
दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य	de Broglie wavelength
दे ब्राग्ली स्पष्टीकरण	de Broglie explanation
द्रव्यमान क्षति	Mass defect
द्रव्यमान संख्या	Mass number
द्रव्यमान वर्णक्रममापी	Mass spectrometer
द्विआधारी अंकक सिग्नल	Binary Signal
द्वितीयक तरंगिका	Secondary wavelet
द्युति	Brightness
धारा प्रवर्धक गुणांक	Current amplification factor
ध्रुवण	Polarisation
नाभिकीय बंधन ऊर्जा	Nuclear binding energy
नाभिकीय रिएक्टर	Nuclear reactor
नाभिकीय विखंडन	Nuclear fission
नाभिकीय विध्वंस	Nuclear holocaust
नाभिकीय शीत	Nuclear winter
नाभिकीय संलयन	Nuclear fusion
निकट दृष्टिदोष	Myopia
निम्नतम अवस्था	Ground state
नियंत्रक छड़ें	Control rods
निरोधी विभव	Retanding / Stopping potential
निर्गत अभिलाक्षणिक	Output Characteristic
निर्गत प्रतिरोध, ट्रांजिस्टर	Output resistance of a transistor
निवेश प्रतिरोध	Input resistance
नीला विस्थापन	Blue shift
न्यूट्रॉन	Neutrons
नैज अर्धचालक	Intrinsic semiconductor
NAND गेट	NAND gate
NOR गेट	NOR gate
n-प्रकार का अर्धचालक	n-type semiconductor
n-p-n ट्रांजिस्टर	n-p-n transistor
पक्ष्माभी पेशी	Ciliary muscles
पश्च तरंग	Back wave
पश्चदिशिक बॉयस	Reverse bias
परमाणु क्रमांक	Atomic number
परमाणु द्रव्यमान मात्रक	Atomic mass unit
परमाण्वीय परिकल्पना	Atomic hypothesis
परमाण्वीय स्पेक्ट्रम	Atomic spectra
परागमन	Transmission
पाशन श्रेणी	Paschen series
पार्श्व बैंड	Side bands
पार्श्विक विस्थापन	Lateral shift
परिक्षेपण	Dispersion
परितारिका	Iris
परिमितता	Finiteness
पुनरावर्तक	Repeater
पुनर्भरण प्रवर्धक	Feedback Amplifier
पूर्ण आंतरिक परावर्तन	Total internal reflection
पूर्ण तरंग दिष्टकारी	Full wave rectifier
पोलेरॉइड	Polaroid
प्रकाश उत्सर्जक डायोड	Light emitting diode
प्रकाशमिति	Photometry
प्रकाश संवेदी	Light sensitive
प्रकाश संसूचक	Photo sensitive detector
प्रकाश-विद्युत प्रभाव	Photoelectric effect
प्रकाशिक तंतु	Optical fibers
प्रतिदीप्त	Fluorescent glow
प्रतिमान	Pattern
प्रतिरोधकता	Resistivity
प्रतीप संतृप्त धारा	Severse saturation current
प्रतिदीप्त घनत्व	Illuminance density
प्रणोदित दोलन	Forced Oscillations
प्रवर्धक	Amplifier

