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 प्रिज़्म 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,
$f_0 = u_0 = -2.5$ 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

© NCERT not to be republished

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 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

9.19 21.4 cm

9.20 (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।

© NCERT not to be republished

Reprint 2025-26

(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 × (20/92) = 0.652

प्रतिबिंब का साइज़ = 0.652 × 1.5 cm = 0.98 cm

9.21 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 $i = \sin^{-1} 0.4965 \simeq 30°$।

9.22 (a) $\dfrac{1}{v} + \dfrac{1}{9} = \dfrac{1}{10}$, अर्थात् $v = -90$ cm

आवर्धन का परिमाण = 90/9 = 10

आभासी प्रतिबिंब में प्रत्येक वर्ग का क्षेत्रफल = 10 × 10 × 1 mm^2 = 100 mm^2 = 1 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।

9.23 (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।

9.24 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।

Reprint 2025-26

© NCERT not to be republished

9.25 (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 $\dfrac{v_0}{|u_0|} = \dfrac{1}{(|u_0|/f_0)-1}$ 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।

9.26 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

$$= \frac{30}{6} = 5, \text{ अत:}$$

$$\frac{1}{5u_0} - \frac{1}{u_0} = \frac{1}{1.25}$$

Reprint 2025-26

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।

9.27 (a) $m = (f_0/f_e) = 28$

(b) $m = \frac{f_0}{f_e}\left[1+\frac{f_0}{25}\right] = 33.6$

9.28 (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

9.29 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।

9.30 परावर्तित किरणें दर्पण के घूर्णन कोण से दोगुने कोण पर विक्षेपित होती हैं। अत: $d/1.5 = \tan 7°$; $d = 18.4$ cm

9.31 $n = 1.33$

अध्याय 10

10.1 (a) परावर्तित प्रकाश : (तरंगदैर्घ्य, आवृत्ति, चाल आपतित प्रकाश के समान हैं)

$\lambda = 589$ 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°

© NCERT not to be republished

10.8 $\tan^{-1}(1.5) \simeq 56.3^{\circ}$

10.9 5000 Å, 6×10^{14} Hz; 45°

10.10 40 m

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 6.59×10^{-34} J s

11.6 2.0 V

11.7 नहीं, क्योंकि $\nu < \nu_o$

11.8 4.73×10^{14} Hz

11.9 2.16 eV = 3.46×10^{-19}J

11.10 (a) 1.7×10^{-35} m (b) 1.1×10^{-32} m (c) 3.0×10^{-23} m

11.11 $\lambda = h/p = h/(h\nu/c) = c/\nu$

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 5.6×10^{14} Hz

12.4 13.6 eV; –27.2 eV

12.5 9.7×10^{-8} m; 3.1×10^{15} Hz

12.6 (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

12.7 2.12×10^{-10} m; 4.77×10^{-10}m

12.8 लाइमैन श्रेणी: 103 nm तथा 122 nm
बामर श्रेणी: 665 nm

12.9 2.6×10^{74}

© NCERT not to be republished

अध्याय 13

13.1 104.7 MeV

13.2 8.79 MeV, 7.84 MeV

13.3 1.584×10^{25} MeV अथवा 2.535×10^{12}J

13.4 1.23

13.5 (i) $Q = -4.03$ MeV; ऊष्माशोषी

(ii) $Q = 4.62$ MeV; ऊष्माउन्मोची

13.6 $Q = m\left({}^{56}_{26}\text{Fe}\right) - 2m\left({}^{28}_{13}\text{Al}\right) = 26.90$ MeV; असंभव

13.7 4.536×10^{26} MeV

13.8 लगभग 4.9×10^{4} y

13.9 360 KeV

अध्याय 14

14.1 (c)

14.2 (d)

14.3 (c)

14.4 (c)

14.5 (c)

14.6 अर्धतरंग के लिए 50 Hz ; पूर्ण तरंग के लिए100 Hz

© NCERT not to be republished

भौतिकी

भाग 2

कक्षा 12 के लिए पाठ्यपुस्तक

12092

© NCERT
not to be republished

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

Reprint 2025-26

12092–भौतिकी (भाग 2)
कक्षा 12 के लिए पाठ्यपुस्तक

ISBN 81-7450-725-6 (भाग-1)
ISBN 81-7450-726-4 (भाग-2)

प्रथम संस्करण
जून 2007 ज्येष्ठ 1929

पुनर्मुद्रण
मार्च 2008, मार्च 2009,
जनवरी 2010, नवंबर 2010,
जनवरी 2012, दिसंबर 2012,
दिसंबर 2013, अक्तूबर 2014,
दिसंबर 2015, फ़रवरी 2017,
जनवरी 2018, फ़रवरी 2019,
जनवरी 2020, जनवरी 2021

संशोधित संस्करण
सितंबर 2022 भाद्रपद 1944

पुनर्मुद्रण
मार्च 2024 चैत्र 1946
दिसंबर 2024 पौष 1946

PD 18T BS

© *राष्ट्रीय शैक्षिक अनुसंधान और प्रशिक्षण परिषद्, 2007, 2022*

₹ 105.00

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

प्रकाशन प्रभाग में सचिव, राष्ट्रीय शैक्षिक अनुसंधान और प्रशिक्षण परिषद्, श्री अरविंद मार्ग, नयी दिल्ली 110 016 द्वारा प्रकाशित तथा सालासर इमेजिंग सिस्टम, ए-97, सेक्टर-58, नोएडा (उ.प्र.) 201301 द्वारा मुद्रित।

सर्वाधिकार सुरक्षित

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

एन.सी.ई.आर.टी., प्रकाशन प्रभाग के कार्यालय

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

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

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

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

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

प्रकाशन सहयोग

अध्यक्ष, प्रकाशन प्रभाग	:	*एम.वी. श्रीनिवासन*
मुख्य संपादक	:	*बिज्ञान सुतार*
मुख्य उत्पादन अधिकारी (प्रभारी)	:	*जहान लाल*
मुख्य व्यापार प्रबंधक	:	*अमिताभ कुमार*
संपादक	:	*नरेश यादव*
सहायक उत्पादन अधिकारी	:	*दीपक कुमार*

आवरण एवं चित्रांकन
श्वेता राव

© NCERT not to be republished

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

© NCERT not to be republished

© NCERT
not to be republished

Reprint 2025-26

पाठ्यपुस्तकों में पाठ्य सामग्री का पुनर्संयोजन

कोविड-19 महामारी को देखते हुए, विद्यार्थियों के ऊपर से पाठ्य सामग्री का बोझ कम करना अनिवार्य है। *राष्ट्रीय शिक्षा नीति, 2020* में भी विद्यार्थियों के लिए पाठ्य सामग्री का बोझ कम करने और रचनात्मक नज़रिए से अनुभवात्मक अधिगम के अवसर प्रदान करने पर ज़ोर दिया गया है। इस पृष्ठभूमि में, राष्ट्रीय शैक्षिक अनुसंधान और प्रशिक्षण परिषद् ने सभी कक्षाओं में पाठ्यपुस्तकों को पुनर्संयोजित करने की शुरुआत की है। इस प्रक्रिया में रा.शै.अ.प्र.प. द्वारा पहले से ही विकसित कक्षावार सीखने के प्रतिफलों को ध्यान में रखा गया है।

पाठ्य सामग्रियों के पुनर्संयोजन में निम्नलिखित बिंदुओं को ध्यान में रखा गया है –

- एक ही कक्षा में अलग-अलग विषयों के अंतर्गत समान पाठ्य सामग्री का होना;
- एक कक्षा के किसी विषय में उससे निचली कक्षा या ऊपर की कक्षा में समान पाठ्य सामग्री का होना;
- कठिनाई स्तर;
- विद्यार्थियों के लिए सहज रूप से सुलभ पाठ्य सामग्री का होना, जिसे शिक्षकों के अधिक हस्तक्षेप के बिना, वे खुद से या सहपाठियों के साथ पारस्परिक रूप से सीख सकते हों;
- वर्तमान संदर्भ में अप्रासंगिक सामग्री का होना।

वर्तमान संस्करण, ऊपर दिए गए परिवर्तनों को शामिल करते हुए तैयार किया गया पुनर्संयोजित संस्करण है।

© NCERT not to be republished

Reprint 2025-26

भारत का संविधान

उद्देशिका

हम, भारत के लोग, भारत को एक [1][**संपूर्ण प्रभुत्व-संपन्न समाजवादी पंथनिरपेक्ष 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 **सब में**

व्यक्ति की गरिमा और [2][**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. को **एतद्द्वारा इस संविधान को अंगीकृत, अधिनियमित और आत्मार्पित करते हैं।**

---

1. संविधान (बयालीसवां संशोधन) अधिनियम, 1976 की धारा 2 द्वारा (3.1.1977 से) ''प्रभुत्व-संपन्न लोकतंत्रात्मक गणराज्य'' के स्थान पर प्रतिस्थापित।
2. संविधान (बयालीसवां संशोधन) अधिनियम, 1976 की धारा 2 द्वारा (3.1.1977 से) ''राष्ट्र की एकता'' के स्थान पर प्रतिस्थापित।

© NCERT not to be republished

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 तरंगदैर्घ्य

© NCERT not to be republished

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

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

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

ए.डब्ल्यू. जोशी
मुख्य सलाहकार
पाठ्यपुस्तक निर्माण समिति

© NCERT not to be republished

Reprint 2025-26

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

© NCERT not to be republished

मुखावरण

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

विश्व के विकास के विभिन्न चरण

पश्चावरण

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

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

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

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

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

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

© NCERT not to be republished

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।

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

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

परिषद् ए.पी.सी. कार्यालय तथा डी.ई.एस.एम. के प्रशासनिक 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।

© NCERT not to be republished

भौतिकी भाग 1 कक्षा 12 की विषय-सूची

आमुख *iii*
पाठ्यपुस्तकों में पाठ्य सामग्री का पुनर्संयोजन *v*
प्रस्तावना *vii*

अध्याय 1
वैद्युत आवेश तथा क्षेत्र 1

अध्याय 2
स्थिरवैद्युत विभव तथा धारिता 44

अध्याय 3
विद्युत धारा 79

अध्याय 4
गतिमान आवेश और चुंबकत्व 105

अध्याय 5
चुंबकत्व एवं द्रव्य 135

अध्याय 6
वैद्युतचुंबकीय प्रेरण 152

अध्याय 7
प्रत्यावर्ती धारा 174

अध्याय 8
वैद्युतचुंबकीय तरंगें 198

उत्तर 212

पारिभाषिक शब्दावली 218

© NCERT
not to be republished

विषय-सूची

प्रस्तावना *iii*
पाठ्यपुस्तकों में पाठ्य सामग्री का पुनर्संयोजन *v*
आमुख *vii*

अध्याय 9
किरण प्रकाशिकी एवं प्रकाशिक यंत्र

9.1 भूमिका 221
9.2 गोलीय दर्पणों द्वारा प्रकाश का परावर्तन 222
9.3 अपवर्तन 228
9.4 पूर्ण आंतरिक परावर्तन 229
9.5 गोलीय पृष्ठों तथा लेंसों द्वारा अपवर्तन 232
9.6 प्रिज़्म में अपवर्तन 239
9.7 प्रकाशिक यंत्र 241

अध्याय 10
तरंग-प्रकाशिकी

10.1 भूमिका 255
10.2 हाइगेंस का सिद्धांत 257
10.3 हाइगेंस सिद्धांत का उपयोग करते हुए समतल तरंगों का अपवर्तन तथा परावर्तन 258
10.4 तरंगों का कला-संबद्ध तथा कला-असंबद्ध योग 262
10.5 प्रकाश तरंगों का व्यतिकरण तथा यंग का प्रयोग 264
10.6 विवर्तन 266
10.7 ध्रुवण 268

अध्याय 11
विकिरण तथा द्रव्य की द्वैत प्रकृति

11.1 भूमिका 274
11.2 इलेक्ट्रॉन उत्सर्जन 275
11.3 प्रकाश-विद्युत प्रभाव 276
11.4 प्रकाश-विद्युत प्रभाव का प्रायोगिक अध्ययन 277
11.5 प्रकाश-विद्युत प्रभाव तथा प्रकाश का तरंग सिद्धांत 280
11.6 आइंस्टाइन का प्रकाश-विद्युत समीकरण : विकिरण का ऊर्जा क्वांटम 281

© NCERT not to be republished

11.7 प्रकाश की कणीय प्रकृति : फ़ोटॉन 283
11.8 द्रव्य की तरंग प्रकृति 284

अध्याय 12
परमाणु

12.1 भूमिका 290
12.2 एल्फा कण प्रकीर्णन तथा परमाणु का रदरफोर्ड नाभिकीय मॉडल 291
12.3 परमाण्वीय स्पेक्ट्रम 296
12.4 हाइड्रोजन परमाणु का बोर का मॉडल 297
12.5 हाइड्रोजन परमाणु का लाइन स्पेक्ट्रम 300
12.6 बोर के क्वांटमीकरण के द्वितीय अभिगृहीत का दे ब्रॉग्ली द्वारा स्पष्टीकरण 301

अध्याय 13
नाभिक

13.1 भूमिका 306
13.2 परमाणु द्रव्यमान एवं नाभिक की संरचना 306
13.3 नाभिक का साइज़ 309
13.4 द्रव्यमान-ऊर्जा तथा नाभिकीय बंधन-ऊर्जा 310
13.5 नाभिकीय बल 313
13.6 रेडियोऐक्टिवता 314
13.7 नाभिकीय ऊर्जा 314

अध्याय 14
अर्धचालक इलेक्ट्रॉनिकी– पदार्थ, युक्तियाँ तथा सरल परिपथ

14.1 भूमिका 323
14.2 धातुओं, चालकों तथा अर्धचालकों का वर्गीकरण 324
14.3 नैज अर्धचालक 327
14.4 अपद्रव्यी अर्धचालक 329
14.5 p-n संधि 333
14.6 अर्धचालक डायोड 334
14.7 संधि डायोड का दिष्टकारी के रूप में अनुप्रयोग 338

परिशिष्ट 343
उत्तर 345
ग्रंथ-सूची 352
पारिभाषिक शब्दावली 354

© NCERT not to be republished

12092CH09

अध्याय 9

किरण प्रकाशिकी एवं प्रकाशिक यंत्र

© NCERT not to be republished

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 $c = 2.99792458 \times 10^8$ m s^{-1} है। अनेक प्रयोजनों के लिए, इसका मान $c = 3 \times 10^8$ m s^{-1} पर्याप्त है। निर्वात में प्रकाश की चाल प्रकृति में प्राप्य उच्चतम चाल है।

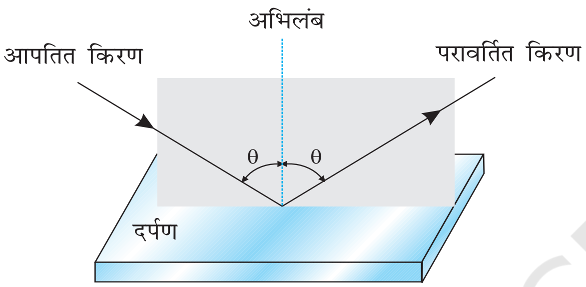
हमारी अंतर्दर्शी धारणा कि प्रकाश सरल रेखा में गमन करता है, (जो कुछ हमने अध्याय 8 में सीखा था) का खंडन करती प्रतीत होती है क्योंकि वहाँ हमने प्रकाश को वैद्युतचुंबकीय तरंग माना था जिसकी तरंगदैर्घ्य स्पेक्ट्रम के दृश्य भाग में होती है। इन दोनों तथ्यों में सामंजस्य कैसे स्थापित किया जाए? इसका उत्तर यह है 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।

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।

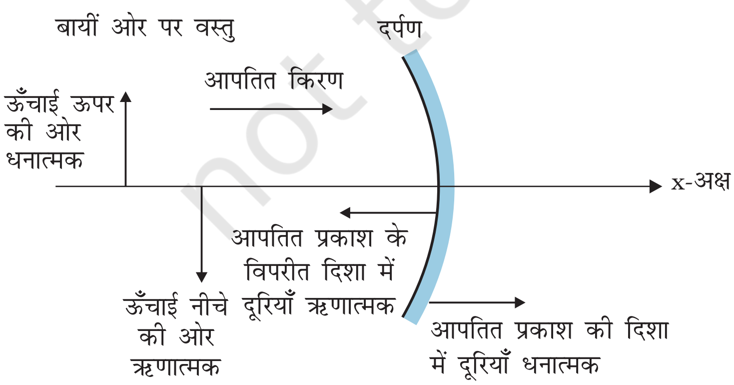


चित्र 9.1 आपतित किरण, परावर्तित किरण तथा परावर्तक पृष्ठ के आपतन बिंदु पर अभिलंब एक ही तल में होते हैं।

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।

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।



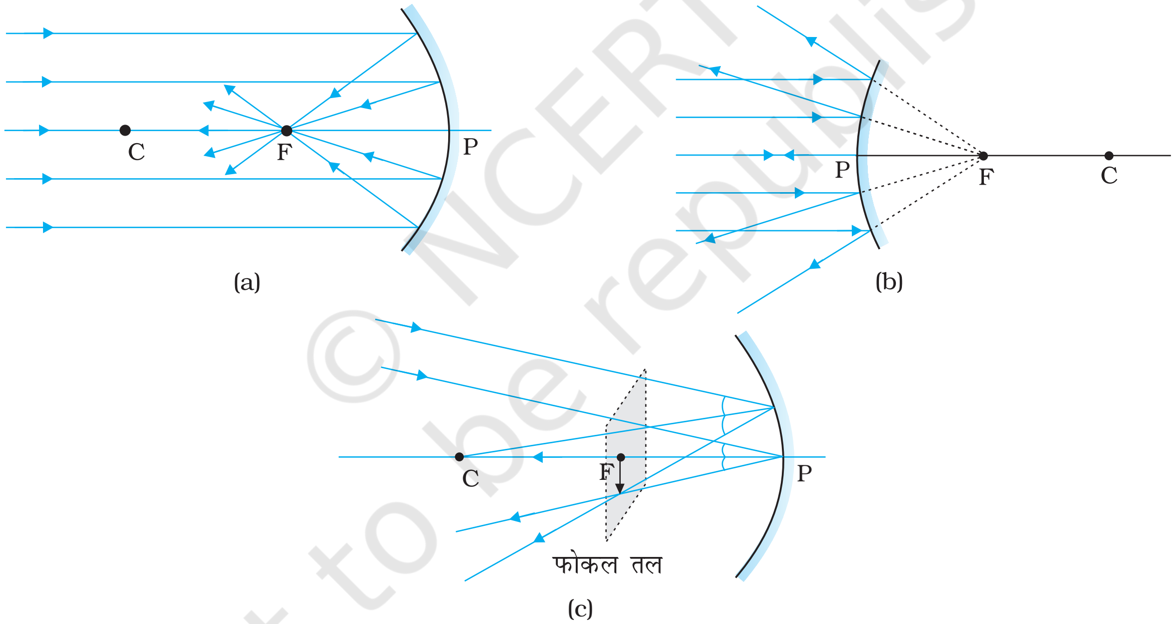
चित्र 9.2 कार्तीय चिह्न परिपाटी।

Reprint 2025-26

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।

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)]।



चित्र 9.3 अवतल तथा उत्तल दर्पण के फोकस।

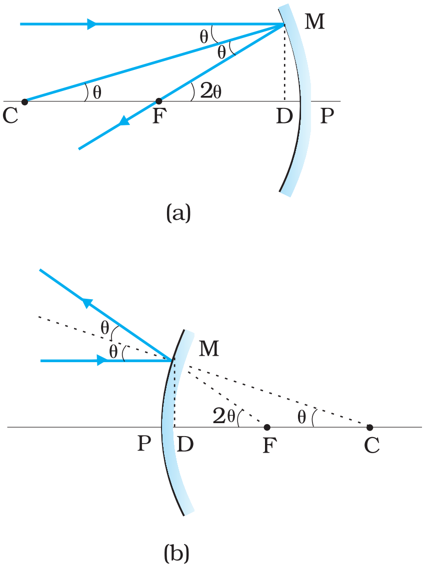
दर्पण के फ़ोकस F तथा ध्रुव P के बीच की दूरी दर्पण की *फ़ोकस दूरी* कहलाती है तथा इसे f द्वारा निर्दिष्ट किया जाता है। अब हम यह दर्शाते हैं कि $f = R/2$, यहाँ R दर्पण की वक्रता त्रिज्या है। किसी आपतित प्रकाश किरण के परावर्तन की ज्यामिति चित्र 9.4 में दर्शायी गई है।

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 $\angle MFP = 2\theta$

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

© NCERT not to be republished



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

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, $FD = \dfrac{CD}{2}$ (9.2)

अथवा, θ के लघु मान के लिए, बिंदु D बिंदु P के बहुत निकट है, इसलिए $FD = f$ तथा $CD = R$। अत: 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।

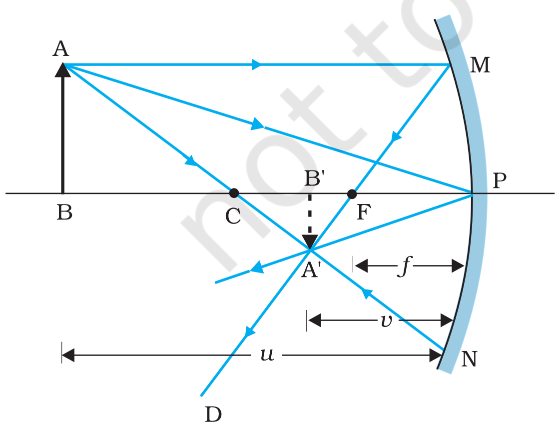
सिद्धांत रूप में, हम वस्तु के किसी बिंदु से निकलने वाली कोई दो किरणें ले सकते हैं, उनके पथ अनुरेखित करते हैं, उनका प्रतिच्छेद बिंदु ज्ञात करते हैं और इस प्रकार, किसी गोलीय दर्पण द्वारा परावर्तन के कारण बना किसी बिंदु का प्रतिबिंब प्राप्त करते हैं। तथापि, व्यवहार में निम्नलिखित किरणों में से कोई सी दो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

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

Reprint 2025-26

© NCERT not to be republished

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

क्योंकि ∠ APB = ∠ A′PB′, समकोण त्रिभुज A′B′P तथा ABP भी समरूप हैं। अतः

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

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

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

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। अतः

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

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

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

अथवा $\frac{v-f}{f}=\frac{v}{u}$

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

इसे v से भाग देने पर हमें प्राप्त होगा

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

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। अतः

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

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

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

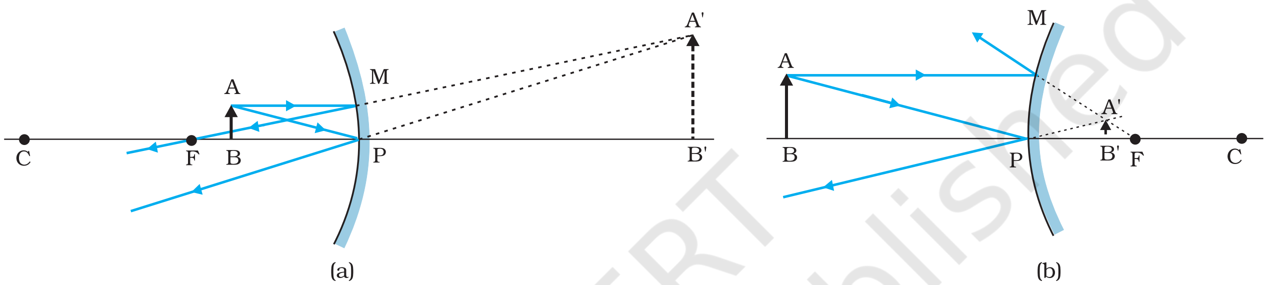
Reprint 2025-26

© NCERT not to be republished

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

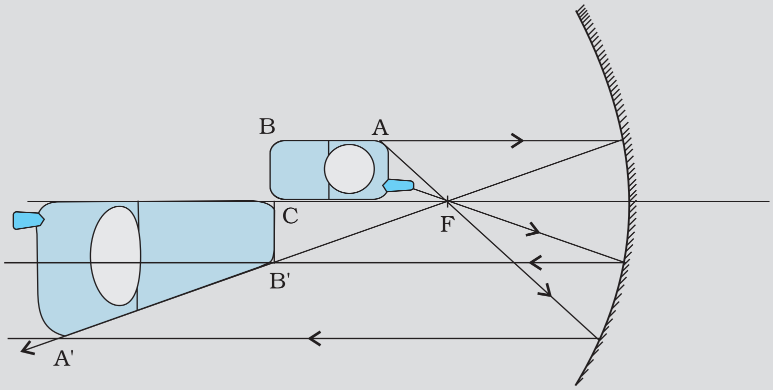
उदाहरण 9.1 मान लीजिए चित्र 9.5 में दर्शाए अवतल दर्पण के परावर्तक पृष्ठ के नीचे का आधा भाग किसी अपारदर्शी (अपरावर्ती) पदार्थ से ढक दिया गया है। दर्पण के सामने स्थित किसी बिंब के दर्पण द्वारा बने प्रतिबिंब पर इसका क्या प्रभाव पड़ेगा?

