312hi25

25

विकिरण एवं द्रव्य की द्वैती प्रकृति

आपने सिनेमा घरों में फिल्में तो अवश्य ही देखी होंगी। पर्दे पर दिखने वाले चित्र/चल चित्र का निर्माण, फिल्म पर अंकित चित्रों/दृश्यों से गुज़रने वाले प्रकाश के द्वारा होता है। पर क्या आपने कभी सोचा है कि फिल्म में ध्वनि/आवाज कहाँ से उत्पन्न होती है? फिल्म के एक तरफ उपस्थित ध्वनि-पथ (ध्वनि-ट्रैक/साऊण्ड ट्रैक) में ध्वनि को भी अंकित किया जाता है। ध्वनि ट्रैक में से प्रकाश पुँज गुजर कर प्रकाश सेल पर गिरता है जो इस प्रकाश पुँज को विद्युत स्पन्दों (Pulses) में परिवर्तित कर देता है। और यही विद्युत स्पन्द ध्वनि/आवाज़ में परिवर्तित हो जाते हैं। इस पाठ में आप उस प्रभाव को पढ़ेगे, जिसके आधार पर फोटो सेल कार्य करता है। इस प्रभाव को प्रकाश विद्युत प्रभाव कहते हैं। घुसपैठियों/चोरों का पता लगाने के लिए उपयोग होने वाले ''बर्गलर अलार्म'' में भी इस प्रभाव का उपयोग होता है। आइन्सटाइन द्वारा, प्रकाश-विद्युत प्रभाव की दी गई व्याख्या ने डी-ब्रॉग्ली (De-Broglie) को तरंग-कण द्वैतता (ड्यूलिटी) अर्थात् पदार्थ तरंग के साथ-साथ कणों के गुणों को भी दर्शा सकता है, को स्वीकार करने की प्रेरणा दी।

अब आप जान चुके हैं कि कण निश्चित स्थिति, आकार, द्रव्यमान, वेग, संवेग आदि गुणों द्वारा अभिलक्षणित होता है। इन कणों की गति की व्याख्या न्यूटन के गति संबंधी नियमों द्वारा की जाती है। अब इससे हटकर तरंग को लें। यह स्थान और समय में आवर्तता, तरंग-दैर्ध्य, आयाम (एम्प्लीच्यूड), आवृत्ति, तरंग गति, आदि गुणों द्वारा अभिलक्षणित होती है। यह ऊर्जा का परिवहन करती है, पदार्थों का नही! अर्थात् तरंग स्थान में विस्तरित होती है जबकि कण स्थानिक (लोकेलाइज्ड) होते हैं। तरंग-कण द्वैतता शब्द से तात्पर्य उस व्यवहार से है जिसमें एक ही वस्तु विभिन्न परिस्थितियों में तरंग सदृश एवं कण सदृश दोनों ही गुणों का प्रदर्शन करती है। डी-ब्रॉग्ली का तर्क सरल और सीधा सा है। उसका कहना है कि प्रकृति सरलता एवं सममिति (समिट्री) को पसंद करती है। इसलिए यदि द्रव्य-तरंग की द्वैतता प्रकाश द्वारा प्रदर्शित की जा सकती है तो यह पदार्थ द्वारा भी प्रदर्शित की जानी चाहिए। डी-ब्रॉग्ली के इस द्रव्य-तरंग संबंधी विवेचनात्मक कथन की व्याख्या इस पाठ के खण्ड 25.4 में आप पढेंगे।

उद्देश्य

इस पाठ को पढ़ने के बाद, आप :

- प्रकाश-विद्युत प्रभाव को समझा सकेंगे;
- प्रकाश-विद्युत प्रभाव का अध्ययन करने के लिए प्रायोगिक व्यवस्था का विवरण दे सकेंगे;
- प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन के नियम बता सकेंगे;
- विकिरण की आवृत्ति तथा मंदक-विभव (रिटार्डेशन पोटेंशियल) के बीच ग्राफ की व्याख्या कर सकेंगे;
- संवंग p के कण के साथ सम्बद्ध डि-ब्रॉग्ली तरंग के तरंगदैर्घ्य के लिए व्यंजक लिख सकेंगे;
- डी-ब्राग्ली तरंगों के अस्तित्व के प्रमाण संबंधी प्रायोगिक व्यवस्था का विवरण दे सकेंगे।