पारिभाषिक शब्दावली

प्रवर्धन	Amplification
प्रसारण	Broadcast
प्रिज्म द्वारा परिक्षेपण	Dispersion by a prism
प्रेषण माध्यम की बैंड-चौड़ाई	Bandwidth of transmission medium
प्लम पुडिंग मॉडल	Plum pudding model
p-प्रकार का अर्धचालक	p-type semiconductor
p-n संधि	p-n Junction
p-n-p ट्रांजिस्टर	p-n-p transistor
फुंट श्रेणी	Pfund series
फ्रिंज-चौड़ाई	Fringe-width
फ्रैंक-हर्ट्ज़ प्रयोग	Franck-Hertz experiment
फोटॉन	Photon
फोटोडायोड	Photodiode
बंधन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन	Binding energy per nucleon
बहुसंख्यक आवेश वाहक	Majority carriers
बिंदुपथ	Locus
बीटा-क्षय	Beta-decay
बैंड-चौड़ाई, सिग्नल की	Bandwidth of signal
बैंड पारक फिल्टर	Band pass filter
बैकेरल	Becquerel
बोर त्रिज्या	Bohr radius
बोर के अभिग्रहीत	Bohr's postulates
ब्रूस्टर कोण	Brewster's angle
ब्रूस्टर का नियम	Brewster's law
ब्रेकेट श्रेणी	Brackett series
जेनर भंजन वोल्टता	Zener breakdown voltage
भू-तरंग	Ground wave
मध्यमंडल	Mesosphere
मरीचिका	Mirage
महोर्मि	Surge
माइक्रोप्रोसेसर	Microprocessor
माडुलन	Modulation
माडुलन सूचकांक	Modulation index
मायोपिया	Mayopia
मुख्य फोकस	Principal focus
यादृच्छिक गति	Random motion
यौगिक अर्धचालक	Semiconductors compound
रव	Noise
रेडियोऐक्टिव क्षमता नियम	Law of radioactive decay
रेडियोऐक्टिवता	Radioactivity
रेडियो क्षितिज	Radio Horizen
रैले प्रकीर्णन	Rayleigh scattering
रोधिका विभव	Barrier potential
लघुपरासी बल	Short range force
लाइमैन श्रेणी	Lyman series
लाल दैत्य	Red giant
लेंस की क्षमता	Power of lens
लेंस-मेकर सूत्र	Lens-maker's formula
लैटिस/जालक	Lattice
वर्जित	Forbidden
वर्ण विपथन	Chromatic aberration
वाहक	Carrier
वि-उत्तेजन	De-excitation
विकिरण की ऊर्जा के क्वांटा	Quanta of energy
विकिरणी पुनर्योजन	Radiation recombination
विक्षोभ	Disturbance
विघटन-स्थिरांक	Disintegration constant
विघटनज नाभिक	Daughter Nucleus
विचलन कोण	Angle of deviation
विनिर्देश	Specification
विद्युत प्रदाय	Electric power supply
विपटन	Splitting
विभव पात	Potential drop
विभेदन क्षमता	Resolving power
विलोपन	Annihilation
विवर्तन	Diffraction
विसर्पण	Glide

भौतिकी

वोल्टता नियंत्रक	Voltage Regulator
व्यतिकरण फ्रिंजें तथा पैटर्न	Interference fringes
व्योम तरंगें	Sky wave
शलाका और शंकु	Rods and cones
शृंखला अभिक्रिया	Chain reaction
शृंखला क्रिया	Chain reaction
संक्रियात्मक प्रवर्धक	Operational amplifier
संख्यात्मक द्वारक	Numerical aperture
संग्राहक	Collector
संघट्ट प्राचाल	Impact parameter
संतृप्त धारा	Saturation current
संचार	Communication
संधि ट्रांजिस्टर	Junction transistor
संपीडित भारी जल रिएक्टर	Pressurised heavy water reactors
संप्रेषण	Transmission
संयोजकता बैंड	Valence band
संयुक्त सूक्ष्मदर्शी	Microscope compound
संविरचित	Fabricated
संसूचन	Detection
सक्रियता रेडियोऐक्टिव प्रजातियों की	Activity of radioactive substances
सत्यमान सारणी	Truth table
समतल ध्रुवित तरंग	Plane polarised wave
समताप मंडल	Stratosphere
समोर्जी	Monoenergetic
समन्यूट्रॉनिक	Isotones
समभारिक	Isobars
समदैशिक	Isotropic
समस्थानिक	Isotopes
सर्वांगसम	Congruent
सांद्रता प्रवणता	Concentration gradient
सिग्नल	Signal
सोपानित	Cascaded
सौर सेल	Solar cell
स्नेल के नियम	Snell's law
स्पंद मान वोल्टता	Pulsating Voltage
स्पष्ट दर्शन की अल्पतम दूरी	Least distance of distinct vision
स्पेक्ट्रमी श्रेणी	Spectral series
हाइगेंस का सिद्धांत	Huygen's Principle
हाइड्रोजनसम परमाणु	Hydrogenic atom
हाइपरमेट्रोपिया	Hypermetropia
होल	Holes
ह्रासी क्षेत्र	Depletion region
ह्रासी स्तर	Depletion layer