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

Reprint 2025-26

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 9.2

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 $$v=\frac{10\times7.5}{-2.5}=-30 \text{ cm}$$

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।

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

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

अथवा $$v=\frac{5\times7.5}{(7.5-5)}=15 \text{ cm}$$

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 9.3

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

$$u=-39 \text{ m}, \quad v=\frac{(-39)\times1}{-39-1}=\frac{39}{40} \text{ m}$$

उदाहरण 9.4

© NCERT not to be republished

Reprint 2025-26

उदाहरण 9.4

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

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

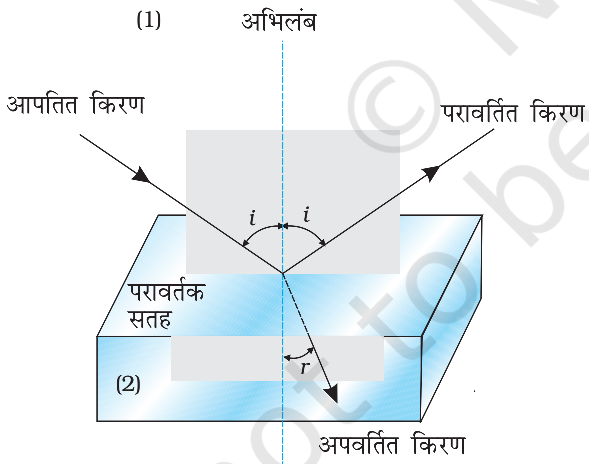
इसलिए जब धावक दर्पण से 39 m तथा 34 m के बीच में है, तो प्रतिबिंब की औसत चाल है (1/280) m s^{-1}
इसी प्रकार यह देखा जा सकता है कि जब u = –29 m, –19 m तथा –9 m है तब जिस चाल से प्रतिबिंब गति करता प्रतीत होगा वह क्रमश:

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

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 (0°< i < 90°) 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।



चित्र 9.8 प्रकाश का अपवर्तन तथा परावर्तन।

(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 क्रमश: अभिलंब के साथ बनाती हैं। अत:

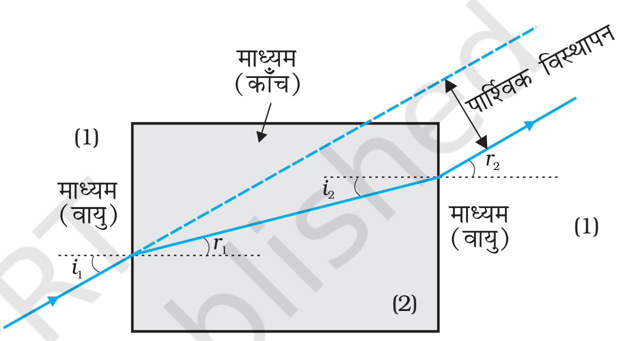
$$\frac{\sin i}{\sin r}=n_{21} \qquad (9.10)$$

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।

© NCERT not to be republished
Reprint 2025-26

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।*



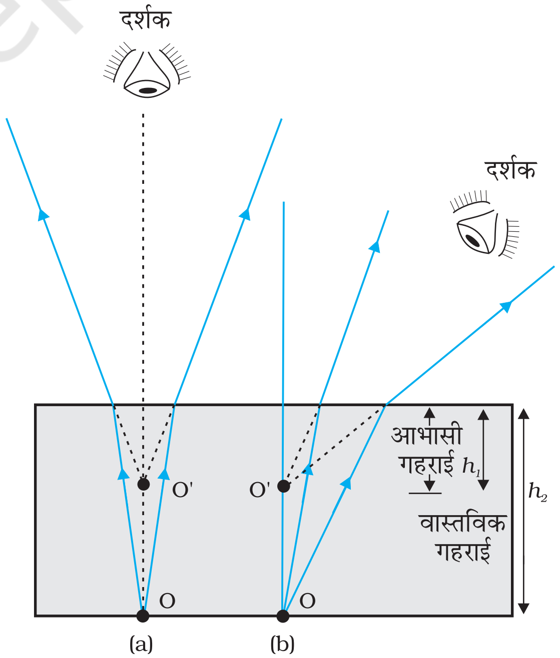
चित्र 9.9 समांतर फलकों के स्लैब से अपवर्तित किसी प्रकाश किरण का पार्श्विक विस्थापन।

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

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

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।

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 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।



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

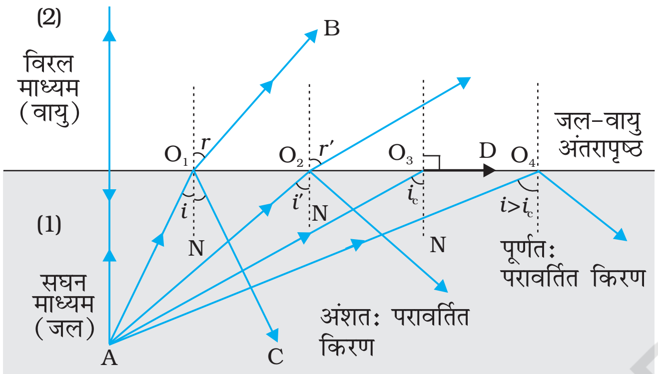
9.4 पूर्ण आंतरिक परावर्तन

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 9.11 में किरण AO_1B आपतित किरण AO_1 अंशतः परावर्तित (O_1C) तथा अंशतः पारगमित अथवा अपवर्तित (O_1B) होती है, तथा

Reprint 2025-26

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 9.11 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 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।



चित्र 9.11 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।

वह आपतन कोण जिसका तद्नुरूपी 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 अपवर्तक माध्यम का आपेक्षिक अपवर्तनांक एक से कम है, तो क्योंकि $\sin r$ का अधिकतम मान एक होता है, अतः $\sin i$ के मान की कोई ऊपरी सीमा है जिस तक यह नियम लागू किया जा सकता है। यह है $i = i_c$ इस प्रकार

$$\sin i_c = n_{21} \tag{9.12}$$

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

सघन माध्यम 1 का विरल माध्यम 2 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

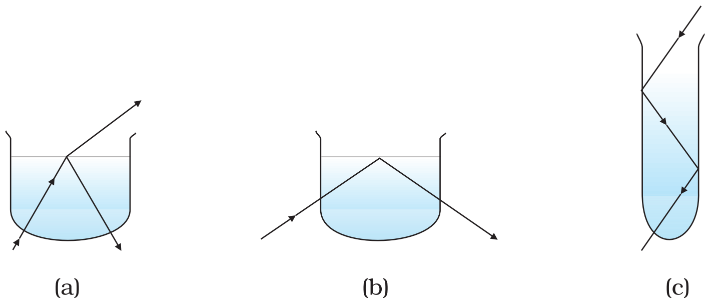
पदार्थ माध्यम	अपवर्तनांक	क्रांतिक कोण
जल	1.33	48.75°
क्राउन काँच	1.52	41.14°
सघन फ्लिंट काँच	1.62	37.31°
हीरा	2.42	24.41°

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। जल में दूध या किसी अन्य निलंबन की कुछ बूँदें मिलाकर हिलाइए जिससे जल 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

© NCERT not to be republished



चित्र 9.12 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)।

में दिखाई देगा) तथा आंशिक अपवर्तन (जो वायु में निकलकर छत पर एक बिंदु के रूप में दिखाई देता है) होता है [चित्र 9.12 (a)] ? अब लेसर किरण-पुंज को बीकर के एक ओर से इस प्रकार डालिए कि यह जल के ऊपरी पृष्ठ पर तिर्यक टकराए [चित्र 9.12 (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।

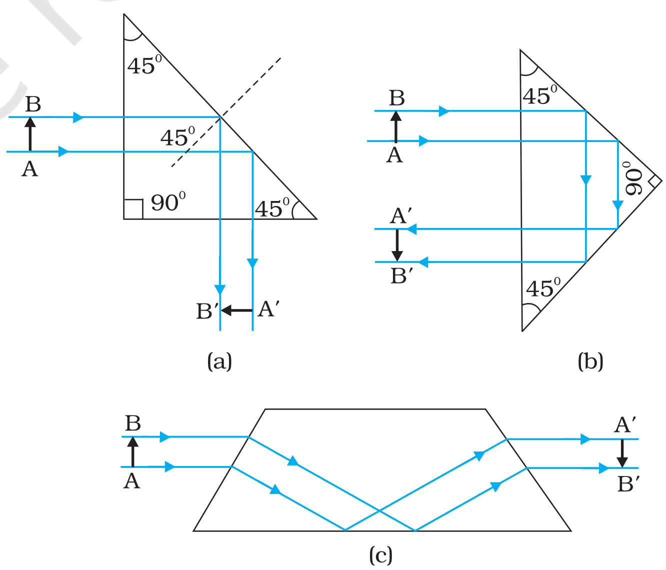
इस जल को एक लंबी परखनली में उलटिए तथा लेसर प्रकाश को इसके ऊपर से डालिए जैसा कि चित्र 9.12 (c) में दर्शाया गया है। लेसर किरण-पुंज की दिशा को इस प्रकार समायोजित कीजिए कि प्रत्येक बार जब यह परखनली की दीवारों से टकराए तो इसका पूर्ण आंतरिक परावर्तन हो। यह दृश्य ऐसा ही है जैसा कि प्रकाशिक तंतुओं में होता है।

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

© NCERT not to be republished

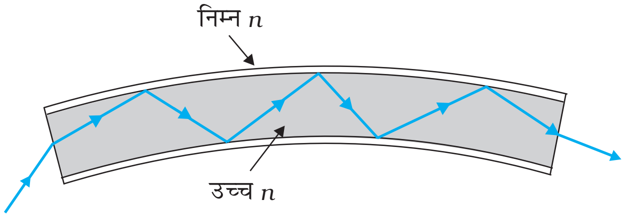
9.4.1 प्रकृति में पूर्ण आंतरिक परावर्तन तथा इसके प्रौद्योगिकीय अनुप्रयोग

(i) *प्रिज़्म* : प्रकाश को 90° अथवा 180° पर मोड़ने के लिए डिज़ाइन किए गए प्रिज़्मों में पूर्ण आंतरिक परावर्तन का उपयोग किया जाता है [चित्र 9.13 (a) तथा (b)]। ऐसे प्रिज़्म को प्रतिबिंब के साइज़ में बिना कोई परिवर्तन किए उलटने के लिए भी प्रयोग किया जाता है [चित्र 9.13 (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।



चित्र 9.13 किरणों को $\pi/2$ तथा π पर मोड़ने के लिए या प्रतिबिंब के साइज़ में परिवर्तन किए बगैर उलटने के लिए डिज़ाइन किए गए प्रिज़्मों में पूर्ण आंतरिक परावर्तन का उपयोग किया जाता है।

(ii) *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।



चित्र 9.14 जब प्रकाश किसी प्रकाशिक तंतु में चलता है तो इसका क्रमिक पूर्ण आंतरिक परावर्तन 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 9.14)। 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।

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

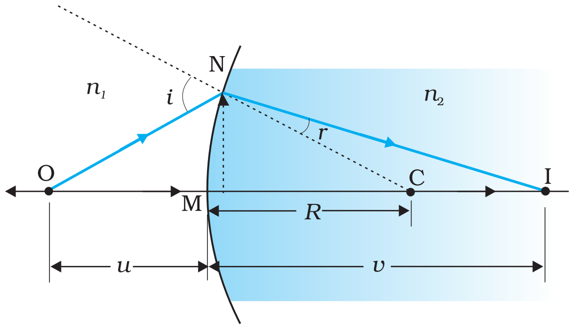
चित्र 9.15 में वक्रता त्रिज्या R तथा वक्रता केंद्र C के गोलीय पृष्ठ के मुख्य अक्ष पर स्थित किसी वस्तु के बिंदु O के प्रतिबिंब I की रचना की ज्यामिति दर्शायी गई है। प्रकाश किरणें n_1 अपवर्तनांक के किसी माध्यम से आपतित होकर n_2 अपवर्तनांक के किसी अन्य माध्यम में जाती हैं। पहले की भाँति, हम पृष्ठ का द्वारक (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

Reprint 2025-26

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

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

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



चित्र 9.15 दो माध्यमों को पृथक करने वाले किसी गोलीय पृष्ठ पर अपवर्तन।

अब ΔNOC के लिए, i बहिर्कोण है। अत:

$$i = \angle NOM + \angle NCM$$

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

इसी प्रकार

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

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

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

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

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

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

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

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

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 9.5 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

उदाहरण 9.5

Reprint 2025-26

उदाहरण 9.5

हमें प्राप्त होता है

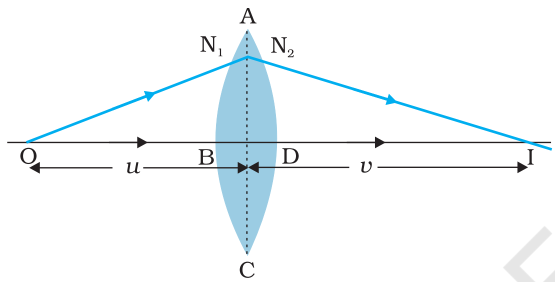
$$\frac{1.5}{v}+\frac{1}{100}=\frac{0.5}{20}$$

अथवा $v = +100$ cm

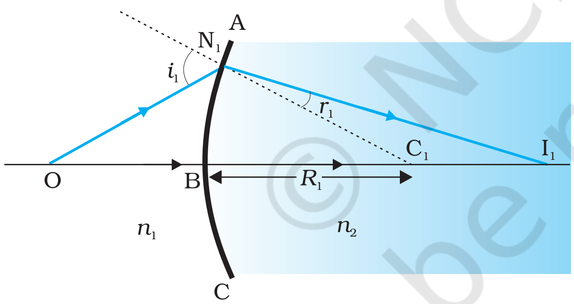
प्रतिबिंब आपतित प्रकाश की दिशा में काँच के पृष्ठ से 100 cm की दूरी पर बनेगा।

9.5.2 किसी लेंस द्वारा अपवर्तन

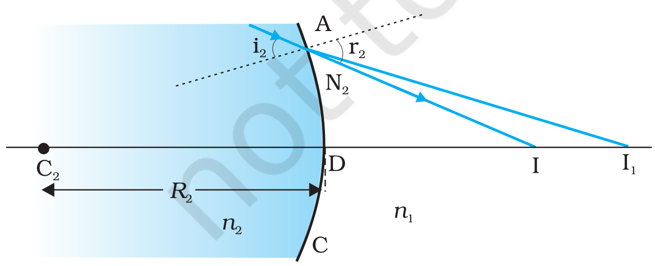
चित्र 9.16 (a) में किसी उभयोत्तल लेंस द्वारा प्रतिबिंब-रचना की ज्यामिति दर्शायी गई है। इस प्रतिबिंब की रचना को दो चरणों में देखा जा सकता है : (i) पहला अपवर्ती पृष्ठ बिंब O का प्रतिबिंब I_1 बनाता है [चित्र 9.16 (b)]। प्रतिबिंब I_1 दूसरे पृष्ठ द्वारा प्रतिबिंब I बनने के लिए आभासी बिंब की भाँति कार्य करता है [चित्र 9.16 (c)]। समीकरण (9.15) का उपयोग पहले अंतरापृष्ठ ABC पर करने पर हमें प्राप्त होता है :



(a)



(b)



(c)

चित्र 9.16 (a) बिंब की स्थिति तथा उभयोत्तल लेंस द्वारा निर्मित प्रतिबिंब (b) पहले गोलीय पृष्ठ पर अपवर्तन (c) दूसरे गोलीय पृष्ठ पर अपवर्तन।

$$\frac{n_1}{OB}+\frac{n_2}{BI_1}=\frac{n_2-n_1}{BC_1} \qquad (9.17)$$

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

$$-\frac{n_2}{DI_1}+\frac{n_1}{DI}=\frac{n_2-n_1}{DC_2} \qquad (9.18)$$

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 9.16(b)]

$DC_2 = -R_2$ [चित्र 9.16(c)]

इसलिए समीकरण (9.20) को लिखा जा सकता है :

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

* 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।

© NCERT not to be republished

Reprint 2025-26

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 :

$$\frac{n_1}{OB}+\frac{n_1}{DI} = \frac{n_1}{f} \tag{9.22}$$

पुन: 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

$$\frac{1}{v}-\frac{1}{u}=\frac{1}{f} \tag{9.23}$$

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।

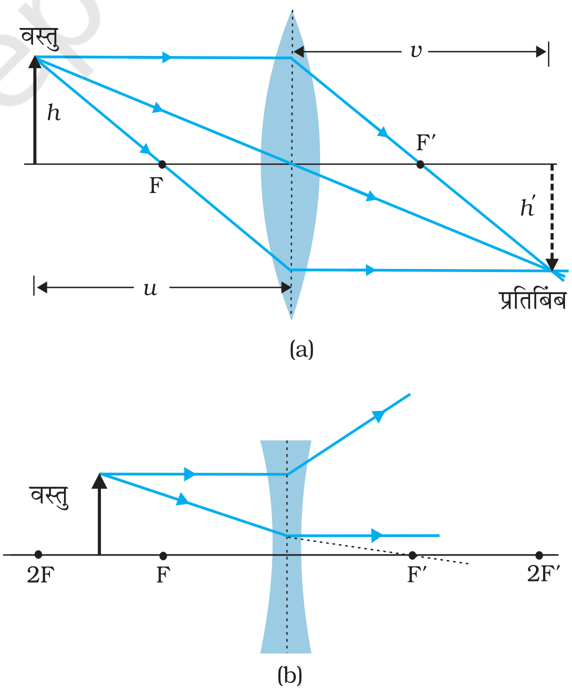
लेंसों द्वारा बने किसी बिंब के प्रतिबिंब की स्थिति ज्ञात करने के लिए सिद्धांत रूप में हम बिंब के किसी बिंदु से आने वाली कोई भी दो किरणें लेकर तथा अपवर्तन के नियमों द्वारा उनके पथ अनुरेखित करके उस बिंदु की स्थिति ज्ञात करते हैं, जहाँ अपवर्तित किरणें वास्तव में मिलती हैं (अथवा मिलती प्रतीत होती हैं)। तथापि, 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 पश्चात् बिना किसी विचलन के निर्गत होती है।

(iii) (a) किसी उत्तल लेंस के प्रथम मुख्य फ़ोकस से होकर गुज़रने वाली कोई प्रकाश की किरण अपवर्तन के पश्चात् मुख्य अक्ष के समांतर गमन करती है। [चित्र 9.17(a)]

(b) किसी अवतल लेंस पर उसके द्वितीय फ़ोकस बिंदु की ओर आती प्रतीत होती हुई कोई प्रकाश की किरण अपवर्तन के पश्चात् मुख्य अक्ष के समांतर गमन करती है। [चित्र 9.17(b)]



चित्र 9.17 (a) उत्तल लेंस, (b) अवतल लेंस से गुज़रने वाली प्रकाश किरणों का अनुरेखण।

चित्र 9.17 (a) तथा (b) में इन नियमों को क्रमश: 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।

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

Reprint 2025-26

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

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 9.6

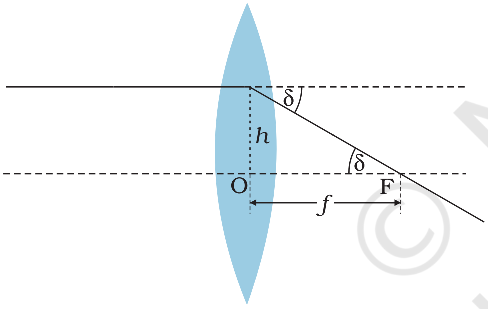
उदाहरण 9.6 कोई जादूगर खेल दिखाते समय $n = 1.47$ अपवर्तनांक के काँच के लेंस को किसी द्रव से भरी द्रोणिका में डालकर अदृश्य कर देता है। द्रव का अपवर्तनांक क्या है? क्या यह द्रव जल हो सकता है?