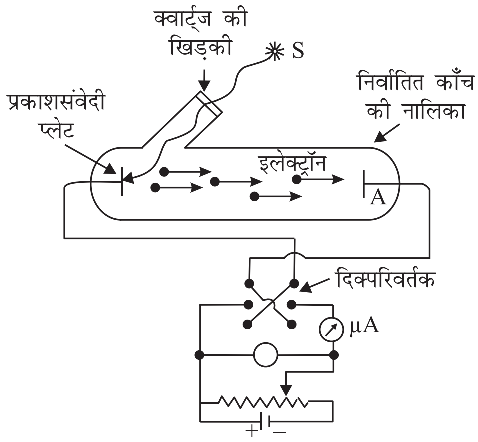
25.1 प्रकाश-विद्युत प्रभाव

सन् 1887 में वैद्युत-चुम्बकीय तरंगों के संचरण (प्रोपोगेशन) पर शोध कार्य करते हुए जर्मन के प्रोफेसर हेनरिच रूडोल्फ हर्ट्ज ने पाया कि स्पार्क (चिंगारी) गेप में मौजूद हवा बहुत अच्छे सुचालक का काम करने लगती है। खासकर तब, जब उसे अल्ट्रावायलेट (पराबैंगनी) किरणों द्वारा प्रदीप्त किया जाये। उनके द्वारा आगे चलकर और भी प्रयोग सम्पन्न किए गए जो यह प्रदर्शित करते हैं कि जिंक धनावेशित हो जाता है जब उस पर अल्ट्रावायलेट किरणें आपतित होकर उसे प्रदीप्त करती हैं। सन् 1900 में लियोनार्ड ने प्रयोग द्वारा दिखाया कि धातु प्लेट की सतह से इलेक्ट्रॉन उत्सर्जित होते हैं जब उस प्लेट पर उच्च-आवृत्ति वाली प्रकाश किरणें आपतित होती हैं। इस परिघटना को प्रकाश-विद्युत प्रभाव कहते हैं। इस प्रभाव से उत्सर्जित इलेक्ट्रॉन **फोटो इलेक्ट्रॉन** कहलाते हैं।

धातुओं को एक अभिलक्षणिक आवृत्ति वाले प्रकाश से प्रदीप्त करने पर उनसे इलेक्ट्रॉनों का उत्सर्जन प्रकाश विद्युत प्रभाव कहलाता है।

25.1.1 प्रकाश-विद्युत प्रभाव के अध्ययन की प्रायोगिक व्यवस्था

चित्र 25.1 को देखिए। यह इस परिघटना के अध्ययन के लिए प्रयुक्त उपकरण की योजनावत् आरेख को दर्शाता है।



चित्र 25.1: प्रकाश-विद्युत प्रभाव के अध्ययन करने की प्रायोगिक व्यवस्था

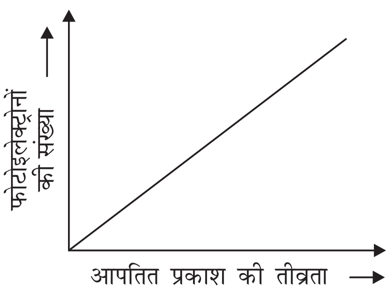
धातु का एक कप C,जिसे फोटो कैथोड कहते हैं, एक निर्वात नली में एक प्लेट A के साथ सील कर दिया जाता है। प्लेट A कैथोड द्वारा उत्सर्जित इलेक्ट्रॉनों को संग्रहित करता है। इन इलेक्ट्रोडों को एक माइक्रो $-\mu$ एमीटर (μA) परिपथ के साथ जोड़ दिया जाता है जैसा कि चित्र 25.1 में दिखाया गया है। बैटरी को इस तरह से जोड़ा जाता है कि प्लेट A की वोल्टता कप C के सापेक्ष धनात्मक होती है। यदि बैटरी के ध्रुवों को उलट दिया जाये तो प्लेट A की वोल्टता C के सापेक्ष ऋणात्मक हो जायेगी।