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।

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, 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 मुख्य अक्ष के समांतर प्रकाश पुंज को जो प्रकाशिक केंद्र से एकांक दूरी पर आकर गिरता है, अभिसरित या अपसरित करता है। (चित्र 9.18)।



चित्र 9.18 किसी लेंस की क्षमता।

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

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

$$\text{अतः}\ \ P = \frac{1}{f} \quad (9.25)$$

लेंस की क्षमता का SI मात्रक डाइऑप्टर (D) : $1D = 1m^{-1}$ है। अतः 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 9.7

उदाहरण 9.7 (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

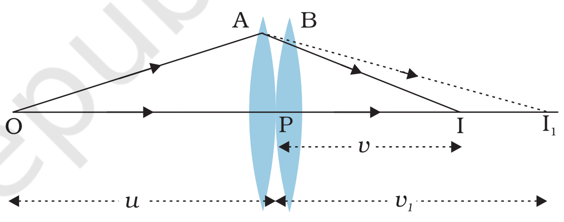
$$\frac{1.33}{f}=(1.5-1.33)\left[\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right] \qquad (9.26)$$

इन दोनों समीकरणों को संयोजित करने पर हमें मिलेगा
f = + 78.2 cm

उदाहरण 9.7

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 9.19)। पहला लेंस बिंदु I_1 पर प्रतिबिंब बनाता है। क्योंकि प्रतिबिंब I_1 वास्तविक है, अतः 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 9.19 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,

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

Reprint 2025-26

© NCERT not to be republished

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,..) के गुणनफल के बराबर होता है।

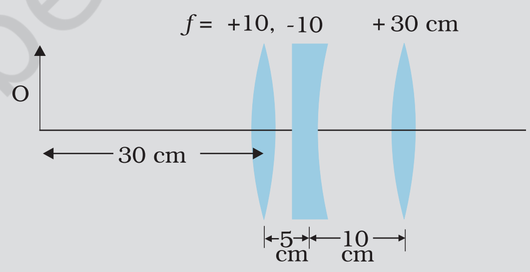
$$m = m_1\, m_2\, m_3\ \ldots \qquad (9.33)$$

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

© NCERT not to be republished

उदाहरण 9.8

उदाहरण 9.8 चित्र 9.20 में दिए गए लेंसों के संयोजन द्वारा निर्मित प्रतिबिंब की स्थिति ज्ञात कीजिए।



चित्र 9.20

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

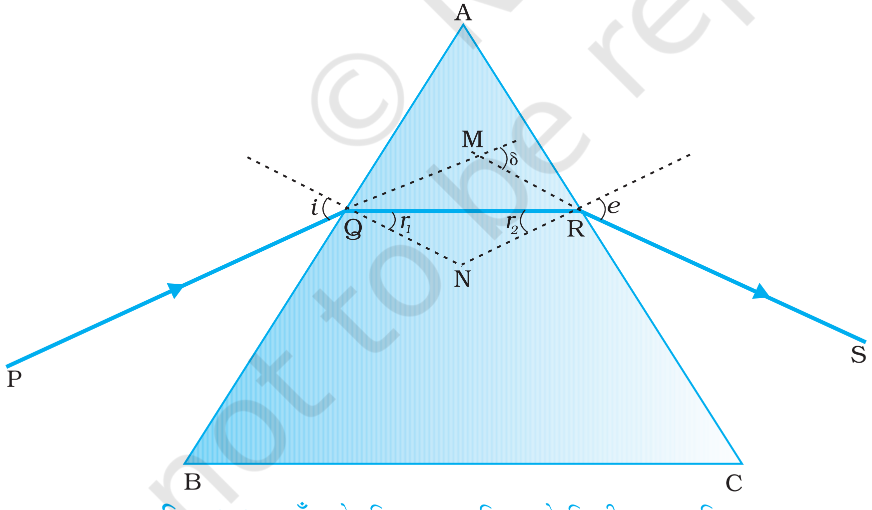
या v_3 = 30 cm

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

उदाहरण 9.8

9.6 प्रिज़्म में अपवर्तन

चित्र 9.21 में किसी प्रिज़्म ABC से प्रकाश किरण को गुज़रते हुए दर्शाया गया है। पहले फलक AB पर आपतन कोण तथा अपवर्तन कोण क्रमशः 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।



चित्र 9.21 काँच के त्रिभुजाकार प्रिज़्म से किसी प्रकाश किरण का गुज़रना।

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

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

त्रिभुज QNR से

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

Reprint 2025-26

© NCERT not to be republished

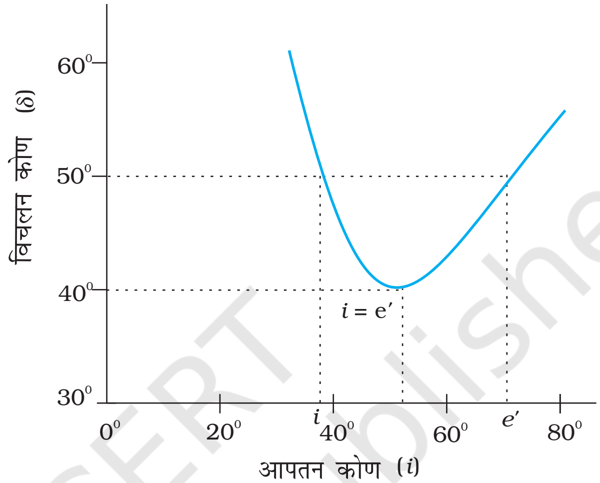
इन दोनों समीकरणों की तुलना करने पर, हमें प्राप्त होगा

$r_1 + r_2 = A$ (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)



चित्र 9.22 किसी त्रिभुजाकार प्रिज़्म के लिए आपतन कोण (i) तथा विचलन कोण (δ) के बीच एक ग्राफ़।

इस प्रकार विचलन कोण आपतन कोण पर निर्भर करता है। चित्र 9.22 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 9.21 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

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

इसी प्रकार समीकरण (9.35) से हमें प्राप्त होता है

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

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

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

Reprint 2025-26

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।

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 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। कक्षा X में हम मानव नेत्र के बारे में पढ़ चुके हैं। अब हम सूक्ष्मदर्शी तथा दूरबीन के कार्य करने के सिद्धांत का वर्णन करेंगे।

9.7.1 सूक्ष्मदर्शी

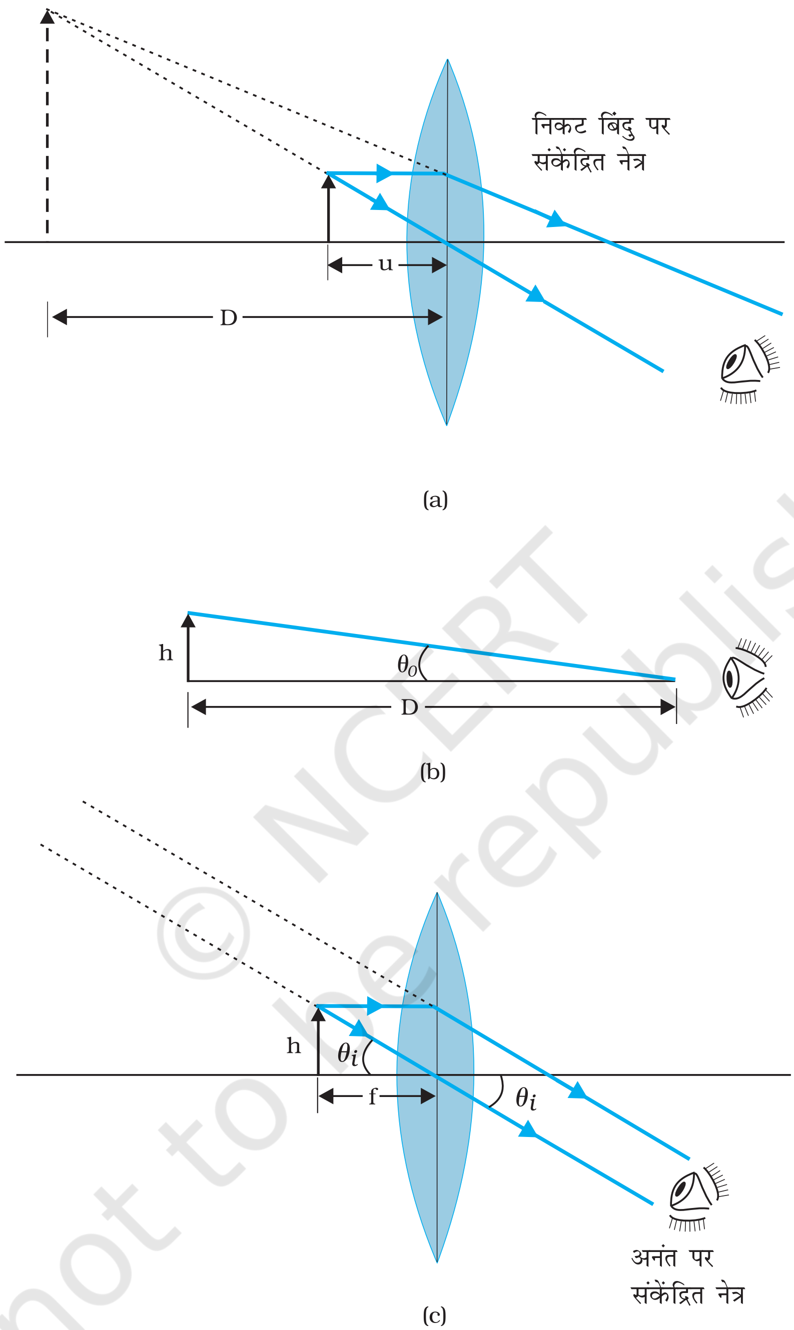
सरल आवर्धक अथवा सरल सूक्ष्मदर्शी कम फ़ोकस दूरी का एक अभिसारी लेंस होता है (चित्र 9.23)। इस प्रकार के लेंस को सूक्ष्मदर्शी के रूप में प्रयोग करने के लिए, लेंस को बिंब के निकट उससे एक फ़ोकस दूरी अथवा उससे कम दूरी पर रखा जाता है तथा लेंस के दूसरी ओर नेत्र को लेंस से सटाकर रखा जाता है। ऐसा करने का लक्ष्य 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 9.23 (a), में तथा दूसरी चित्र 9.23 (b) तथा (c) में।

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

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

Reprint 2025-26

© NCERT not to be republished



चित्र 9.23 सरल सूक्ष्मदर्शी (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।

© NCERT not to be republished

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

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

क्योंकि D लगभग 25 cm है। अत: 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

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

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

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

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

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

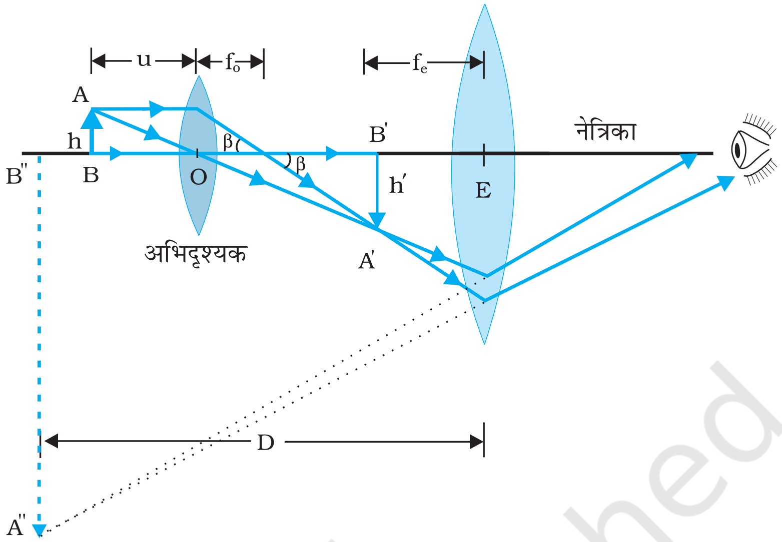
जैसा कि चित्र 9.23 (c) से स्पष्ट है। अत: कोणीय आवर्धन (आवर्धन क्षमता) है

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

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 9.24 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

© NCERT not to be republished



चित्र 9.24 संयुक्त सूक्ष्मदर्शी द्वारा प्रतिबिंब बनने का किरण आरेख।

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।

अब हम संयुक्त सूक्ष्मदर्शी के कारण आवर्धन प्राप्त करेंगे। चित्र 9.24 का किरण आरेख यह दर्शाता है कि अभिदृश्यक के कारण (रैखिक) आवर्धन, अर्थात h'/h, बराबर है

$$m_0 = \frac{h'}{h} = \frac{L}{f_0} \qquad (9.43)$$

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

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

Reprint 2025-26

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

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

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

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

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

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

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

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।

9.7.2 दूरदर्शक

दूरदर्शक अथवा दूरबीन (चित्र 9.25) 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। अतः

$$m \approx \frac{\beta}{\alpha} \approx \frac{h}{f_e} \cdot \frac{f_0}{h} = \frac{f_0}{f_e} \tag{9.46}$$

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 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

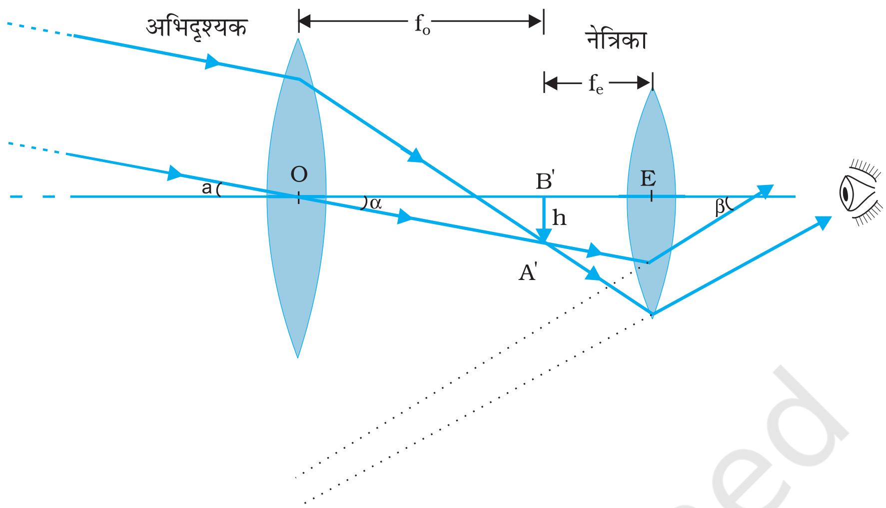
m = 100/1 = 100

भौतिकी

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

© NCERT not to be republished

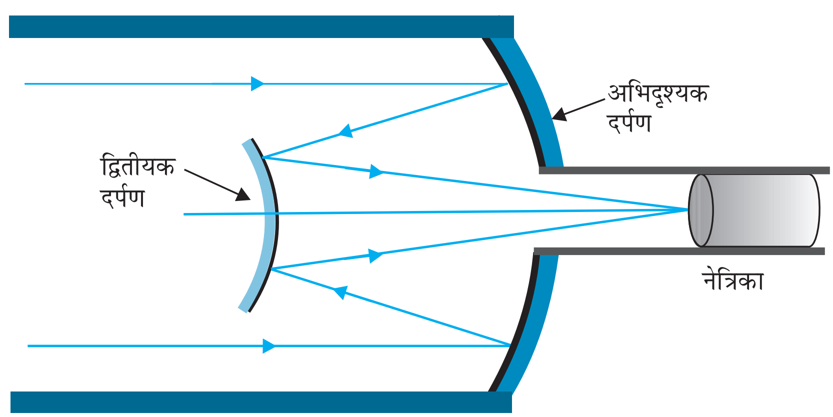
Reprint 2025-26



चित्र 9.25 परावर्ती दूरदर्शक (कैसेग्रेन) का व्यवस्था आरेख

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 $100 \times 1' = 100' = 1.67°$ 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 महँगा कार्य है।



चित्र 9.26 परावर्ती दूरदर्शक (कैसेग्रेन) का व्यवस्था आरेख।

Reprint 2025-26

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। दर्पण में कोई वर्ण विपथन नहीं होता। 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। अतः 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 9.26 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 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

Reprint 2025-26

© NCERT not to be republished

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।

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

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; $1\ \text{D} = 1\ \text{m}^{-1}$।

यदि $f_1, f_2, f_3,$... 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।

Reprint 2025-26

8. 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। सन्निकटत:

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

यहाँ f_0 तथा f_e क्रमश: अभिदृश्यक तथा नेत्रिका की फ़ोकस दूरियाँ हैं तथा L इन दोनों के फ़ोकस बिंदुओं के बीच की दूरी है।

9. *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 क्रमश: 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।

© NCERT not to be republished

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।

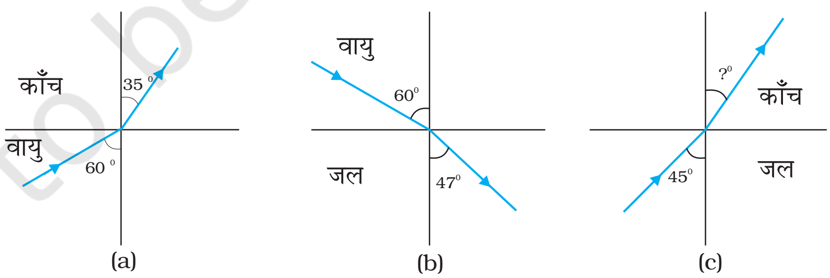
अभ्यास

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 9.27 (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 आपतित किरण का अपवर्तन कोण ज्ञात कीजिए, जो जल में जल-काँच अंतरापृष्ठ के अभिलंब से 45° का कोण बनाती है [चित्र 9.27 (c)]।



चित्र 9.27

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।

Reprint 2025-26

© NCERT not to be republished

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।)

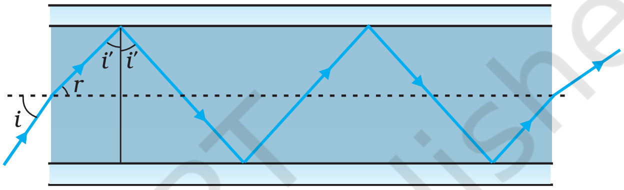
© NCERT not to be republished

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 9.28 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 9.28

9.18 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?

9.19 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।

9.20 (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।

9.21 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।

9.22 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।

© NCERT not to be republished

9.23 (a) अभ्यास 9.22 में लेंस को कार्ड शीट 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।

9.24 अभ्यास 9.23 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 9.22 से 9.24 आपको निरपेक्ष साइज़ में आवर्धन तथा किसी यंत्र की आवर्धन क्षमता (कोणीय आवर्धन) के बीच अंतर को स्पष्टतः समझने में सहायता करेंगे।]

9.25 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?

9.26 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?

9.27 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।

9.28 (a) अभ्यास 9.27(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?

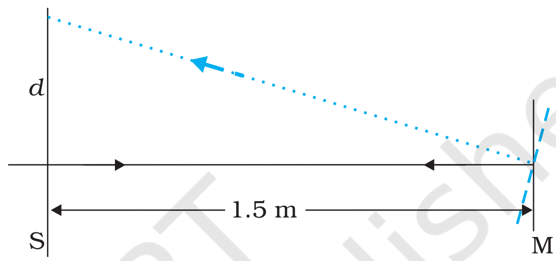
(c) यदि अंतिम प्रतिबिंब 25 cm दूर बनता है तो अंतिम प्रतिबिंब में मीनार की ऊँचाई क्या है?

Reprint 2025-26

© NCERT not to be republished

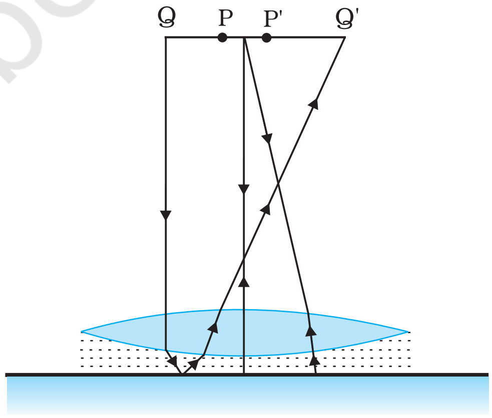
9.29 किसी कैसेग्रेन दूरबीन में चित्र 9.26 में दर्शाए अनुसार दो दर्पणों का प्रयोग किया गया है। इस दूरबीन में दोनों दर्पण एक-दूसरे से 20 mm दूर रखे गए हैं। यदि बड़े दर्पण की वक्रता त्रिज्या 220 mm हो तथा छोटे दर्पण की वक्रता त्रिज्या 140 mm हो तो अनंत पर रखे किसी बिंब का अंतिम प्रतिबिंब कहाँ बनेगा?

9.30 किसी गैल्वेनोमीटर की कुंडली से जुड़े समतल दर्पण पर लंबवत आपतित प्रकाश (चित्र 9.29), दर्पण से टकराकर अपना पथ पुनः 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 9.29

9.31 चित्र 9.30 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 9.30

© NCERT not to be republished

12092CH10

अध्याय 10

तरंग–प्रकाशिकी

© NCERT not to be republished

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 प्राय: 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 $0.6\mu m$ 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।

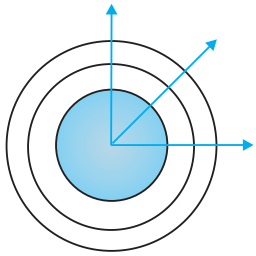
इस अध्याय में हम सर्वप्रथम *हाइगेंस के सिद्धांत* के मूल प्रतिपादन पर विचार-विमर्श करेंगे एवं परावर्तन तथा अपवर्तन के नियमों को व्युत्पन्न करेंगे। अनुच्छेद 10.4 तथा 10.5 में हम व्यतिकरण की परिघटना का वर्णन करेंगे जो अध्यारोपण के सिद्धांत पर आधारित है। अनुच्छेद 10.6 में हम विवर्तन की परिघटना पर विचार करेंगे 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।

Reprint 2025-26

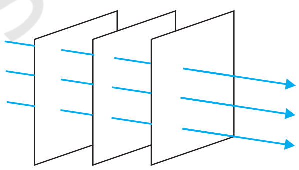
10.2 हाइगेंस का सिद्धांत

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। स्पष्टत: 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। अत: 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।



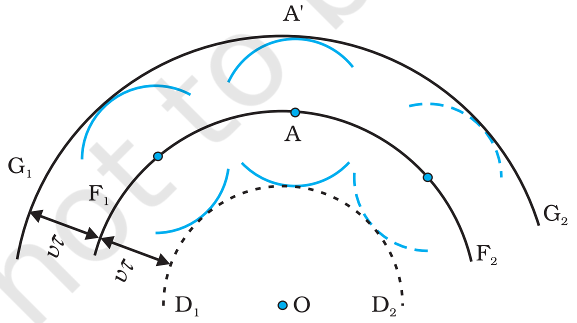
चित्र 10.1 (a) एक बिंदु-स्रोत से निर्गमन होती एक अपसरित गोलीय तरंग। तरंगाग्र गोलीय है।

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



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

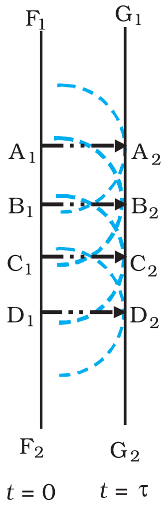
अब यदि हमें $t = 0$ पर किसी तरंगाग्र की आकृति ज्ञात है तो हाइगेंस के सिद्धांत द्वारा हम किसी बाद के समय τ पर तरंगाग्र की आकृति ज्ञात कर सकते हैं। अत: हाइगेंस का सिद्धांत वास्तव में एक ज्यामितीय रचना है जो किसी समय यदि तरंगाग्र की आकृति दी हुई हो तो किसी बाद के समय पर हम तरंगाग्र की आकृति ज्ञात कर सकते 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।

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

Reprint 2025-26



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।

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 पुनः 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।

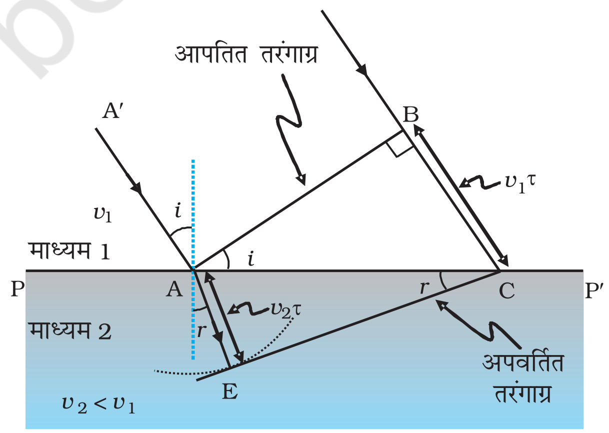
इसी विधि द्वारा हम हाइगेंस के सिद्धांत का उपयोग किसी माध्यम में संचरित होने वाली समतल तरंग के तरंगाग्र की आकृति ज्ञात करने के लिए कर सकते हैं (चित्र 10.3)।

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। अत:

$$BC = v_1 \tau$$



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, अत: अपवर्तित तरंगें अभिलंब की ओर मुड़ती हैं।

© NCERT not to be republished

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

$$\sin i = \frac{BC}{AC} = \frac{v_1\tau}{AC} \tag{10.1}$$

और

$$\sin r = \frac{AE}{AC} = \frac{v_2\tau}{AC} \tag{10.2}$$

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

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} \tag{10.3}$$

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,

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \tag{10.4}$$

तथा

$$n_2 = \frac{c}{v_2} \tag{10.5}$$

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

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)

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r \tag{10.6}$$

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 श्रृंग B से C तक τ समय में पहुँचता है तो वह श्रृंग A से E तक भी τ समय में ही पहुँचेगा); अतः

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

अथवा

$$\frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2} \tag{10.7}$$

© NCERT not to be republished

Reprint 2025-26

उपरोक्त समीकरण में अंतर्निहित है कि जब तरंग सघन माध्यम में अपवर्तित होती है ($\upsilon_1 > \upsilon_2$), तो तरंगदैर्घ्य तथा संचरण की चाल कम हो जाती है, लेकिन *आवृत्ति* ν ($= \upsilon/\lambda$) *उतनी ही रहती है।*

10.3.2 विरल माध्यम पर अपवर्तन

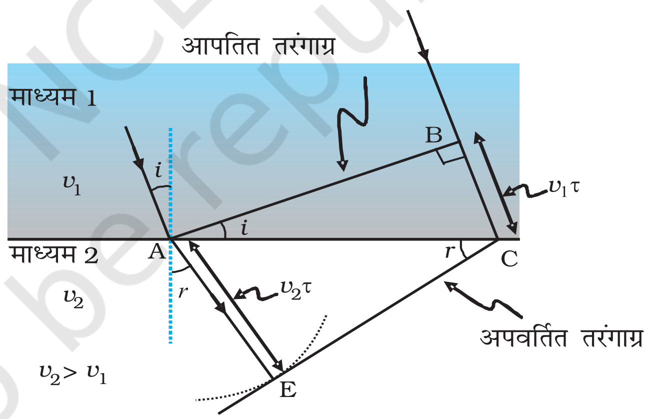
आइए, एक समतल तरंग के विरल माध्यम में होने वाले अपवर्तन पर विचार करें, अर्थात $\upsilon_2 > \upsilon_1$। पहले की भाँति ही कार्यवाही करते हुए हम चित्र 10.5 में दर्शाए अनुसार अपवर्तित तरंगाग्र का निर्माण कर सकते हैं। अब अपवर्तन कोण आपतन कोण से बड़ा होगा; तथापि इस बार भी $n_1 \sin i = n_2 \sin r$ । हम एक कोण i_c को निम्न समीकरण द्वारा परिभाषित कर सकते हैं

$$\sin i_c = \frac{n_2}{n_1} \tag{10.8}$$

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।

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 υ 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

$$BC = \upsilon\tau$$

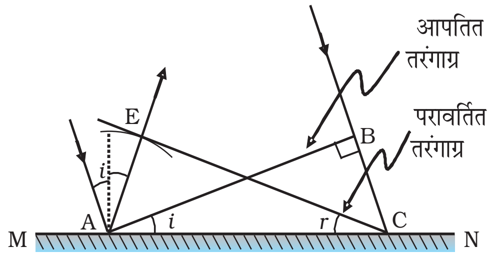
परावर्तित तरंगाग्र का निर्माण करने के लिए हम बिंदु A से त्रिज्या $\upsilon\tau$ का गोला खींचते हैं (चित्र 10.6)। मान लीजिए CE इस गोले पर बिंदु C से खींची गई स्पर्शी समतल को निरूपित करती है। स्पष्टतया

$$AE = BC = \upsilon\tau$$

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।

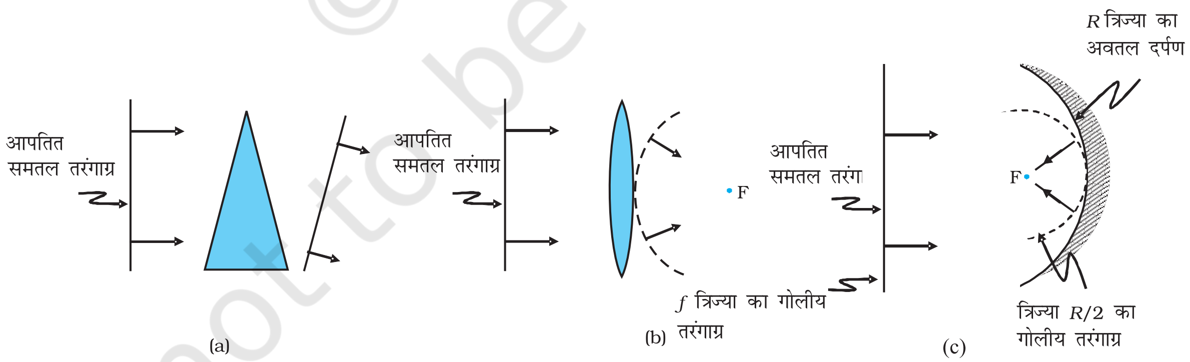
व्यतिकरण, विवर्तन, अपवर्तन, अनुनाद तथा डॉप्लर प्रभाव का प्रदर्शन
http://www.falstad.com/ripple/

Reprint 2025-26



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।



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।

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, 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।

Reprint 2025-26

उदाहरण 10.1

(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?

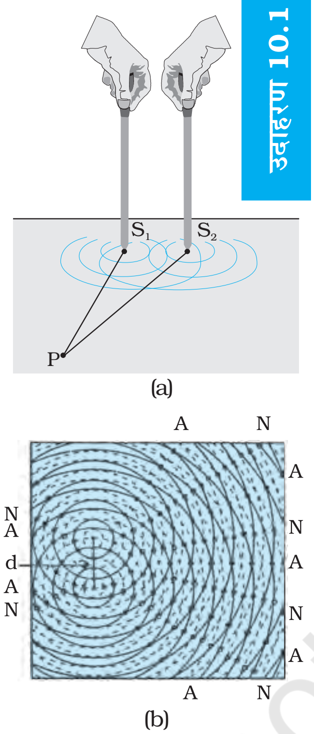
हल

(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 (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।

उदाहरण 10.1



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।

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 14 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 श्रृंग (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

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

© NCERT not to be republished

Reprint 2025-26

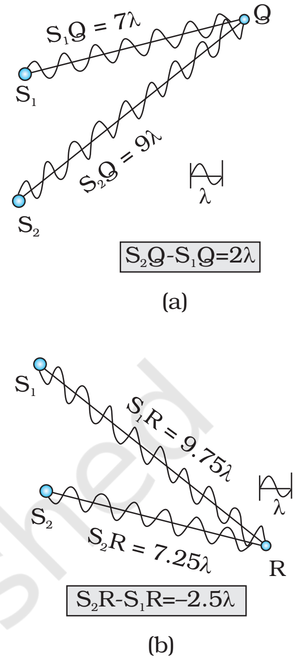
द्वारा प्रदर्शित होगा। अतः परिणामी विस्थापन होगा

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

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_1S_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



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 λ है ।

$S_2Q - S_1Q = 2\lambda$

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

$S_2R - S_1R = -2.5\lambda$

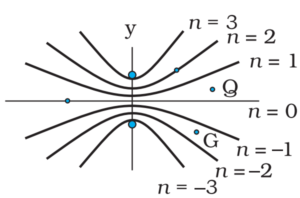
S_1 से निर्गमित तरंगें स्रोत S_2 से आने वाली तरंगों की अपेक्षा 2.5 चक्र बाद पहुँचती हैं [चित्र 10.10(b)]। अतः यदि स्रोत S_1 द्वारा उत्पन्न विस्थापन का मान है

$y_1 = a \cos \omega t$

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।



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

सारांशतः 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

$$S_1P \sim S_2P = n\lambda \quad (n = 0, 1, 2, 3,...) \qquad (10.9)$$

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,

$$S_1P \sim S_2P = (n+\frac{1}{2})\ \lambda \quad (n = 0, 1, 2, 3, ...) \qquad (10.10)$$

© NCERT not to be republished

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

$$y_2 = a\cos(\omega t + \phi) \text{ होगा}$$

तथा परिणामी विस्थापन होगा

$$y = y_1 + y_2$$
$$= a\,[\cos \omega t + \cos(\omega t + \phi)]$$
$$= 2\,a\cos(\phi/2)\cos(\omega t + \phi/2) \left[\because \cos A + \cos B = 2\cos\left(\frac{A+B}{2}\right)\cos\left(\frac{A-B}{2}\right)\right]$$

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

$$I = 4\,I_0\cos^2(\phi/2) \qquad (10.11)$$

यदि $\phi = 0, \pm 2\,\pi, \pm 4\,\pi,...$ जो समीकरण (10.9) की शर्त के संगत है, हमें संपोषी व्यतिकरण प्राप्त होगा तथा तीव्रता अधिकतम होगी। दूसरी ओर यदि $\phi = \pm\pi, \pm 3\pi, \pm 5\pi$ ... [जो समीकरण (10.10) 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

$$I = 2\,I_0 \qquad (10.12)$$

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।

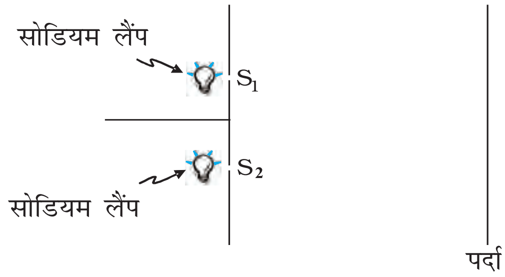
तरंग व्यतिकरण के लिए उर्मिका टैंक प्रयोग
भौतिकी http://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/wave_interference

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।

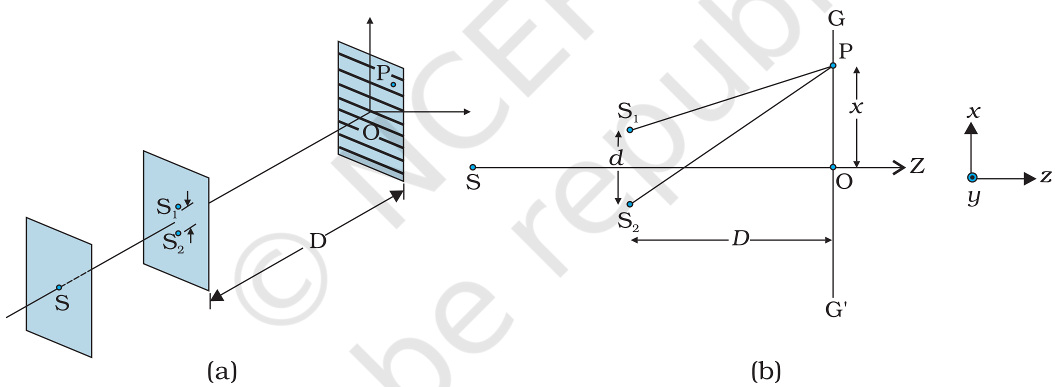
Reprint 2025-26

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 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।



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

हमें संपोषी व्यतिकरण द्वारा दीप्त क्षेत्र प्राप्त होंगे जब $\frac{xd}{D} = n\lambda$, अर्थात

$$x = x_n = \frac{n\lambda D}{d};\ n = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots \qquad (10.13)$$

होगा। दूसरी ओर हमें विनाशी व्यतिकरण द्वारा अदीप्त क्षेत्र प्राप्त होंगे जब

$$\frac{xd}{D} = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda,$$ अर्थात

$$x = x_n = \left(n + \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda D}{d};\ \ n = 0, \pm 1, \pm 2 \qquad (10.14)$$

के निकट अदीप्त क्षेत्र प्राप्त होंगे।

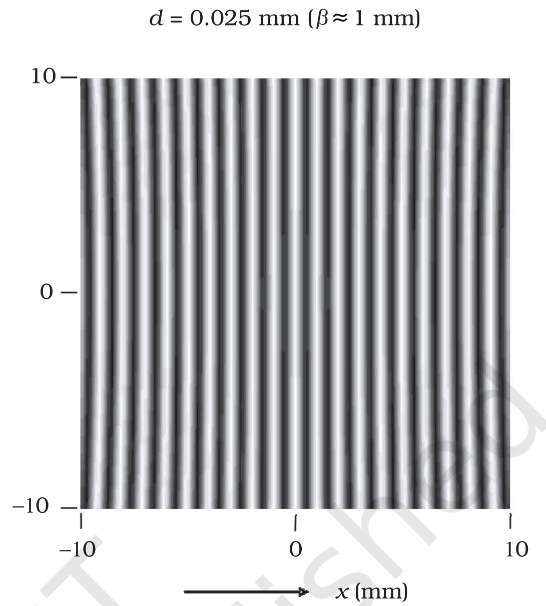
इस प्रकार चित्र 10.13 की भाँति परदे पर अदीप्त तथा दीप्त बैंड दिखलाई देंगे। ऐसे बैंडों को *फ्रिंज* कहते हैं। समीकरण (10.13) तथा (10.14) दर्शाते हैं कि काले तथा दीप्त फ्रिंज समान दूरी पर हैं।

© NCERT not to be republished

Reprint 2025-26

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।



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; d = 0.025 mm के लिए (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।)

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।

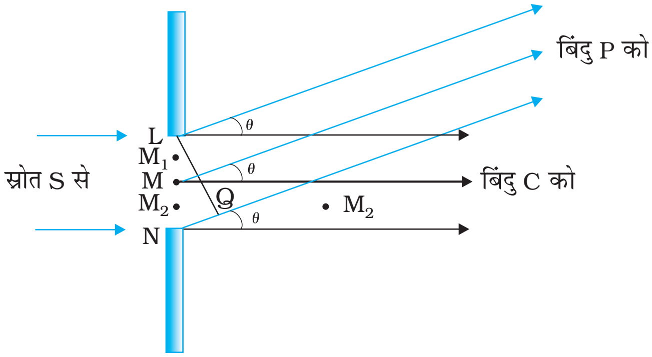
10.6.1 एकल झिरी

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।

© NCERT not to be republished

Reprint 2025-26

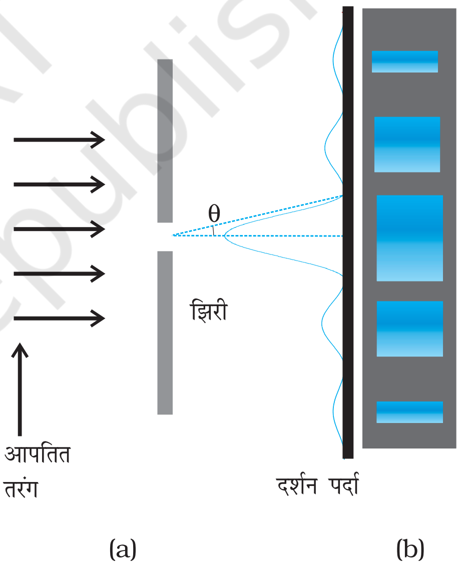
जब यंग के प्रयोग की एकवर्णी स्रोत से प्रकाशित द्विझिरी को एक संकीर्ण एकल झिरी द्वारा प्रतिस्थापित किया जाता है तो एक ब्रॉड (चौड़ा) पैटर्न दिखाई पड़ता है जिसके मध्य में दीप्त क्षेत्र होता है। इसके दोनों ओर क्रमागत दीप्त एवं अदीप्त क्षेत्र होते हैं जिनकी तीव्रता केंद्र से दूर होने पर कम होती जाती है (चित्र 10.15)। इसको समझने के लिए चित्र 10.14 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।



चित्र 10.14 किसी एकल झिरी द्वारा विवर्तन में पथांतर की ज्यामिति।

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 10.14]।

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।



चित्र 10.15 एकल झिरी द्वारा विवर्तन के लिए फ्रिंजों का फ़ोटोग्राफ़ तथा तीव्रता वितरण।

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 जिनकी तीव्रता n का मान बढ़ने पर लगातार कम होती जाती है। निम्निष्ठ (शून्य तीव्रता) $\theta \approx n\lambda/a$, $n = \pm1, \pm2, \pm3, ...$ पर हैं। फ़ोटोग्राफ़ तथा इसके संगत तीव्रता पैटर्न चित्र 10.15 में दर्शाए गए हैं।

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 फ़िज़िक्स* 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।

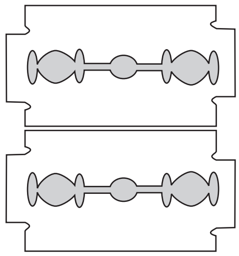
* रिचर्ड फ़ाइनमैन को 1965 का भौतिकी का नोबेल पुरस्कार मिला जो उनके क्वांटम वैद्युतगतिकी के मौलिक कार्य पर दिया गया।

Reprint 2025-26

© NCERT not to be republished

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।

10.6.2 एकल झिरी विवर्तन पैटर्न का अवलोकन



चित्र 10.16 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।

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 10.16)।

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 10.14)। 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 $(1/2)°$ 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।