आपतित प्रकाश की तीव्रता का प्रभाव उत्सर्जित फोटो इलेक्ट्रॉनों की संख्या पर किस प्रकार पड़ता है, इसका अध्ययन करने के लिए प्लेट A को कप C के सापेक्ष धनात्मक विभव पर रखा जाता है।

आपतित प्रकाश की आवृत्ति एवं उसके त्वरक विभव को स्थिर रखते हुए, यह प्रेक्षित किया गया कि उत्सर्जक प्लेट की प्रति इकाई क्षेत्रफल से उत्सर्जित फोटो-इलेक्ट्रॉनों की संख्या प्रकाश की तीव्रता के समानुपाती होती है अर्थात् यह रैखिक रूप से परिवर्तित होता है जैसा कि चित्र 25.2 (a) में दर्शाया गया है।

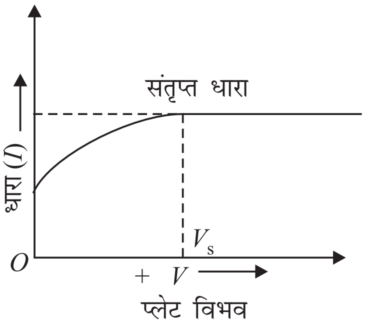
पहली स्थिति: प्लेट A कप C के सापेक्ष धनात्मक

उपरोक्त स्थिति पर विचार करने पर यह देखने में आता है कि जब एक विशेष आवृत्ति वाले प्रकाश की किरणें उत्सर्जक पर आपतित होती हैं तो उससे इलेक्ट्रॉन का उत्सर्जन शुरू हो जाता है। चूंकि प्लेट A, C के सापेक्ष उच्च विभव पर है, उत्सर्जित इलेक्ट्रॉन एक वोल्टता आकर्षण बल का अनुभव करते हैं। जब हम प्लेट A की वोल्टता बढ़ाते हैं तो उत्सर्जित फोटो इलेक्ट्रॉनों की गतिज ऊर्जा बढ़ जाती है। बाह्य परपथ में माइक्रोएमीटर द्वारा दर्शाई जा रही विद्युतधारा उत्सर्जित फोटो इलेक्ट्रॉनों की संख्या पर निर्भर करती है। यदि हम वोल्टता को



चित्र 25.2: (a) फोटो इलेक्ट्रॉनों की संख्या का प्रकाश की तीव्रता के साथ परिवर्तन

लगातार बढ़ाते रहें तो एक स्थिति ऐसी आएगी जब सारे उत्सर्जित इलेक्ट्रॉन प्लेट A पर एकत्रित हो जाएंगे। ऐसी अवस्था में विद्युतधारा संतृप्त हो जाती है। यदि प्लेट की वोल्टता को और अधिक बढ़ाया जाये तो भी विद्युतधारा का परिमाण स्थिर रहता है। प्लेट वोल्टता के सापेक्ष विद्युतधारा की निर्भरता को चित्र 25.2 (b) में दर्शाया गया है। वोल्टेज V को संतृप्त वोल्टेज कहते हैं।



चित्र 25.2 (b) प्रकाश-विद्युतधारा की विभव पर निर्भरता

द्वितीय स्थिति: प्लेट A कप C के सापेक्ष ऋणात्मक

यदि कप C, धातु प्लेट A के सापेक्ष धनात्मक विभव पर है और एक उचित आवृत्ति की प्रकाश किरण उत्सर्जक पर आपतित होती है तो C द्वारा उत्सर्जित फोटो इलेक्ट्रॉन एक मन्दक-विभव का अनुभव करेंगे जो प्लेट A की ओर उनकी गति में अवरोध उत्पन्न करेगा। फिर भी कप C से उत्सर्जित कुछ फोटो इलेक्ट्रॉन प्लेट A तक पहुंचने में सफल हो जाएंगे। यह एक विद्युतधारा को उत्पन्न करेगा जिसे माइक्रो-एमीटर द्वारा नापा जा सकता है। इस सबका क्या मतलब निकलता है? यदि A और C के बीच मौजूद विभवान्तर वही बल प्रदान करता है जिसके कारण फोटो इलेक्ट्रॉन प्लेट A की तरफ गतिशील होते हैं तो एक भी इलेक्ट्रॉन प्लेट A तक नहीं पहुंच पाता। चूंकि कुछ इलेक्ट्रॉन अवरोधक विभव पर विजय प्राप्त करके प्लेट A पर पहुंचते हैं, इससे यह निष्कर्ष निकलता है कि इन इलेक्ट्रॉनों में प्रारंभिक गतिज ऊर्जा रही होगी। प्रेक्षण भी इस बात की पुष्टि करते हैं। आपतित प्रकाश, की किसी खास आवृत्ति (फ्रिक्वेंसी) के लिए यदि अवरोधक विभव के परिमाण को धीरे-धीरे बढ़ाते जाएं तब अंत में एक स्थिति आ पहुंचती है जब कोई भी इलेक्ट्रॉन प्लेट A तक नहीं पहुंच पाता, और धारा का मान शून्य हो जाता है।