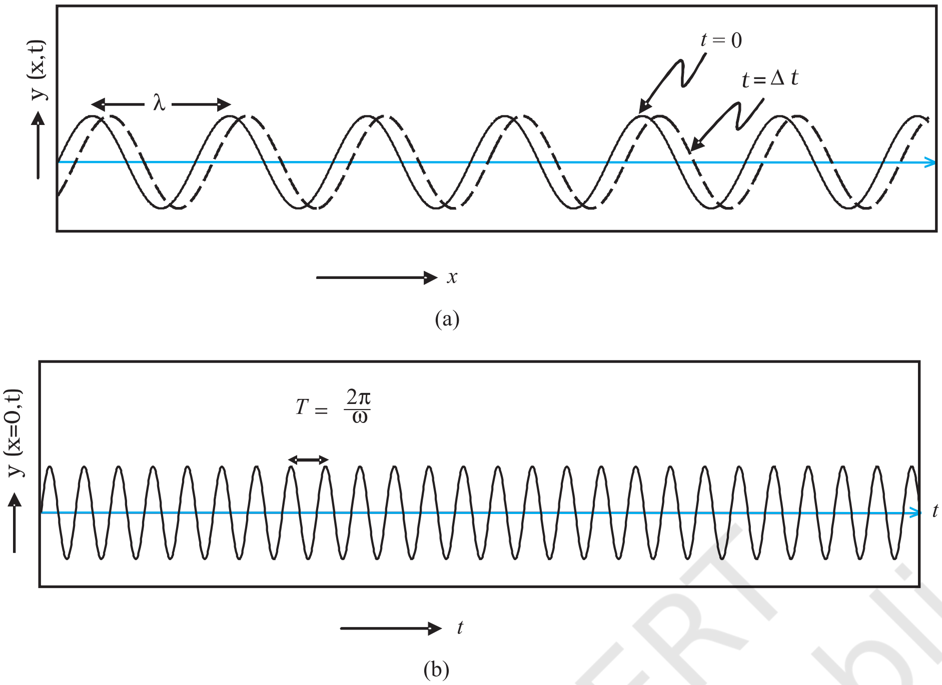
10.7 ध्रुवण

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 10.17)। ऐसी तरंग को समीकरण (10.15) द्वारा व्यक्त किया जा सकता है।

$$y(x,t) = a\sin(kx - \omega t) \tag{10.15}$$

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

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \tag{10.16}$$



चित्र 10.17 (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।

तरंग से संबद्ध तरंगदैर्घ्य को निरूपित करता है। इस प्रकार की तरंगों के संचरण की चर्चा हम कक्षा 11 की पाठ्यपुस्तक के अध्याय 14 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

$$z(x,t) = a\sin(kx - \omega t) \tag{10.17}$$

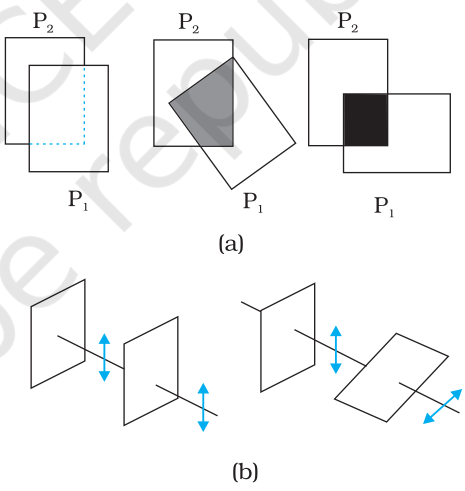
यह बतलाना आवश्यक है कि [समीकरणों (10.15) तथा (10.17) से वर्णित] सभी रैखिकतः ध्रुवित तरंगें अनुप्रस्थ तरंगें होती हैं; अर्थात डोरी के प्रत्येक बिंदु का विस्थापन सदैव तरंग संचरण की दिशा के लंबवत होता है। अंततः, यदि डोरी के कंपन के तल को अत्यंत अल्प अंतराल में यादृच्छिकतः बदला जाए तो हमें *अध्रुवित तरंग* 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।

© NCERT not to be republished

Reprint 2025-26

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 10.18)।



चित्र 10.18 (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 :

$$I = I_0 \cos^2\theta \qquad (10.18)$$

Reprint 2025-26

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 10.2 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,

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

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।

उदाहरण 10.2

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 व्यतिकरण फ्रिंजें प्राप्त होती हैं।
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।
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।

© NCERT not to be republished

Reprint 2025-26

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. 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 तरंगदैर्घ्य द्वारा निर्धारित होती हैं।
4. अधिकांश व्यतिकरण तथा विवर्तन प्रभाव अनुदैर्घ्य तरंगों, जैसे वायु में ध्वनि के लिए भी होते हैं। परंतु ध्रुवण परिघटना केवल अनुप्रस्थ तरंगों, जैसे प्रकाश तरंगों की, विशिष्टता है।

© NCERT not to be republished

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?

Reprint 2025-26

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।

© NCERT not to be republished

Reprint 2025-26

अध्याय 11

विकिरण तथा द्रव्य की द्वैत प्रकृति

12092CH11

© NCERT not to be republished

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 $(3 \times 10^8 \, m/s)$ 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 सामान्यतः 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। अतः 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। अतः $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19}$ 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।

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।

(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।

Reprint 2025-26

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।

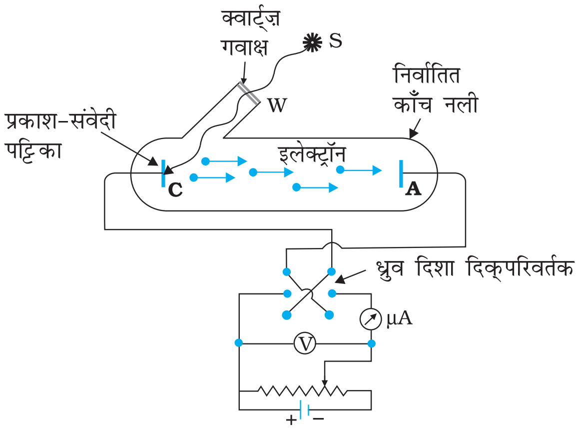
1897 में इलेक्ट्रॉन की खोज के पश्चात यह निश्चित हो गया कि उत्सर्जक पट्टिका से इलेक्ट्रॉनों के उत्सर्जन का कारक आपतित प्रकाश है। ऋण आवेश के कारण उत्सर्जित इलेक्ट्रॉन विद्युत क्षेत्र द्वारा संग्राहक पट्टिका की ओर धकेले जाते हैं। हालवॉक्स तथा लीनार्ड ने यह भी प्रेक्षित किया कि जब उत्सर्जक पट्टिका पर एक 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।

Reprint 2025-26

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 पतली 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। 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।



चित्र 11.1 प्रकाश-विद्युत प्रभाव के अध्ययन के लिए प्रायोगिक व्यवस्था।

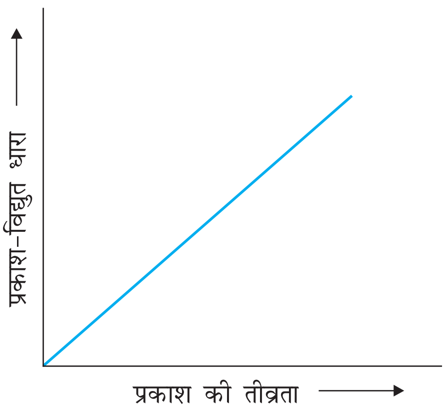
हम चित्र 11.1 की प्रायोगिक व्यवस्था का उपयोग प्रकाशिक धारा के (a) विकिरण की तीव्रता, (b) आपतित विकिरण की आवृत्ति, (c) पट्टिकाओं A तथा C के बीच के विभवांतर, तथा (d) पट्टिका C के पदार्थ की प्रकृति के साथ परिवर्तन के अध्ययन के लिए कर सकते हैं। उत्सर्जक C पर पड़ने वाले प्रकाश के मार्ग में उपयुक्त फिल्टर 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।

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 विभव को स्थिर

Reprint 2025-26

© NCERT not to be republished

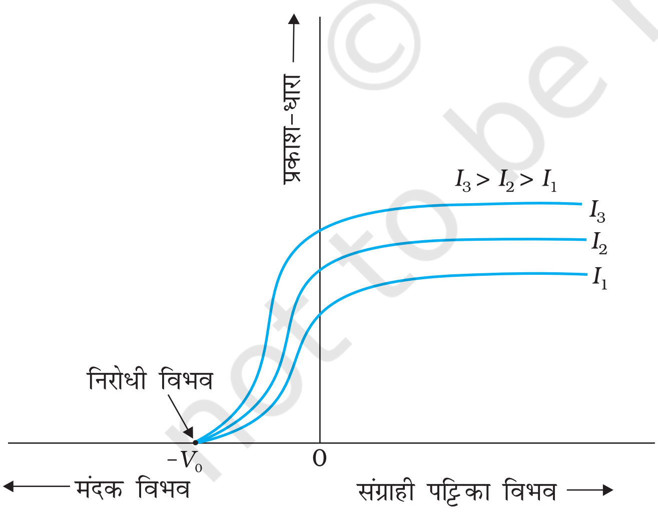


चित्र 11.2 प्रकाश-विद्युत धारा और प्रकाश की तीव्रता के बीच ग्राफ।

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 रैखिकत: 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, अत: *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 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 धन (त्वरक) 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।



चित्र 11.3 आपतित विकिरण की विभिन्न तीव्रताओं के लिए प्रकाशिक-धारा तथा पट्टिका विभव के बीच आलेख।

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 पर्याप्त 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।*

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

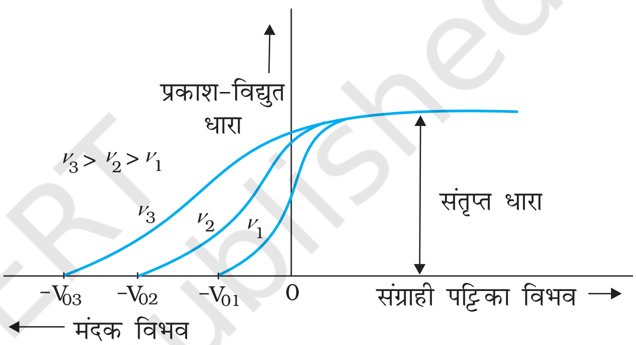
$$K_{\text{उच्च}} = e V_0 \quad (11.1)$$

Reprint 2025-26

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 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।



चित्र 11.4 आपतित विकिरण की विभिन्न आवृत्तियों के लिए पट्टिका विभव तथा प्रकाश-विद्युत धारा के बीच आलेख।

ग्राफ़ यह दर्शाता है कि

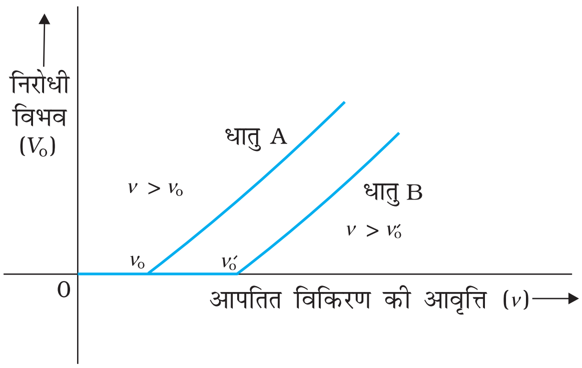
(i) निरोधी विभव V_0 एक दिए हुए प्रकाश-संवेदी पदार्थ के लिए, आपतित विकिरण की आवृत्ति के साथ रैखिकत: परिवर्तित होता है।

(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)।*



चित्र 11.5 एक दिए हुए प्रकाश संवेदी पदार्थ के लिए आपतित विकिरण की आवृत्ति ν के साथ निरोधी विभव V_0 का परिवर्तन।

Reprint 2025-26

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

Reprint 2025-26

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 के लिए निम्नतम आवश्यक ऊर्जा से अधिक होता है (कार्य-फलन, ϕ_0) तब उत्सर्जित इलेक्ट्रॉन की अधिकतम गतिज ऊर्जा होगी :

$$K_{\text{उच्च}} = h\nu - \phi_0 \tag{11.2}$$

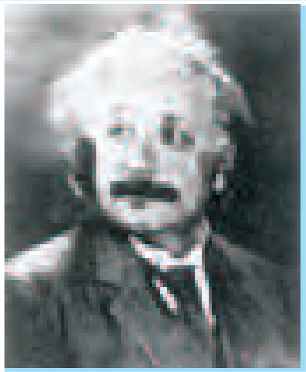
अधिक दृढ़ता से आबद्ध इलेक्ट्रॉनों के उत्सर्जित होने पर उनकी गतिज ऊर्जा अपने अधिकतम मान से कम होती है। ध्यान दें कि किसी आवृत्ति के प्रकाश की तीव्रता, प्रति सेकंड आपतित फ़ोटॉनों की संख्या द्वारा निर्धारित होती है। तीव्रता बढ़ाने पर प्रति सेकंड उत्सर्जित इलेक्ट्रॉनों की संख्या बढ़ती है। तथापि, उत्सर्जित 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।

Reprint 2025-26

© NCERT not to be republished



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।

- क्योंकि $K_{उच्च}$ 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

$$e\,V_0 = h\,\nu - \phi_0 \;;\; \text{के लिए } \nu \geq \nu_0$$

$$\text{अथवा } V_0 = \left(\frac{h}{e}\right)\nu - \frac{\phi_0}{e} \qquad (11.4)$$

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,

Reprint 2025-26

© NCERT not to be republished

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 ($= 6.626 \times 10^{-34}$ 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)। अतः 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।

Reprint 2025-26

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

$$E = h\nu = (6.63 \times 10^{-34}\ \text{J s})\ (6.0 \times 10^{14}\ \text{Hz})$$
$$= 3.98 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

(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 $P = N E$ । तब

$$N = \frac{P}{E} = \frac{2.0 \times 10^{-3}\ \text{W}}{3.98 \times 10^{-19}\ \text{J}}$$

$$= 5.0 \times 10^{15}\ \text{फ़ोटॉन प्रति सेकंड}$$

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:

$$\nu_0 = \frac{\phi_0}{h} = \frac{2.14\ \text{eV}}{6.63 \times 10^{-34}\ \text{J s}}$$

$$= \frac{2.14 \times 1.6 \times 10^{-19}\ \text{J}}{6.63 \times 10^{-34}\ \text{J s}} = 5.16 \times 10^{14}\ \text{Hz}$$

इस प्रकार $\nu_0 = 5.16 \times 10^{14}$ 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 इस प्रकार है :

$$eV_0 = h\nu - \phi_0 = \frac{hc}{\lambda} - \phi_0$$

अथवा $\lambda = hc/(eV_0 + \phi_0)$

$$= \frac{(6.63 \times 10^{-34}\ \text{J s}) \times (3 \times 10^{8}\ \text{m/s})}{(0.60\ \text{eV} + 2.14\ \text{eV})}$$

$$= \frac{19.89 \times 10^{-26}\ \text{J m}}{(2.74\ \text{eV})}$$

$$\lambda = \frac{19.89 \times 10^{-26}\ \text{J m}}{2.74 \times 1.6 \times 10^{-19}\ \text{J}} = 454\ \text{nm}$$

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

© NCERT not to be republished

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 मूलतः 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।

स्पष्टतः 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।

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 सामान्यतः तरंग-यांत्रिकी कहते हैं। इलेक्ट्रॉनों की तरंग प्रकृति की खोज के लिए इन्हें सन् 1929 में नोबेल पुरस्कार से सम्मानित किया गया।

© NCERT not to be republished

Reprint 2025-26

$p = m\,v = 0.12 \text{ kg} \times 20 \text{ m s}^{-1} = 2.40 \text{ kg m s}^{-1}$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}}{2.40 \text{ kg m s}^{-1}} = 2.76 \times 10^{-34} \text{ m}$$

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।

उदाहरण 11.3 (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 $v = 5.4 \times 10^6$ m/s

तब संवेग $p = m\,v = 9.11 \times 10^{-31} \text{ (kg)} \times 5.4 \times 10^6 \text{ (m/s)}$

$p = 4.92 \times 10^{-24}$ kg m/s

दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य, $\lambda = h/p$

$$= \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}}{4.92 \times 10^{-24} \text{ kg m/s}}$$

$\lambda = 0.135$ nm

(b) गेंद के लिए

द्रव्यमान $m' = 0.150$ kg, वेग $v' = 30.0$ m/s

तब संवेग

$p' = m'\,v' = 0.150 \text{ (kg)} \times 30.0 \text{ (m/s)}$

$p' = 4.50$ kg m/s

दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य $\lambda' = h/p'$

$$= \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}}{4.50 \times \text{ kg m/s}}$$

$\lambda' = 1.47 \times 10^{-34}$ 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 11.3

इलेक्ट्रॉन-सूक्ष्मदर्शी का विकास
http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1986/presentation-speech.html

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।

© NCERT not to be republished

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:
$e\,V_0 = \frac{1}{2} m\, v^2_{\text{उच्च}} = K_{\text{उच्च}}$
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 ($\frac{1}{2} m\, v^2_{\text{उच्च}}$) फ़ोटॉन-ऊर्जा ($h\nu$) तथा लक्ष्य धातु कार्य-फलन $\phi_0\,(= h\nu_0)$ के अंतर के बराबर होती है।
$$\frac{1}{2} m\, v^2_{\text{उच्च}} = V_0\, e = h\nu - \phi_0 = h\,(\nu - \nu_0)$$
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।

© NCERT not to be republished

Reprint 2025-26

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	$e V_o = K_{उच्च}$
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 $\lambda = \dfrac{h}{p}$ 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।

Reprint 2025-26

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 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।

11.6 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।

11.7 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?

11.8 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?

11.9 488 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।

11.10 (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?

11.11 यह दर्शाइए कि वैद्युतचुंबकीय विकिरण का तरंगदैर्घ्य इसके क्वांटम (फ़ोटॉन) के तरंगदैर्घ्य के बराबर है।

© NCERT not to be republished

अध्याय 12

परमाणु

© NCERT not to be republished

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)

न्यूज़ीलैंड में जन्मे, 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।

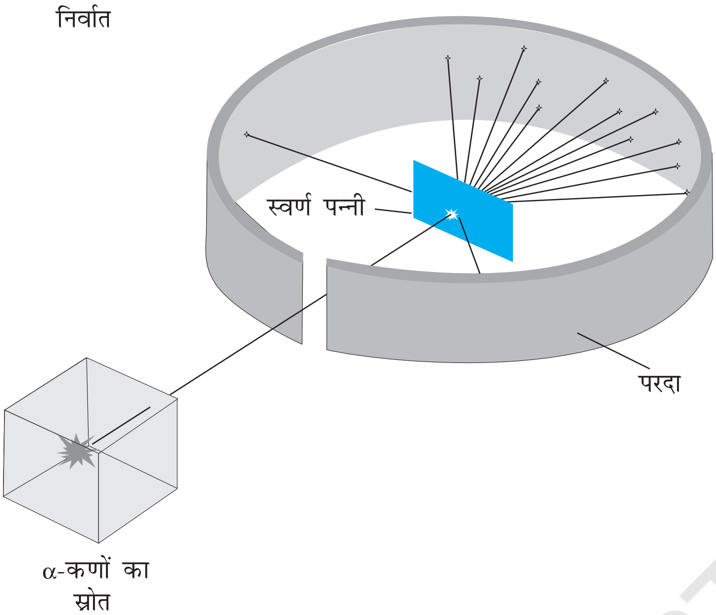
अर्नेस्ट रदरफोर्ड (1871 – 1937)

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

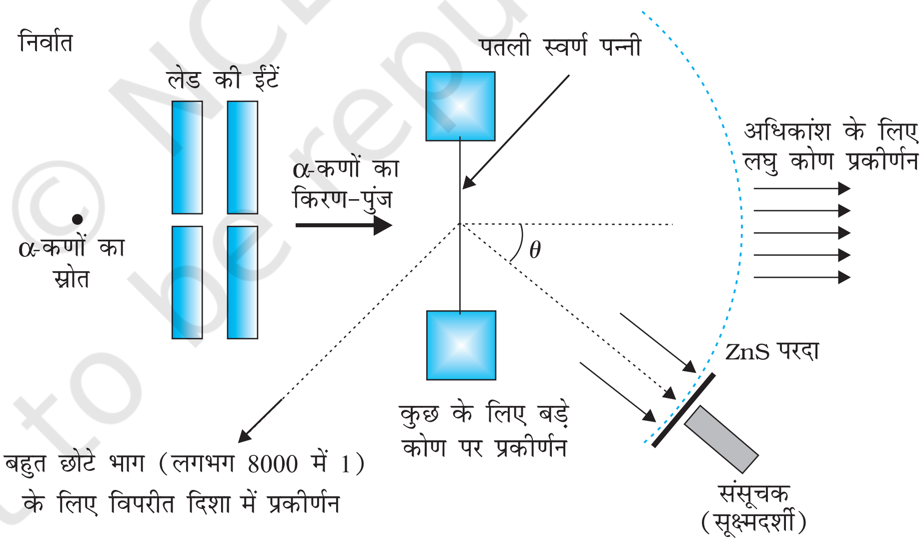
सन् 1911 में रदरफोर्ड के सुझाव पर एच. गाइगर तथा ई. मार्सडन ने कुछ प्रयोग किए। उनके द्वारा

Reprint 2025-26



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 $2.1{\times}10^{-7}$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।

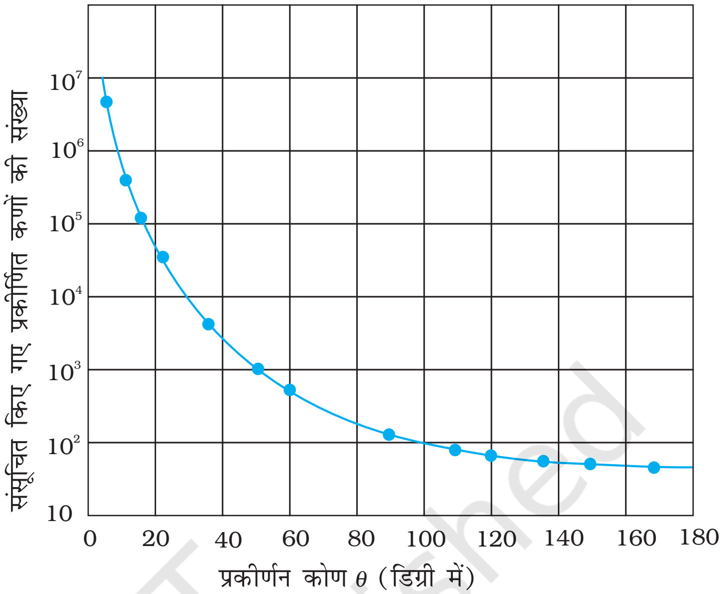


चित्र 12.2 गाइगर–मार्सडन प्रयोग का व्यवस्थात्मक निरूपण।

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

© NCERT not to be republished

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 ऐल्फ़ा-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। 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। अतः 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, अतः 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 :

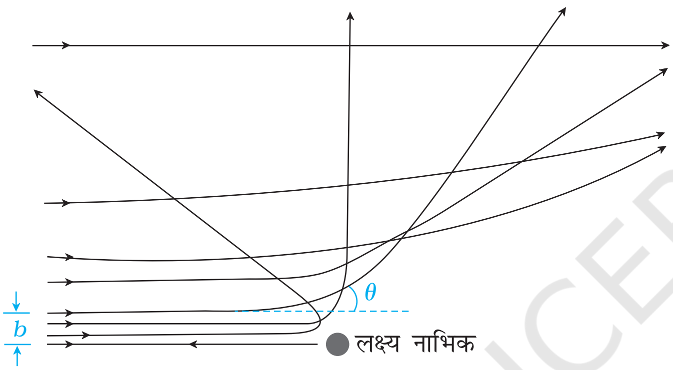
Reprint 2025-26

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{(2e)(Ze)}{r^2} \qquad (12.1)$$

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 तथा धनात्मक आवेश 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 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 $10^5 \times 7 \times 10^8\text{ m} = 7 \times 10^{13}\text{ m}$। 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 12.1

© NCERT not to be republished

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 K के 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 :

$$K = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{(2e)(Ze)}{d} = \frac{2Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 d}$$

अतः 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 $1/4\pi\varepsilon_0 = 9.0 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$ इसलिए $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C, के साथ, हमें प्राप्त होगा

$$d = \frac{(2)(9.0\times10^9 \text{Nm}^2/C^2)(1.6\times10^{-19}\text{C})^2 Z}{1.2\times10^{-12}\text{J}}$$

$$= 3.84 \times 10^{-16}\, Z \text{ m}$$

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)

अतः 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

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। अतः, हाइड्रोजन परमाणु में गतिशील स्थिर कक्षा के लिए

$$F_e = F_c$$

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \qquad (12.2)$$

© NCERT not to be republished

अतः कक्षा-त्रिज्या तथा इलेक्ट्रॉन-वेग में संबंध होगा

$$r = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 m v^2} \tag{12.3}$$

हाइड्रोजन के परमाणु में इलेक्ट्रॉन की गतिज ऊर्जा (K) तथा स्थिरवैद्युत स्थितिज ऊर्जा (U) होंगी

$$K = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r} \text{ तथा } U = -\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

(U में ऋणात्मक चिह्न सूचित करता है कि स्थिरवैद्युत बल $-r$ दिशा में है) अतः हाइड्रोजन परमाणु में इलेक्ट्रॉन की कुल ऊर्जा E,

$$E = K + U = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r} - \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

$$= -\frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r} \tag{12.4}$$

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 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 $-13.6 \text{ eV} = -13.6 \times 1.6 \times 10^{-19}$ J $= -2.2 \times 10^{-18}$ J अतः समीकरण (12.4) से हमें प्राप्त होगा

$$E = -\frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r} = -2.2 \times 10^{-18} \text{ J}$$

इससे कक्षीय-त्रिज्या प्राप्त होगी :

$$r = -\frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 E} = -\frac{(9 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2)(1.6 \times 10^{-19}\text{C})^2}{(2)(-2.2 \times 10^{-18} \text{ J})}$$

$$= 5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$$

परिक्रमण करते इलेक्ट्रॉन का वेग, समीकरण (12.3) से $m = 9.1 \times 10^{-31}$ kg लेकर परिकलित कर सकते हैं

$$v = \frac{e}{\sqrt{4\pi\varepsilon_0 m r}} = 2.2 \times 10^6 \text{ m/s}$$

उदाहरण 12.3

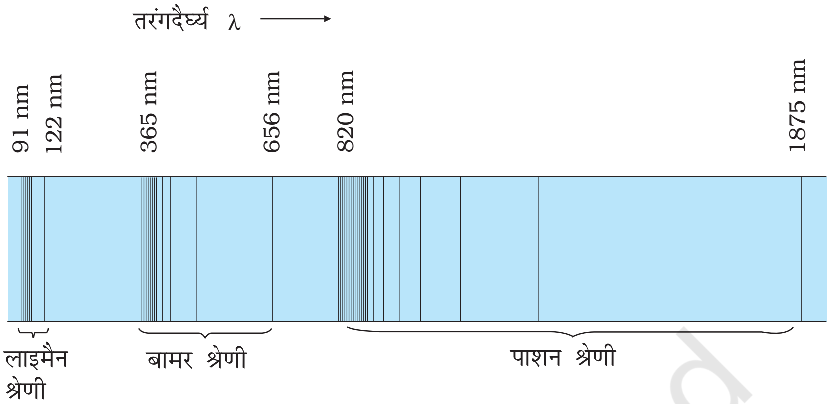
12.3 परमाण्वीय स्पेक्ट्रम

अनुच्छेद 12.1 में उल्लेख किए अनुसार, प्रत्येक तत्व अभिलाक्षणिक स्पेक्ट्रम-विकिरण उत्सर्जित करता है। जब कोई परमाण्वीय गैस अथवा वाष्प निम्न दाब पर, प्रायः 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

Reprint 2025-26

© NCERT not to be republished

पृष्ठभूमि पर दीप्त रेखाएँ होती हैं। चित्र 12.5 में परमाण्वीय हाइड्रोजन द्वारा उत्सर्जित स्पेक्ट्रम दर्शाया गया है। अतः 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 परिशुद्धतः 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।

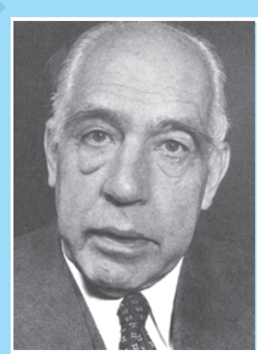


चित्र 12.5 हाइड्रोजन के स्पेक्ट्रम में उत्सर्जन रेखाएँ।

12.4 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। अतः त्वरित इलेक्ट्रॉन की ऊर्जा निरंतर घटनी चाहिए। इलेक्ट्रॉन अंदर की ओर सर्पिल पथ पर चलेगा तथा अंततः नाभिक में गिर जाएगा (चित्र 12.6)। अतः 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। अतः 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।

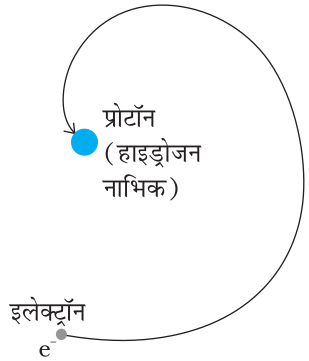
नील्स हेनरिक डेविड बोर (1885 – 1962)



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।

© NCERT not to be republished

Reprint 2025-26



चित्र 12.6 परमाणु का कोई त्वरित इलेक्ट्रॉन ऊर्जा ह्रास करके सर्पिल पथ पर नाभिक की ओर अंदर आ जाएगा।

उदाहरण 12.4

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। अतः, 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। अतः 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।

Reprint 2025-26

© NCERT not to be republished

(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 $(= 6.6 \times 10^{-34}\ \text{J s})$ । अत: परिक्रमा करते हुए इलेक्ट्रॉन का कोणीय संवेग (L) क्वांटित है। अर्थात

$$L = nh/2\pi \qquad (12.5)$$

(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 :*

$$h\nu = E_i - E_f \qquad (12.6)$$

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।

इस प्रकार किसी संभावित n^{th} कक्षा की *त्रिज्या प्राप्त होती है*

$$r_n = \left(\frac{n^2}{m}\right)\left(\frac{h}{2\pi}\right)^2 \frac{4\pi\varepsilon_0}{e^2} \qquad (12.7)$$

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 $$E_n = -\frac{me^4}{8n^2\varepsilon_0^2h^2} \qquad (12.8)$$

समीकरण (12.8) में नियतांकों के मान रखने पर हमें प्राप्त होगा

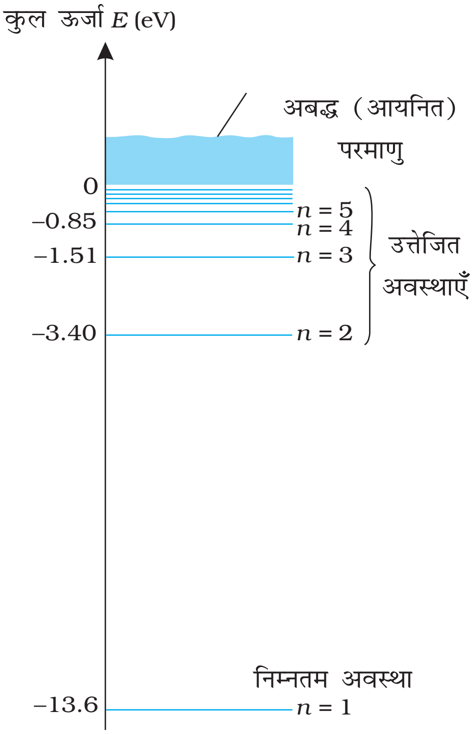
$$E_n = -\frac{2.18 \times 10^{-18}}{n^2}\text{J} \qquad (12.9)$$

परमाण्वीय ऊर्जाएँ प्राय: जूल के स्थान पर इलेक्ट्रॉन वोल्ट (eV) में व्यक्त की जाती हैं। क्योंकि $1\ \text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\ \text{J}$। समीकरण (12.9) को पुन: इस प्रकार लिखा जा सकता है

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2}\ \text{eV} \qquad (12.10)$$

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। अत:, हाइड्रोजन परमाणु से इलेक्ट्रॉन को नाभिक से (या हाइड्रोजन परमाणु में प्रोटॉन से) अनंत दूरी तक विलग करने के लिए ऊर्जा की आवश्यकता होगी।

Reprint 2025-26



चित्र 12.7 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।)

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। $n = 2, 3 ...$ के लिए, ऊर्जा E के निरपेक्ष मान कम होते जाते हैं, अत: 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। अत: 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 (12.10) 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 eV – (–13.6) eV = 10.2 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 (12.10) से अभिकलित हाइड्रोजन परमाणु की स्थायी अवस्थाओं का ऊर्जा स्तर आरेख* चित्र (12.7) में दर्शाया गया है। मुख्य क्वांटम संख्या n स्थायी अवस्थाओं को ऊर्जा के आरोही क्रम में अंकित करता है। इस चित्र में उच्चतम ऊर्जा अवस्था समीकरण (12.10) 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।

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

$$h\nu_{if} = E_{n_f} - E_{n_i} \tag{12.11}$$

* 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 12.7 में दर्शाए अनुसार ऊर्जा अवस्थाओं का एक सांतत्य है।

© NCERT not to be republished
Reprint 2025-26

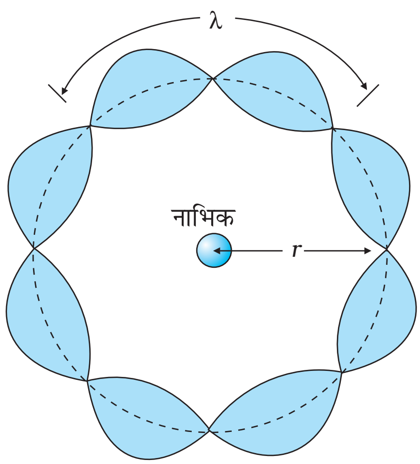
चूँकि n_f और n_i दोनों पूर्णांक हैं अतः इससे तुरंत परिणाम प्राप्त होता है कि परमाण्वीय स्तरों के मध्य संक्रमणों में, विभिन्न विविक्त आवृत्तियों के प्रकाश उत्सर्जित होते हैं।

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 स्थिति में संक्रमण के लिए आवश्यक होती है, तो इस प्रक्रम को *अवशोषण* कहते हैं। अतः 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।

12.6 बोर के क्वांटमीकरण के द्वितीय अभिगृहीत का दे ब्रॉग्ली द्वारा स्पष्टीकरण

बोर द्वारा प्रस्तुत परमाणु के मॉडल के सभी अभिगृहीतों में संभवतः 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 $L_n = nh/2\pi$; $n = 1, 2, 3$ ...)। 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।



चित्र 12.8 वृत्ताकार कक्षा में एक अप्रगामी तरंग दर्शाई गई है जहाँ पर कक्षा की परिधि में चार दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्घ्य आती हैं।

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 14 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। अतः

$$2\pi r_n = n\lambda, \quad n = 1, 2, 3... \qquad (12.12)$$

Reprint 2025-26

चित्र 12.8 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 (12.12) 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 (12.5)]। 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।
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।

* 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, द्वितः आयनित लीथियम इत्यादि हाइड्रोजनसम परमाणुओं के उदाहरण हैं। इन परमाणुओं में अधिक जटिल इलेक्ट्रॉन-इलेक्ट्रॉन अन्योन्य क्रियाएँ नहीं पाई जातीं।

Reprint 2025-26

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. अधिकांश तत्वों 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. 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 मुख्य 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।

   $$E_i + h\nu = E_f$$

7. 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 :

   $$E_n = \frac{me^4}{8n^2\varepsilon_0^2 h^2}$$

   $$= -13.6 \text{ eV}/n^2$$

   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।

© NCERT not to be republished

8. 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।
9. 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। अत: 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 :

Reprint 2025-26

(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 अक्षरश: 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 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?

12.4 हाइड्रोजन परमाणु की निम्नतम अवस्था में ऊर्जा –13.6 eV है। इस अवस्था में इलेक्ट्रॉन की गतिज और स्थितिज ऊर्जाएँ क्या होंगी?

12.5 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।

12.6 (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।

12.7 हाइड्रोजन परमाणु में अंतरतम इलेक्ट्रॉन-कक्षा की त्रिज्या 5.3×10^{-11} m है। कक्षा $n = 2$ और $n = 3$ की त्रिज्याएँ क्या हैं?

12.8 कमरे के ताप पर गैसीय हाइड्रोजन पर किसी 12.5 eV की इलेक्ट्रॉन पुंज की बमबारी की गई। किन तरंगदैर्घ्यों की श्रेणी उत्सर्जित होगी?

12.9 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)।

Reprint 2025-26

© NCERT not to be republished

12092CH13

अध्याय 13

नाभिक

© NCERT not to be republished

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 अधिकांशतः 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। अतः 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।

अतः इस परिभाषा के अनुसार

$$1u = \frac{^{12}C \text{ परमाणु का द्रव्यमान}}{12}$$

$$= \frac{1.992647 \times 10^{-26} \text{ kg}}{12}$$

$$= 1.660539 \times 10^{-27} \text{ kg} \quad (13.1)$$

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 क्रमशः 34.98 u एवं 36.98 u हैं, जो कि हाइड्रोजन परमाणु द्रव्यमान के पूर्ण गुणज के सन्निकट हैं। इन समस्थानिकों की सापेक्ष बहुलता क्रमशः 75.4 एवं 24.6% है। इस प्रकार, प्राकृतिक क्लोरीन परमाणु का द्रव्यमान इन समस्थानिकों का *भारित-औसत* है। अतः, 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,

$$m_p = 1.00727 \text{ u} = 1.67262 \times 10^{-27} \text{ kg} \quad (13.2)$$

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

Reprint 2025-26

उसके परमाणु क्रमांक *Z*, के बराबर होती है। अतः 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, तथ्यतः 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 क्रमशः 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,

$$m_n = 1.00866 \text{ u} = 1.6749\times10^{-27} \text{ kg} \tag{13.3}$$

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। अतः किसी परमाणु में न्यूक्लियॉन संख्या उसकी द्रव्यमान संख्या A होती है।

किसी नाभिकीय प्रजाति या नाभिक को संकेत चिह्न ${}_{Z}^{A}\text{X}$ द्वारा प्रदर्शित किया जाता है। जहाँ X उस प्रजाति का रासायनिक चिह्न है। उदाहरण के लिए, स्वर्ण-नाभिक को संकेत ${}_{79}^{197}\text{Au}$ द्वारा व्यक्त करते हैं। इसमें 197 न्यूक्लियॉन होते हैं जिनमें 79 प्रोटॉन एवं 118 न्यूट्रॉन होते हैं।

Reprint 2025-26

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 $^{2}_{1}H$ जो हाइड्रोजन का एक समस्थानिक है, इसमें एक प्रोटॉन एवं एक न्यूट्रॉन होता है। इसके दूसरे समस्थानिक ट्राइटियम $^{3}_{1}H$ 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 $^{3}_{1}H$ एवं $^{3}_{2}He$ समभारिक हैं। ऐसे नाभिक जिनकी न्यूट्रॉन संख्या N समान हो लेकिन परमाणु क्रमांक Z भिन्न हो *समन्यूट्रॉनिक* कहलाते हैं। उदाहरणार्थ, $^{198}_{80}Hg$ एवं $^{197}_{79}Au$ 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 4.0×10^{-14} 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 4.0×10^{-14} 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। रदरफ़ोर्ड 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 :

$$R = R_0 A^{1/3} \tag{13.5}$$

जहाँ $R_0 = 1.2 \times 10^{-15}$ m (= 1.2 fm; 1 fm = 10^{-15}m) इसका अर्थ है कि नाभिक का आयतन (जो R^3 के अनुक्रमानुपाती है) द्रव्यमान संख्या A के अनुक्रमानुपाती होता है। अतः 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 2.3×10^{17} 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 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 अधिकांशतः भीतर से रिक्त होता है। सामान्य परमाणुओं से बने द्रव्य में बड़ी मात्रा में रिक्त स्थान होता है।

Reprint 2025-26

© NCERT not to be republished

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

$$\text{नाभिकीय घनत्व} = \frac{\text{द्रव्यमान}}{\text{आयतन}} = \frac{9.27\times10^{-26}}{(4\pi/3)(1.2\times10^{-15})^3}\times\frac{1}{56}$$

$$= 2.29 \times 10^{17} \text{ kg m}^{-3}$$

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 :

$$E = mc^2 \tag{13.6}$$

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

$E = 10^{-3} \times 9 \times 10^{16}$ J $= 9 \times 10^{13}$ 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

© NCERT not to be republished

$^{16}_{8}O$ को लें। इसमें 8 प्रोटॉन एवं 8 न्यूट्रॉन हैं। अतः,

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 × 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 × 0.00055 u) घटाने पर $^{16}_{8}O$ के नाभिक का प्रायोगिक मान 15.99053 u है।

अतः 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 :

$$\Delta M = [Zm_p + (A - Z)m_n] - M \tag{13.7}$$

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 :

$$E_b = \Delta M c^2 \tag{13.8}$$

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

$1\text{u} = 1.6605 \times 10^{-27}$ 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

$$= \frac{1.4924 \times 10^{-10}}{1.602 \times 10^{-19}} \text{eV}$$

$= 0.9315 \times 10^9$ eV

$= 931.5$ MeV

अथवा $1\text{u} = 931.5 \text{ MeV}/c^2$

$^{16}_{8}O$ के लिए $\Delta M = 0.13691 \text{ u} = 0.13691 \times 931.5 \text{ MeV}/c^2$

$= 127.5 \text{ MeV}/c^2$

$\therefore$ $^{16}_{8}O$ 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

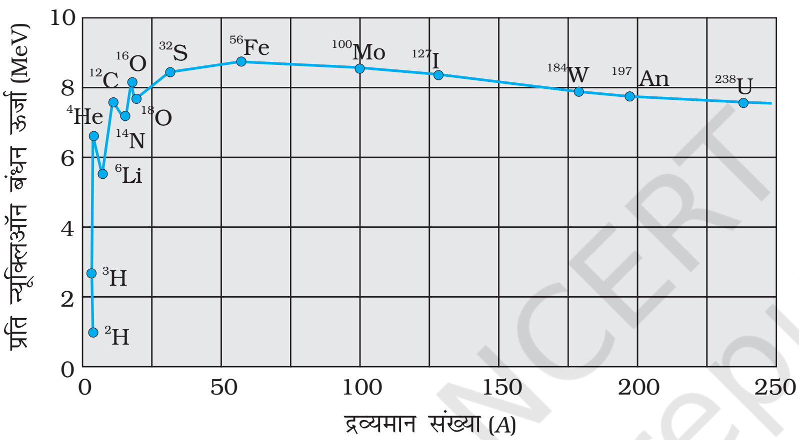
Reprint 2025-26

© NCERT not to be republished

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।

$$\Delta E_{bn} = \Delta E_b / A \tag{13.9}$$

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

© NCERT not to be republished

Reprint 2025-26

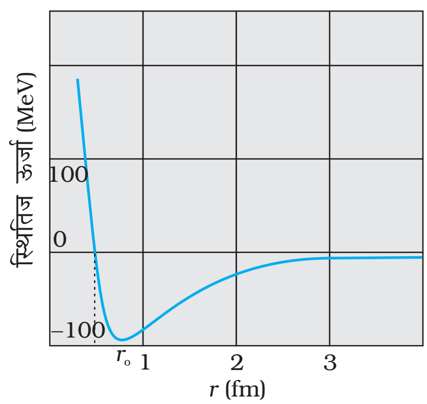
मान pk के बराबर होता है। नाभिकों का वह गुण जिसके कारण कोई नाभिक केवल अपने निकट के नाभिकों को ही प्रभावित करता है, *नाभिकीय बलों का संतृप्ति गुण कहलाता* है।

(iii) एक अत्यधिक भारी नाभिक, जैसे A = 240, की प्रति न्यूक्लियॉन बंधन-ऊर्जा, A = 120 के नाभिक की तुलना में कम होती है। अत:, 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 ($A \le 10$) 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 13.7.2 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। अत: 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।



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।

(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।

© NCERT not to be republished

(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।

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।

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 ($^4_2$He) उत्सर्जित होते हैं,

(ii) β-क्षय, जिसमें इलेक्ट्रॉन अथवा पॉज़ीट्रॉन (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।