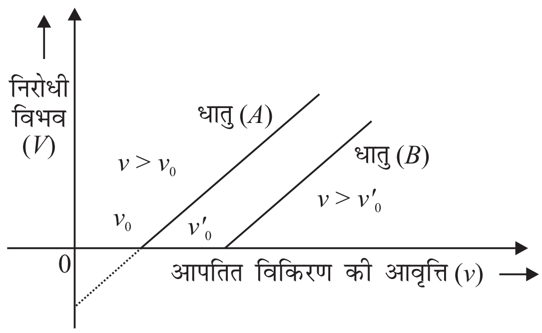
वह अवरोधक विभव जिसके लिए फोटो विद्युतधारा किसी विशिष्ट आवृत्ति वाले आपतित प्रकाश के लिए शून्य हो जाती हो, वह उस आवृत्ति के लिए निरोधी विभव कहलाता है।

निरोधी विभव V_0 के विपरीत किसी इलेक्ट्रॉन द्वारा किया गया कार्य (W) eV_0 होता है, जहाँ e इलेक्ट्रॉन का आवेश है। यह कार्य इलेक्ट्रॉन की गतिज ऊर्जा के मूल्य पर होता है। इसलिए इसे हम इस प्रकार व्यक्त कर सकते हैं–

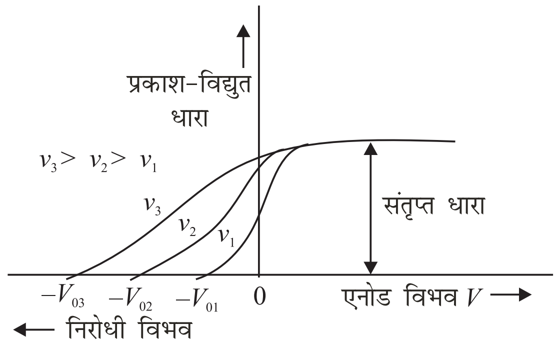
$$eV_0 = \frac{1}{2} m\upsilon_{max}^2 \qquad (25.1)$$

मिलिकन ने पाया कि निरोधी विभव V_0 आपतित प्रकाश की आवृत्ति पर निर्भर करता है। निरोधी विभव (V_0) और प्रकाश की आवृत्ति (ν) के मध्य का ग्राफ चित्र 25.3 में दर्शाया गया है। इस चित्र में आप पाएंगे कि एक सबसे कम अंतक आवृत्ति (कट-ऑफ फ्रिक्वेंसी) ν_0 होती है जिसके नीचे की आवृत्ति पर इलेक्ट्रॉनों का उत्सर्जन संभव नहीं है। इसे *देहली-आवृत्ति* (थ्रेशहोल्ड फ्रिक्वेंसी) कहते हैं।