13.7 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।

Reprint 2025-26

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। अतः 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 10^7J 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 उदाहरणतः जब किसी यूरेनियम समस्थानिक ${}^{235}_{92}\text{U}$ पर न्यूट्रॉन से प्रहार कराया जाता है तो वह दो माध्यमिक द्रव्यमान वाले नाभिकीय खंडों में विखंडित हो जाता है :

$$ {}^{1}_{0}\text{n} + {}^{235}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{236}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{144}_{56}\text{Ba} + {}^{89}_{36}\text{Kr} + 3\,{}^{1}_{0}\text{n} \qquad (13.10)$$

इसी क्रिया में माध्यमिक द्रव्यमान वाले नाभिकों के भिन्न युग्म भी उत्पन्न हो सकते हैं :

$$ {}^{1}_{0}\text{n} + {}^{235}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{236}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{133}_{51}\text{Sb} + {}^{99}_{41}\text{Nb} + 4\,{}^{1}_{0}\text{n} \qquad (13.11)$$

एक अन्य उदाहरण है :

$$ {}^{1}_{0}\text{n} + {}^{235}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{140}_{54}\text{Xe} + {}^{94}_{38}\text{Sr} + 2\,{}^{1}_{0}\text{n} \qquad (13.12)$$

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।

अतः 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।

13.7.2 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 आगे दिए गए हैं :

Reprint 2025-26

© NCERT not to be republished

$$^1_1H + ^1_1H \rightarrow ^2_1H + e^+ + \nu + 0.42 \text{ MeV} \qquad [13.13(a)]$$

$$^2_1H + ^2_1H \rightarrow ^3_2He + n + 3.27 \text{ MeV} \qquad [13.13(b)]$$

$$^2_1H + ^2_1H \rightarrow ^3_1H + ^1_1H + 4.03 \text{ MeV} \qquad [13.13(c)]$$

अभिक्रिया 13.13 (a) में दो प्रोटॉन मिलकर एक ड्यूट्रॉन एवं एक पॉज़िट्रॉन बनाते हैं और इस प्रक्रिया में 0.42 MeV ऊर्जा निकलती है। अभिक्रिया 13.13 (b) में दो ड्यूट्रॉन मिलकर हीलियम का हलका समस्थानिक बनाते हैं। अभिक्रिया 13.13 (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, अतः उनके बीच कूलॉम प्रतिकर्षण होगा। अतः 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 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 $3 \times 10^9 K$ ताप पर प्राप्त हो सकती है। इस ताप का परिकलन, सूत्र $(3/2)k\,T = K$ 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 अंतः 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। स्पष्टतः सूर्य में होने वाली संलयन प्रक्रियाओं में औसत ऊर्जाओं से बहुत अधिक ऊर्जा वाले प्रोटॉन भाग लेते हैं।

अतः 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। अतः 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।

$$^1_1H + ^1_1H \rightarrow ^2_1H + e^+ + \nu + 0.42 \text{ MeV} \qquad (i)$$

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma + 1.02 \text{ MeV} \qquad (ii)$$

$$^2_1H + ^1_1H \rightarrow ^3_2He + \gamma + 5.49 \text{ MeV} \qquad (iii)$$

$$^3_2H + ^3_2H \rightarrow ^4_2He + ^1_1H + ^1_1H + 12.86 \text{ MeV} \qquad (iv) \qquad (13.14)$$

Reprint 2025-26

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,

$$4\,{}_1^1\mathrm{H} + 2e^- \rightarrow {}_2^4\mathrm{He} + 2\nu + 6\gamma + 26.7\,\mathrm{MeV}$$

या $$(4\,{}_1^1\mathrm{H} + 4e^-) \rightarrow ({}_2^4\mathrm{He} + 2e^-) + 2\nu + 6\gamma + 26.7\,\mathrm{MeV} \qquad (13.15)$$

अतः चार हाइड्रोजन परमाणु मिलकर एक ${}_2^4\mathrm{He}$ परमाणु बनाते हैं और इस प्रक्रिया में 26.7 MeV ऊर्जा निर्मुक्त होती है।

किसी तारे के अंतः 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 पुनः 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।

13.7.3 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 13.4 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।

उदाहरण 13.4

© NCERT not to be republished

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। अतः 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। वस्तुतः कुल आवेश तथा कुल 'बेरियॉन संख्या' संरक्षित रहते हैं। हम इस विषय पर यहाँ आगे और विचार नहीं करेंगे।] नाभिकीय अभिक्रियाओं [जैसे कि समीकरण (13.10)] 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, अतः 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, अतः 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 अंतःरूपांतरण का एक उदाहरण है।

(c) द्रव्यमान-ऊर्जा के अंतःरूपांतरण की दृष्टि से, सिद्धांततः 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 अंतःरूपांतरण नहीं होता।

उदाहरण 13.4

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 1/12वें भाग के बराबर होती है।
   $1u = 1.660563 \times 10^{-27}$ kg

Reprint 2025-26

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 ${}_{Z}^{A}X$ 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 $E = m\,c^2$ 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 तरंगदैर्ध्य के विद्युत चुंबकीय विकिरण हैं।
11. 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, ${}_{92}^{235}\text{U} + {}_{0}^{1}\text{n} \rightarrow {}_{51}^{133}\text{Sb} + {}_{41}^{99}\text{Nb} + 4\,{}_{0}^{1}\text{n}$
12. 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।

© NCERT not to be republished

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।

© NCERT not to be republished

(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. रेडियोऐक्टिवता नाभिक के अस्थायित्व का संसूचन है। हलके नाभिकों में स्थायित्व के लिए न्यूट्रॉनो 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 K^{-1}

1 MeV = 1.6×10^{-13}J 1 u = 931.5 MeV/c^2

1 year = 3.154×10^7 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 नाइट्रोजन नाभिक ($^{14}_7$N) की बंधन-ऊर्जा MeV में ज्ञात कीजिए m_N=14.00307 u

13.2 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

13.3 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)।

13.4 स्वर्ण के समस्थानिक $^{197}_{79}$Au एवं रजत के समस्थानिक $^{107}_{47}$Ag की नाभिकीय त्रिज्या के अनुपात का सन्निकट मान ज्ञात कीजिए।

13.5 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) $^1_1\text{H}+^3_1\text{H} \rightarrow ^2_1\text{H}+^2_1\text{H}$

(ii) $^{12}_6\text{C}+^{12}_6\text{C} \rightarrow ^{20}_{10}\text{Ne}+^4_2\text{He}$

दिए गए परमाणु द्रव्यमान इस प्रकार हैं :

$m(^2_1\text{H})$ = 2.014102 u

$m(^3_1\text{H})$ = 3.016049 u

$m(^{12}_6\text{C})$ = 12.000000 u

$m(^{20}_{10}\text{Ne})$ = 19.992439 u

Reprint 2025-26

13.6 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

13.7 $^{239}_{94}Pu$ 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?

13.8 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

$$^{2}_{1}H + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{3}_{2}He + n + 3.27 \text{ MeV}$$

13.9 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।)

13.10 समीकरण $R = R_0 A^{1/3}$ 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।

© NCERT not to be republished

Reprint 2025-26

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 ($\sim$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।

$\rho \sim 10^{-2} - 10^{-8}\ \Omega\ \text{m}$
$\sigma \sim 10^{2} - 10^{8}\ \text{S m}^{-1}$

(ii) ***अर्धचालक*** **:** इनकी प्रतिरोधकता या चालकता धातुओं तथा विद्युतरोधी पदार्थों के बीच की होती है।

$\rho \sim 10^{-5} - 10^{6}\ \Omega\ \text{m}$
$\sigma \sim 10^{5} - 10^{-6}\ \text{S m}^{-1}$

(iii) ***विद्युतरोधी*** **:** इनकी प्रतिरोधकता बहुत अधिक (अथवा चालकता बहुत कम) होती है।

$\rho \sim 10^{11} - 10^{19}\ \Omega\ \text{m}$
$\sigma \sim 10^{-11} - 10^{-19}\ \text{S m}^{-1}$

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।

Reprint 2025-26

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। अतः 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।

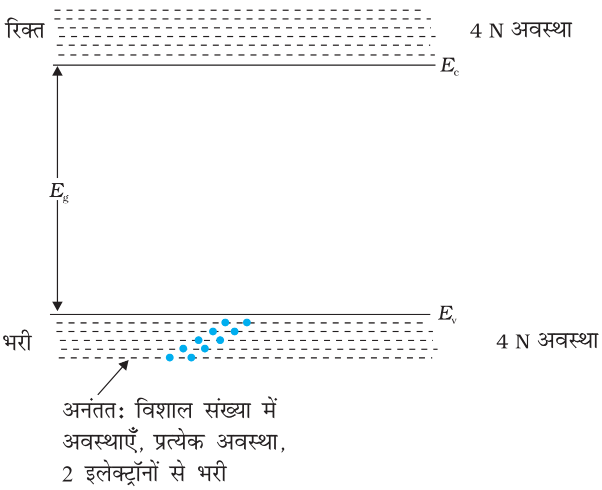
किसी क्रिस्टल के भीतर प्रत्येक इलेक्ट्रॉन की अपनी अद्वितीय स्थिति होती है तथा किन्हीं दो इलेक्ट्रॉनों के चारों ओर के आवेशों का पैटर्न यथार्थ रूप में एक जैसा नहीं होता। यही कारण है कि प्रत्येक इलेक्ट्रॉन के *ऊर्जा स्तर* भिन्न होते हैं। ये भिन्न ऊर्जा स्तर जिनमें ऊर्जा का संतत परिवर्तन होता रहता है *ऊर्जा 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। सामान्यतः 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। अतः इस क्रिस्टल में बाह्य इलेक्ट्रॉनों की कुल संख्या $4N$ हुई। किसी बाह्यतम कक्षा में अधिकतम इलेक्ट्रॉनों की संख्या 8 ($2s + 6p$ इलेक्ट्रॉन) होती है। अतः $4N$ 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।

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।

Reprint 2025-26



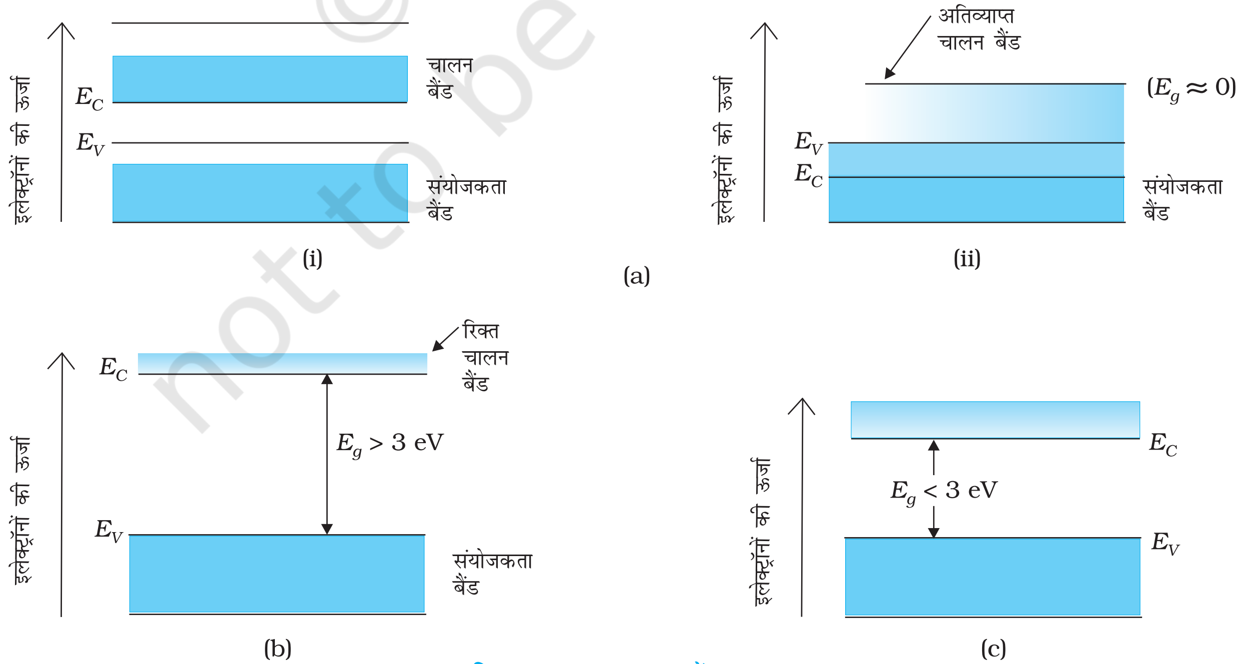
चित्र 14.1 0 K पर किसी अर्धचालक में ऊर्जा बैंड की स्थितियाँ, ऊपरी बैंड जिसे चालन बैंड कहते हैं, में अनंततः विशाल संख्या में, अत्यधिक निकट ऊर्जा अवस्थाएँ होती हैं। निचला बैंड जिसे संयोजकता बैंड कहते हैं, में अत्यधिक निकट पूर्णतः भरी ऊर्जा अवस्थाएँ होती हैं।

तापक्रम के परम शून्य पर $4N$ संयोजकता इलेक्ट्रॉनों से पूर्णतः 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 पूर्णतः रिक्त होता है।

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।

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।

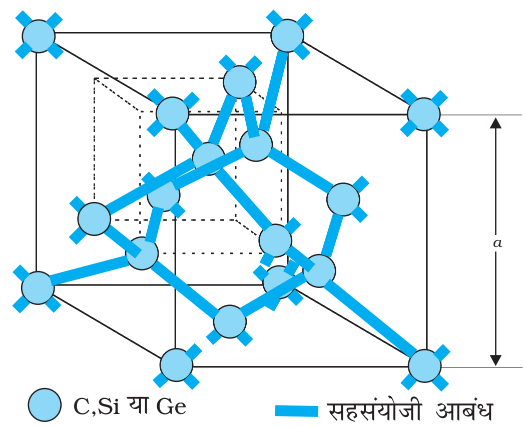
प्रकरण II **:** इस प्रकरण में जैसा कि चित्र 14.2(b) में दर्शाया गया है, इस स्थिति में बैंड अंतराल E_g अधिक होता है (E_g > 3 eV) । चालन बैंड में कोई इलेक्ट्रॉन नहीं होते। अत: कोई विद्युत चालन संभव नहीं होता। ध्यान देने योग्य बात यह है कि ऊर्जा अंतराल इतना अधिक होता है कि किसी भी तापीय उत्तेजन से इलेक्ट्रॉनों 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।

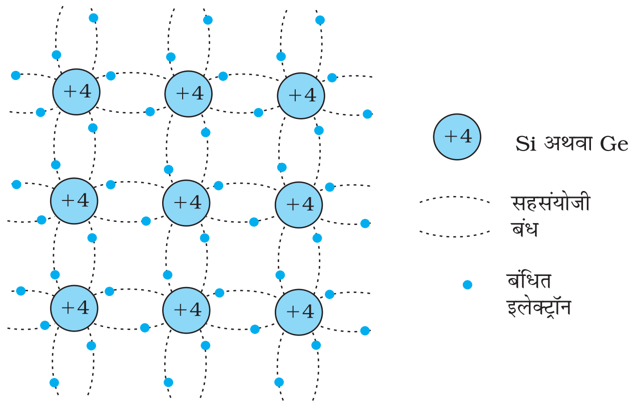
नैज अर्धचालकों (Intrinsic semiconductor) में मुक्त इलेक्ट्रॉनों की संख्या n_e होलों की संख्या, n_h के बराबर होती है, अर्थात

$$n_e = n_h = n_i \quad (14.1)$$

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

Reprint 2025-26

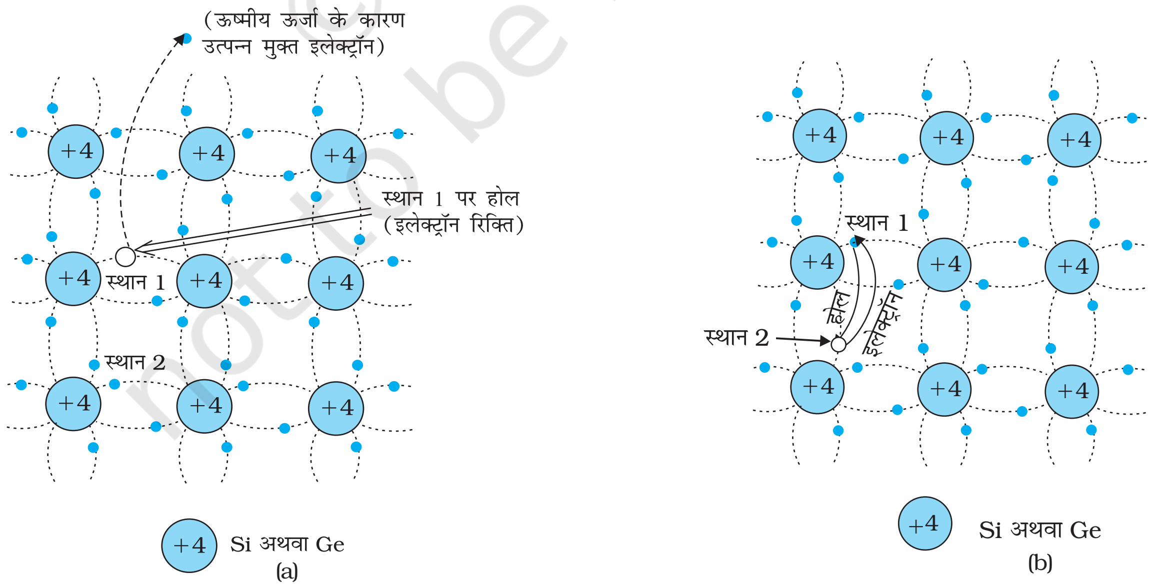


चित्र 14.4 Si या Ge की संरचना का दो-विमीय व्यवस्थात्मक निरूपण जिसमें निम्न ताप पर सहसंयोजी आबंध दिखाए गए हैं (सभी बंध बने हुए, कोई टूटा बंध नहीं)। +4 चिह्न Si या Ge की भीतरी क्रोड़ को इंगित करता है।

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 –

$$I = I_e + I_h \tag{14.2}$$

यहाँ ध्यान देने योग्य बात यह है कि चालन इलेक्ट्रॉनों तथा होलों के उत्पन्न होने के साथ–साथ *पुन:संयोजन* का प्रक्रम होता है जिसमें इलेक्ट्रॉन होल के साथ *पुन:संयोजित* होते हैं। साम्यावस्था में आवेश वाहकों के उत्पन्न होने की दर उनके पुन:संयोजन की दर के बराबर होती है। इस पुन:संयोजन का कारण इलेक्ट्रॉनों का होलों से संघट्ट करना है।

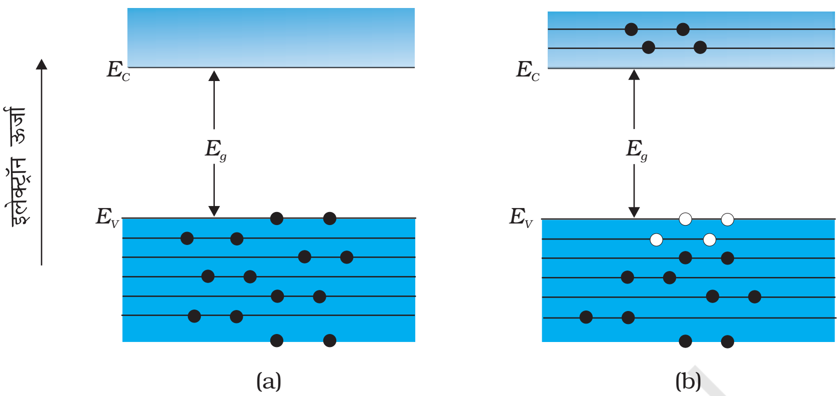


चित्र 14.5 (a) मध्यम ताप पर ऊष्मीय ऊर्जा के कारण स्थान 1 पर होल तथा चालन इलेक्ट्रॉन के उत्पन्न होने का व्यवस्थापक प्रारूप। (b) किसी होल की संभावित ऊष्मीय गति का सरलीकृत निरूपण। नीचे वाले बाएँ हाथ के सहसंयोजी बंध (स्थान 2) से एक इलेक्ट्रॉन प्रारंभिक होल स्थान 1 पर चला जाता है और अपने स्थान पर एक होल छोड़ता है। इस प्रकार स्थान 1 से स्थान 2 तक होल का आभासी स्थानांतरण इंगित होता है।

© NCERT not to be republished

Reprint 2025-26

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।



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 वृत (○) होलों को निरूपित करते हैं।

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 क्रमश: द्वितीय, तृतीय तथा चतुर्थ कक्षा में होते हैं। अत: 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।

उदाहरण 14.1

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। अत: इनकी चालकता में सुधार करना आवश्यक होता है। यह उन अर्धचालकों में अशुद्धियों का उपयोग करके किया जाता है।

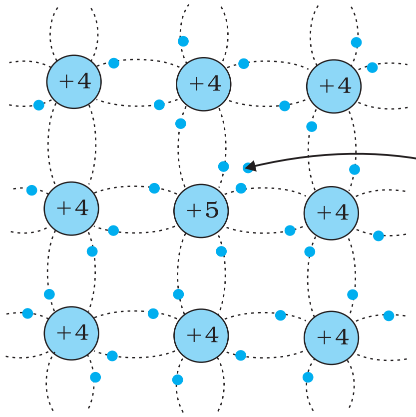
जब किसी शुद्ध अर्धचालक में कोई उपयुक्त अशुद्धि अत्यल्प मात्रा में जैसे कुछ भाग प्रति मिलियन (ppm) में मिलाई जाती है तो उसकी चालकता में कई गुना वृद्धि हो जाती है। इस प्रकार के पदार्थों को *अपद्रव्यी अर्धचालक* (Extrinsic semiconductor) अथवा *अशुद्धि अर्धचालक* (Impurity semiconductor) कहते हैं। वांछित अशुद्धि 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।