आपतित प्रकाश की आवृत्ति का निरोधी विभव पर किस प्रकार प्रभाव पड़ता है, इसका अध्ययन करने के लिए मिलिकन ने प्रकाश की तीव्रता को विभिन्न आवृत्तियों के लिए एक स्थिर मान पर समायोजित किया और एनोड विभव के साथ प्रकाश विद्युतधारा में होने वाले परिवर्तनों का मापन किया। उसने आपतित प्रकाश की विभिन्न आवृत्तियों के लिए निरोधी-विभव के विभिन्न परिमाणों को प्राप्त किया। निरोधी-विभव अधिक आवृत्ति वाले प्रकाश के लिए अधिक ऋणात्मक विभव के होते गए जैसा कि चित्र 24.4 में दर्शाया गया है। इससे यह मतलब निकला कि यदि आपतित प्रकाश की आवृत्ति बढ़ती जाती है तो फोटो इलेक्ट्रॉन की उच्चतम गतिज ऊर्जा भी बढ़ती जाएगी। इसलिए निरोधी-विभव में भी अभिवृद्धि होना जरूरी है ताकि फोटो इलेक्ट्रॉनों को एनोड की ओर पहुंचने से पूर्ण रूप से रोका जा सके। यह प्रयोग यह भी सिद्ध करता है कि अंतक आवृत्ति (कट-ऑफ फ्रिक्वेंसी) v_0 जैसे किसी गुण का अस्तित्व है जिसके लिए निरोधी विभव शून्य हो जाएगा। इसके अलावा यह भी प्रेक्षित हुआ कि प्रकाश चाहे क्षीण ही क्यों न हो जैसे ही वह पदार्थ (उत्सर्जक) पर आपतित होता है, प्रकाश इलेक्ट्रॉन उत्सर्जन प्रारंभ हो जाता है अर्थात् प्रकाश इलेक्ट्रॉन उत्सर्जन तात्क्षणिक है। अब यह हमें ज्ञात है कि आपतित प्रकाश तथा उत्सर्जक से निकले प्रकाश इलेक्ट्रॉनों के बीच समय पश्चता (टाइम लैग) 10^{-9} सेकंड की कोटि की होती है।



चित्र 25.3: निरोधी विभव और आपतित प्रकाश की आवृत्ति



चित्र 25.4: प्रकाश-विद्युत घारा

इन प्रेक्षणों को संक्षिप्त रूप में इस प्रकार उल्लेखित कर सकते हैं:

- प्रकाशीय इलेक्ट्रॉनों का उच्चतम वेग, आपतित प्रकाश की आवृत्ति के साथ बढ़ता है तथा उत्सर्जक पदार्थ की प्रकृति पर निर्भर करता है।
- प्रकाश इलेक्ट्रॉनों का उच्चतम वेग आपतित प्रकाश की तीव्रता पर निर्भर नहीं करता है।
- प्रत्येक पदार्थ के लिए एक देहली-आवृत्ति (थ्रेशहोल्ड फ्रिक्वेंसी) होती है जिससे कम आवृत्ति पर प्रकाश इलेक्ट्रॉनों का उत्सर्जन नहीं होता।
- किसी विशिष्ट आवृत्ति वाले प्रकाश के लिए, उत्सर्जक के प्रति इकाई क्षेत्रफल से उत्सर्जित प्रकाश इलेक्ट्रानों की संख्या आपतित प्रकाश की तीव्रता के समानुपाती होती है।

- धातु की सतह पर प्रकाश के आपतित होने और प्रकाश इलेक्ट्रॉनों के उत्सर्जन के बीच व्यावहारिक रूप से कोई समय पश्चता (10^{-9} सेकंड) नहीं होती। दूसरे शब्दों में, प्रकाश इलेक्ट्रॉन उत्सर्जन एक तात्क्षणिक प्रक्रिया है।

पाठगत प्रश्न 25.1

1. स्पष्ट बताइये कि निम्नांकित कथन सत्य हैं या असत्य:

   (क) तापायनिक (थर्मिओनिक) उत्सर्जन में इलेक्ट्रॉन फोटॉनों से ऊर्जा ग्रहण करते हैं।

   (ख) प्रकाश इलेक्ट्रॉनों का अधिकतम वेग, आपतित विकिरण की आवृत्ति पर निर्भर नहीं करता है।

   (ग) एक विशिष्ट आवृत्ति (v_0) होती है जिससे कम आवृत्ति पर प्रकाश-विद्युत प्रभाव घटित नहीं होता।

2. चित्र 25.3 को देखिए। x और y अक्ष पर बनते हुए अंत:खंडों (इन्टरसेप्ट्स) की व्याख्या करते हुए प्रवणता (स्लोप) का परिकलन करें।

3. निरोधी विभव ($-V_0$) और आपतित प्रकाश की तीव्रता के बीच ग्राफ खींचिए।

25.2 आइन्सटाइन का प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन का सिद्धान्त

सन् 1905 में आइन्सटाइन ने प्रकश-विद्युत प्रभाव की एक सरल परन्तु क्रान्तिकारी व्याख्या प्रस्तावित की। उन्होंने यह परिकल्पना की कि प्रकाश ऊर्जा के छोटे-छोटे बन्डलों से मिलकर बना होता है। प्रत्येक बन्डल फोटॉन कहलाता है। उनकी अवधारणा के अनुसार प्रकाश-विद्युत प्रभाव फोटॉन तथा पृष्ठ परिबद्ध इलेक्ट्रॉन के बीच टकराव के कारण होता है।

एक फोटॉन की ऊर्जा निम्न व्यंजक द्वारा निरूपित की जाती है:

$$E = hv \qquad (25.2)$$

राबर्ट.ए.मिलिकन
(1868-1953)

राबर्ट ऐन्ड्रूज़ मिलिकन का जन्म 22 मार्च, 1868 को संयुक्त राष्ट्र अमेरिका में हुआ था। स्नातक स्तर की पढ़ाई करते समय उनके प्रिय विषय ग्रीक भाषा तथा गणित थे। सन् 1891 में स्नातक की पढ़ाई पूरी कर उन्होंने दो वर्षों तक प्रारंभिक भौतिकी के शिक्षक पद पर कार्य किया। इन्हीं वर्षों में इनकी विशेष रूचि भौतिकी के प्रति बढ़ी। सन् 1895 में उद्दीप्त सतहों द्वारा उत्सर्जित प्रकाश के ध्रुवण'' विषय पर शोध के लिए उन्हें भौतिकी में डाक्टरेट की उपाधि प्राप्त हुई।

मिलिकन ने सन् 1895–96 के दौरान एक वर्ष जर्मनी के बर्लिन एवं गाटिंगन विश्वविद्यालयों में बिताया। ए॰ ए॰ माइकेलसन के आमंत्रण पर 1896 में वह (अमेरिका) वापस लौटे। माइकेलसन के सहायक के रूप में तथा नव स्थापित शिकागो विश्वविद्यालय की रायरसन प्रयोगशाला में वह कार्यरत हुए। इसी विश्वविद्यालय में 1910 में वह प्रोफेसर पद पर नियुक्त हुए जिस पर 1921 तक वहाँ रहे। एक वैज्ञानिक के रूप में विद्युत, प्रकाशिकी एवं आण्विक भौतिकी के क्षेत्रों में उन्होंने अनेकों महत्वपूर्ण खोज की। उनकी सबसे पहली महती सफलता ''पाती–बिन्दु विधि'' (फालिंग–ड्रॉप मैथड) द्वारा इलेक्ट्रॉन के आवेश का परिशुद्ध निर्धारण थी। उन्होंने यह भी सिद्ध किया कि सभी इलेक्ट्रॉनों के लिए इस राशि का एक नियत मान है जो आवेश की क्वांटित प्रकृति को प्रदर्शित करता है।

उन्होंने आइन्सटाइन के प्रकाश–विद्युत समीकरण का प्रायोगिक सत्यापन भी किया तथा प्लांक–नियतांक h का सीधा प्रकाश–विद्युत निर्धारण भी सबसे पहले किया। जीवन पर्यन्त मिलिकन एक बहु–सृजक लेखक के रूप में अनेक प्रतिष्ठित वैज्ञानिक पत्रिकाओं में लिखते रहे। सन् 1927 में उन्हें भौतिकी में नोबेल पुरस्कार प्रदान किया गया

जहाँ v = आपतित प्रकाश की आवृत्ति तथा h = प्लांक नियतांक है। अब यह कल्पना कीजिए कि एक hv ऊर्जा का फोटॉन किसी धातु की सतह पर आपतित होता है। मान लीजिए कि ϕ_0 वह ऊर्जा है जो धातु के पृष्ठ से इलेक्ट्रॉन को बाहर जाने के लिए आवश्यक है। जैसा कि पिछले पाठ में आप पढ़ चुके हैं, इस ऊर्जा को हम किसी चालक का कार्य फलन (वर्क फंक्शन) भी कहते हैं। ***किसी चालक का कार्य फलन वह न्यूनतम ऊर्जा है जो किसी इलेक्ट्रॉन को उसके पृष्ठ से बाहर लाने के लिए आवश्यक है।***