चतु: संयोजक Si अथवा Ge के मादन के लिए दो प्रकार के अपमिश्रक उपयोग किए जाते हैं।

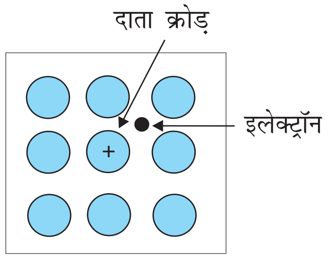
(i) पंच संयोजक (संयोजकता 5); जैसे आर्सेनिक (As), ऐंटीमनी (Sb), फ़ॉस्फोरस (P), आदि।

(ii) त्रि संयोजक (संयोजकता 3); जैसे इंडियम (In), बोरॉन (B), ऐलुमिनियम (Al), आदि।

© NCERT not to be republished



(a)



(b)

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।

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 पूर्णतः भिन्न प्रकार के दो अर्धचालक पदार्थों का निर्माण करते हैं जिनका वर्णन नीचे दिया 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 पुनःसंयोजन 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।

not to be republished © NCERT

इस प्रकार अपमिश्रण के उचित स्तर से चालक इलेक्ट्रॉनों की संख्या में होलों की संख्या की तुलना में वृद्धि की जा सकती है। अतः 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

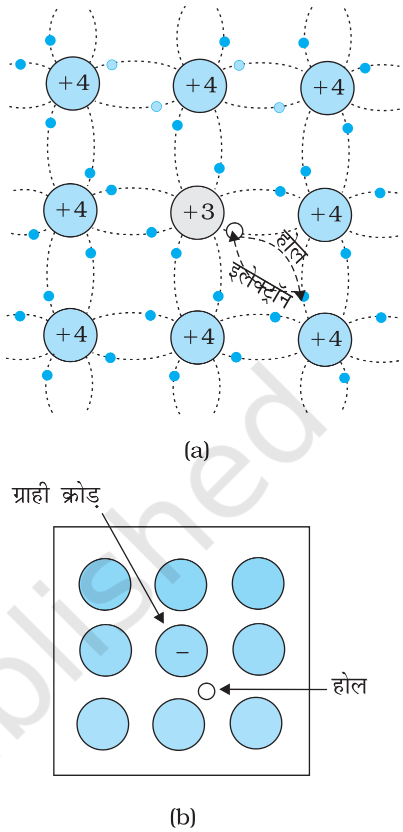
$$n_e >> n_h \qquad (14.3)$$

(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। अतः 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 प्रभावतः ऋणात्मक आवेशित हो जाता है, तथा इसके सभी संयोजी बंध पूरे हो जाते हैं। इसलिए साधारण भाषा में प्रायः 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 पुनःसंयोजन प्रक्रिया, नैज जनित इलेक्ट्रॉनों की संख्या n_i घट कर n_e हो जाती है। अतः *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।*



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।

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

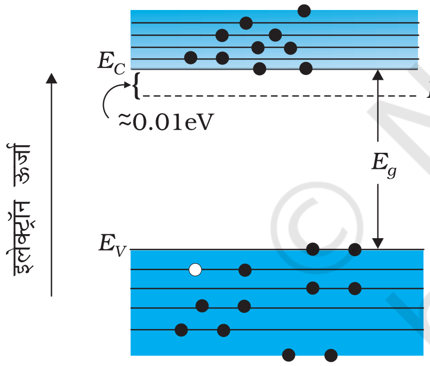
© NCERT not to be republished

Reprint 2025-26

आयनीकृत हो जाते हैं, परंतु Si के अति अल्प ($\sim 10^{12}$) परमाणु ही आयनीकृत होते हैं। अतः 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

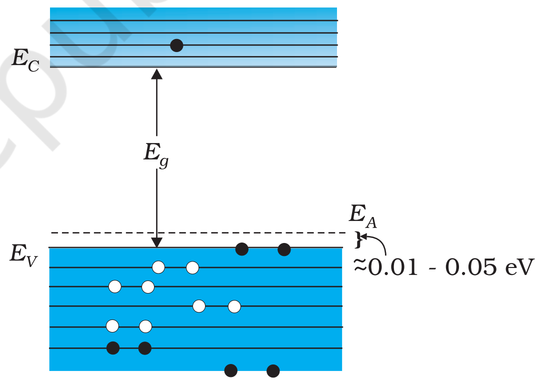
$$n_e n_h = n_i^2 \qquad (14.5)$$

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 क्रमशः 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

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

$n_h = (2.25 \times 10^{32})/(5 \times 10^{22})$

$\sim 4.5 \times 10^9\ m^{-3}$

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।

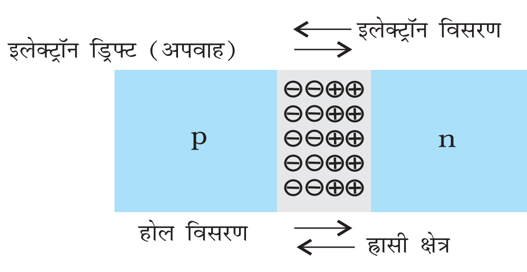
14.5.1 p-n संधि का निर्माण

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

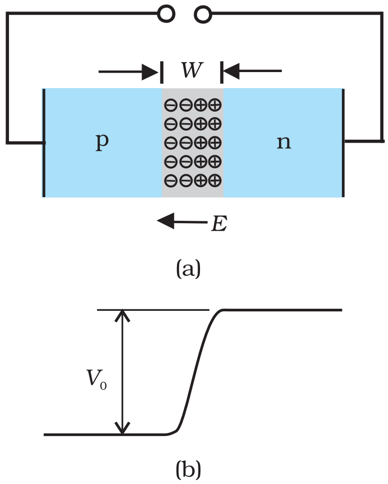
आरंभ में, विसरण धारा उच्च होती है तथा अपवाह धारा निम्न होती है। जैसे-जैसे विसरण प्रक्रिया होती जाती है, संधि के दोनों फलकों पर अंतराकाशी आवेश क्षेत्र विस्तारित

भौतिकी

p-n संधि डायोड का निर्माण तथा कार्य
http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/pnjun.html

© NCERT not to be republished

Reprint 2025-26



चित्र 14.11 (a) डायोड साम्य में (V = 0), (b) बिना किसी बायस के संधि का विभव।

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।

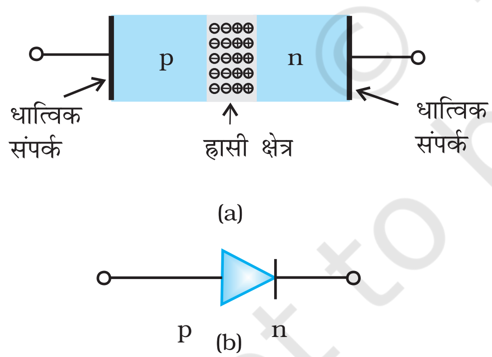
n-क्षेत्र से इलेक्ट्रॉनों की हानि तथा p-क्षेत्र में होलों की प्राप्ति के कारण दोनों क्षेत्रों की संधि के आर-पार एक विभवांतर उत्पन्न हो जाता है। इस विभव की ध्रुवता इस प्रकार होती है कि यह आवेश वाहकों के और प्रवाह का विरोध करता है जिसके फलस्वरूप साम्यावस्था की स्थिति उत्पन्न हो जाती है। चित्र 14.11 में 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।

उदाहरण 14.3

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।

14.6 अर्धचालक डायोड



चित्र 14.12 (a) अर्धचालक डायोड, (b) p-n संधि डायोड का प्रतीक।

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।

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।

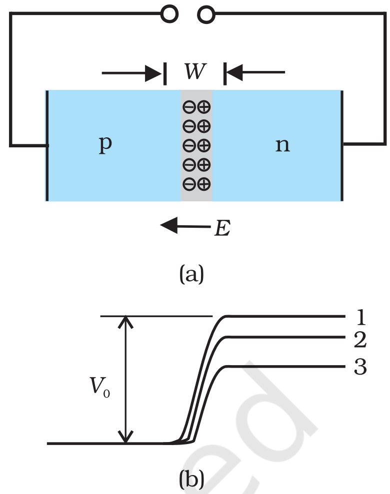
अनुप्रयुक्त अधिकांश वोल्टता पात अर्धचालक डायोड के ह्रासी क्षेत्र के सिरों पर होता है तथा संधि के p-फलक तथा n-फलक पर विभवपात नगण्य होता है (इसका कारण यह है कि ह्रासी क्षेत्र, वह क्षेत्र जहाँ कोई आवेश नहीं है, का प्रतिरोध n-फलक अथवा p-फलक के प्रतिरोधों की तुलना में अत्यधिक होता है)। अनुप्रयुक्त वोल्टता (V) की दिशा अंत:निर्मित (built-in) विभव V_0

© NCERT not to be republished

Reprint 2025-26

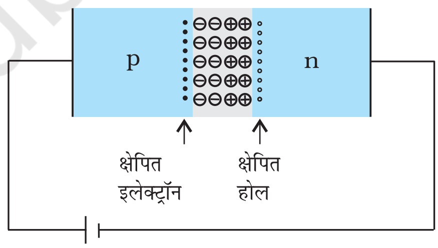
के विपरीत होती है। इसके परिणामस्वरूप, ह्रासी स्तर की मोटाई घट जाती है तथा रोधिका ऊँचाई कम हो जाती है [चित्र 14.13(b)]। अग्रदिशिक बायस में प्रभावी रोधिका ऊँचाई $(V_0 - V)$ होती है।

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।



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।

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।



चित्र 14.14 अग्रदिशिक बायस में अल्पांश वाहक अंत:क्षेपण (Minority current injection)।

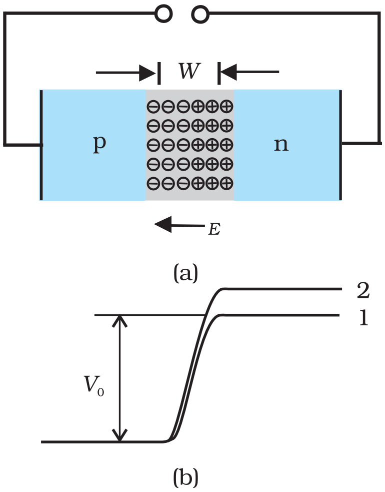
14.6.2 पश्चदिशिक बायस में p-n संधि डायोड

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

Reprint 2025-26

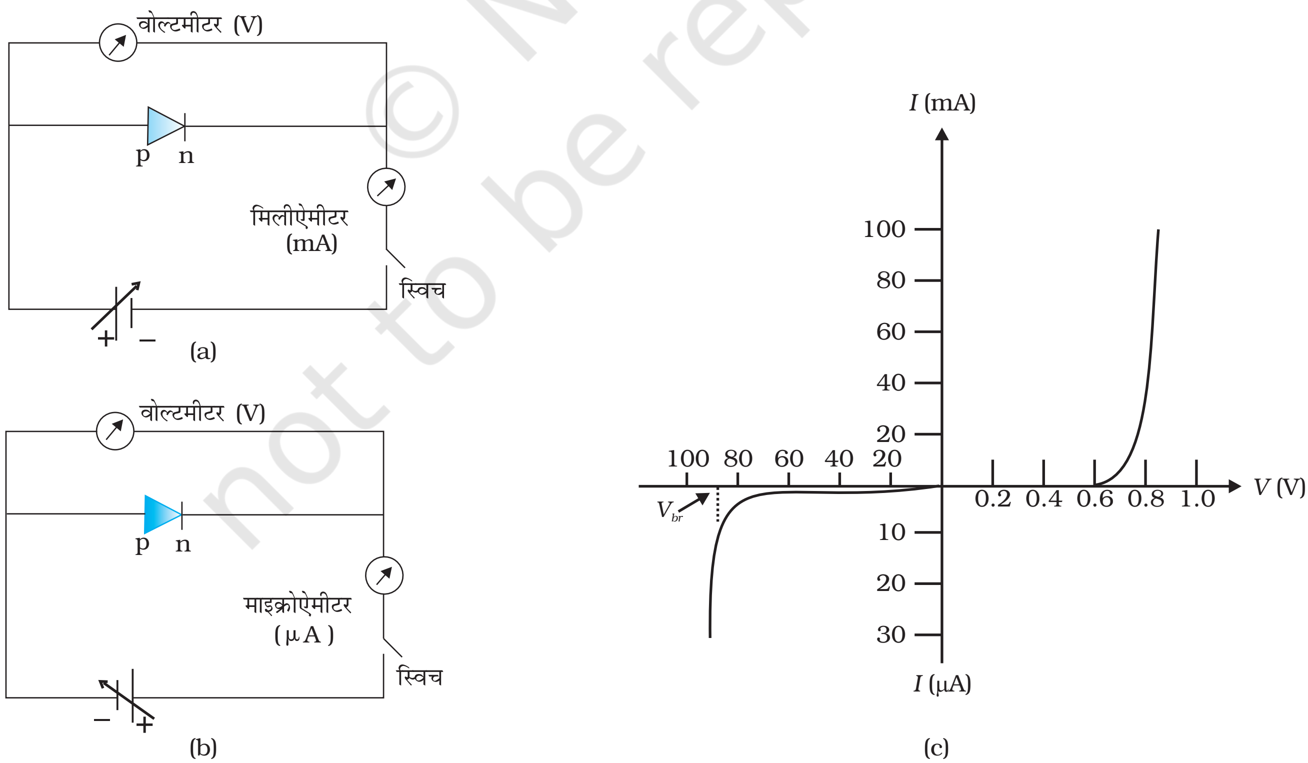


चित्र 14.15 (a) पश्चदिशिक बायस में डायोड (b) पश्चदिशिक बायस में रोधिका विभव।

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।

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।



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।

© NCERT not to be republished

Reprint 2025-26

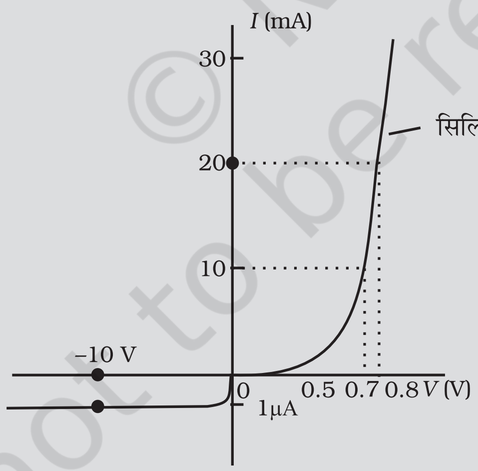
आप चित्र (14.16) में देख सकते हैं कि अग्रदिशिक बायस में आरंभ में धारा उस समय तक बहुत धीरे-धीरे, लगभग नगण्य, बढ़ती है जब तक कि डायोड पर वोल्टता एक निश्चित मान से अधिक न हो जाए। इस अभिलाक्षणिक वोल्टता के बाद डायोड बायस वोल्टता में बहुत थोड़ी-सी ही वृद्धि करने से डायोड धारा में सार्थक (चरघातांकी) वृद्धि 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:

$$r_d = \frac{\Delta V}{\Delta I} \tag{14.6}$$

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।

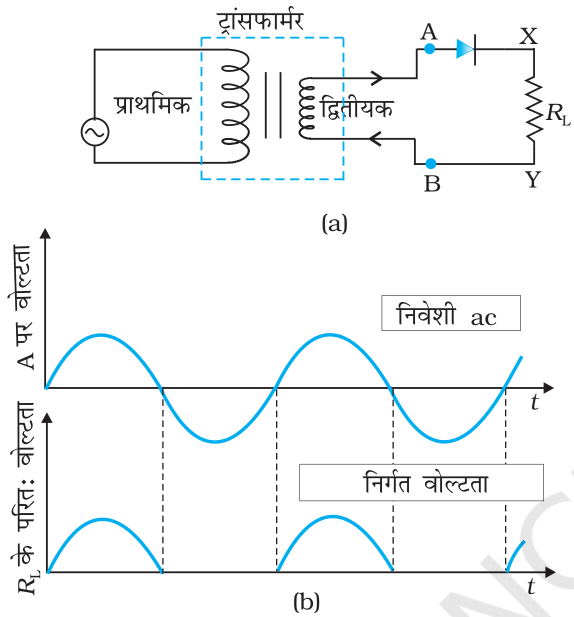
(a) वक्र से I = 20 mA, V = 0.8 V; I = 10 mA, V = 0.7 V पर
$r_{fb} = \Delta V/\Delta I$ = 0.1V/10 mA = 10 Ω

(b) वक्र से V = –10 V, I = –1 μA है
अतः
r_{rb} = 10 V/1μA= 1.0 × 10^7 Ω

उदाहरण 14.4

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।



चित्र 14.18 (a) अर्धतरंग दिष्टकारी परिपथ, (b) दिष्टकारी परिपथ से निवेशी ac और निर्गत वोल्टता के तरंग रूप।

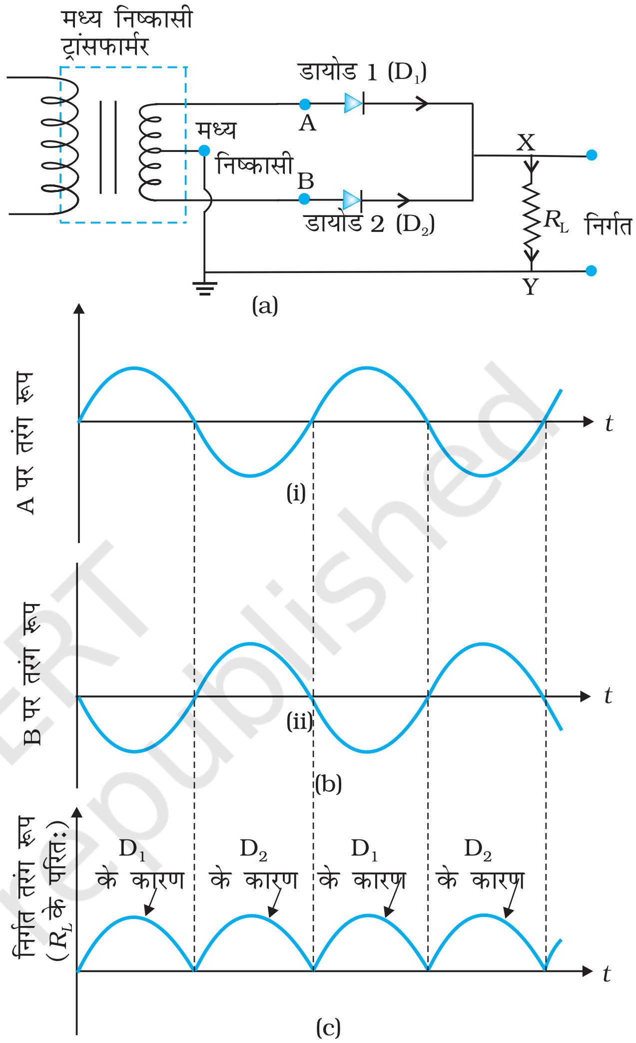
यदि डायोड के सिरों पर कोई प्रत्यावर्ती (ac) वोल्टता श्रेणीक्रम में संयोजित लोड प्रतिरोध R_L के साथ अनुप्रयुक्त की जाए तो लोड के सिरों पर केवल ac निवेश के उस अर्धचक्र में जिसमें डायोड अग्रदिशिक बायसित है, एक स्पंदमान वोल्टता दृष्टिगोचर होगी। इस प्रकार का विद्युत परिपथ चित्र 14.18 के विद्युत परिपथ में 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।)

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

© NCERT not to be republished

के अंश निष्कासी बिंदु के बीच प्राप्त निर्गत वोल्टता पूर्ण तरंग दिष्टकारी वोल्टता होती है। (ध्यान 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। अत: डायोड D_1 अग्रदिशिक बायस होकर विद्युत चालन करता है (जबकि D_2 पश्चदिशिक बायस होने के कारण चालन नहीं करता)। अत: 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 अर्ध तरंग दिष्टकारी से अधिक दक्ष परिपथ है।

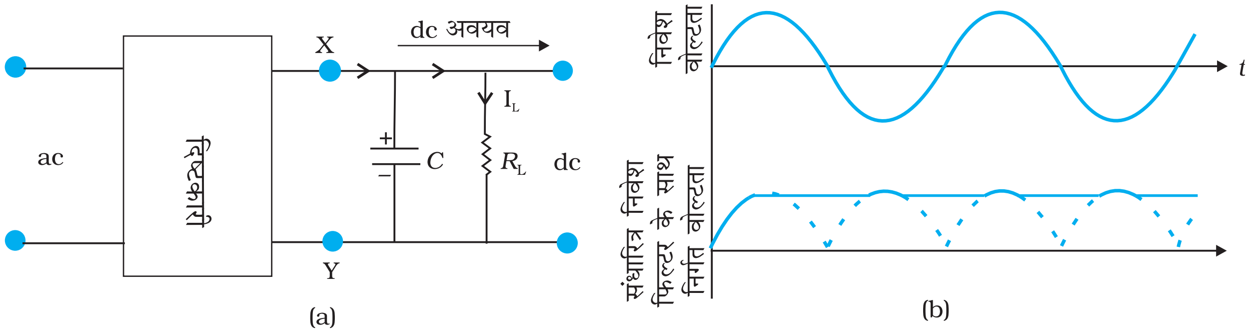


चित्र 14.19 (a) पूर्ण तरंग दिष्टकारी परिपथ; (b) A पर डायोड D_1 के और B पर डायोड D_2 के दिए गए निवेश के तरंग रूप; (c) पूर्ण तरंग दिष्टकारी परिपथ में जोड़े गए लोड R_L पर निर्गत वोल्टता का तरंगरूप।

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) सामान्यत: 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, अत: 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। अत: 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।

© NCERT not to be republished



चित्र 14.20 (a) संधारित्र फिल्टर के साथ पूर्ण तरंग दिष्टकारी, (b) में दिष्टकारी की निवेश तथा निर्गत वोल्टता।

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} Ωm) है, विद्युतरोधी पदार्थों की प्रतिरोधकता बहुत अधिक (>10^8 Ωm^{-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 $n_e n_h = n_i^2$। 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

© NCERT not to be republished

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। अतः 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।

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।

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।

Reprint 2025-26

(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 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?

© NCERT not to be republished

Reprint 2025-26