कुछ धातुओं के कार्यफलन के प्रारूपिक (eV में) मान उनके संगत देहली–आवृति (v) के मानों के साथ सारणी 25.1 में दिए गए हैं।

सारिणी 25.1 कुछ प्रारूपिक धातुओं के कार्यफलन एवं देहली आवृत्तियाँ

धातु	ϕ_0(eV)	v (Hz)
सोडियम	2.5	6.07×10^{14}
पोटेशियम	2.3	5.58×10^{14}
जिंक	3.4	8.25×10^{14}
आयरन	4.8	11.65×10^{14}
निकल	5.9	14.32×10^{14}

अब सोचिए कि क्या होगा यदि एक फोटॉन जिसकी ऊर्जा $E\,(>\phi_0)$ है धातु की सतह के साथ टकराता है? हम उम्मीद कर सकते हैं कि फोटॉन की कुल ऊर्जा E में से ϕ_0 परिमाण की ऊर्जा इलेक्ट्रॉन के धातु के पृष्ठ से निकल कर बाहर आने में खर्च हो जाएगी। ऊर्जा का अन्तर यानी

$(E - \phi_0)$ उत्सर्जित इलेक्ट्रॉन का गतिज ऊर्जा के रूप में प्रदान कर दिया जाएगा (धातु के पृष्ठ से बाहर आने से पहले आंतरिक टक्करों के कारण इलेक्ट्रॉन की ऊर्जा में कुछ क्षति भी हो सकती है)।

गणितीय रूप से, निम्न व्यंजक को हम लिख सकते हैं:

$$h\nu = \phi_0 + K_{max} \qquad (25.3)$$

अल्बर्ट आइन्सटाइन
(1879-1955)

अल्बर्ट आइन्सटाइन वुर्तेमबर्ग, जर्मनी में 1879 को पैदा हुए थे। सन् 1901 में उन्होंने "स्विस" नागरिकता ग्रहण की। चूंकि उन्हें शिक्षक की कोई नौकरी नहीं मिल पा रही थी, उन्होंने स्विस पेटेन्ट आफिस में तकनीकी सहायक की हैसियत से नौकरी कर ली। अपनी इसी नौकरी के दौरान खाली समय में उन्होंने अत्यन्त महत्वपूर्ण शोध कार्य कर डाले जिनमें प्रकाश-विद्युत प्रभाव का सिद्धान्त तथा आपेक्षिकता का विशिष्ट सिद्धांत शामिल थे। सन् 1909 में उन्हें ज्यूरिख में असाधारण विलक्षणता का प्रोफेसर बनाया गया। वर्ष 1911 में उन्होंने प्रेग विश्वविद्यालय में भौतिकी की सैद्धान्तिक भौतिकी शाखा का प्रोफेसर पद स्वीकार किया था। परन्तु इसी प्रकार का और अधिक गरिमायुक्त पद ज्यूरिख में मिल जाने के कारण दूसरे ही वर्ष पुनः ज्यूरिख पहुंच गए। 1914 में उन्हें कैंसर विलहेम भौतिक संस्थान में निदेशक के पद पर नियुक्त किया गया। साथ ही साथ वे बर्लिन विश्वविद्यालय में प्रोफेसर के पद पर थे। सन् 1914 में उन्हें जर्मन नागरिकता प्राप्त हुई। सन् 1921 में उन्हें भौतिकशास्त्र के लिए नोबेल पुरस्कार से नवाज़ा गया। उन्हें यह पुरस्कार उनके क्रांतिकारी शोधकार्यों के लिए दिया गया जो प्रकाश-विद्युत प्रभाव के सिद्धान्त पर प्रकाशित किए गए थे। हालांकि उनकी विश्वभर में प्रसिद्धि उनके आपेक्षिकता के सिद्धांत के लिए कहीं ज्यादा रही। सन् 1933 तक वे बर्लिन में रहे इसके उपरान्त वे जर्मन नागरिकता कतिपय राजनैतिक कारणों से त्यागते हुए प्रवासी के रूप में संयुक्त राष्ट्र अमेरिका चले आए। यहाँ वे प्रिंसटन में सैद्धान्तिक भौतिकी में प्रोफेसर के पद पर नियुक्त हुए।

वे 1940 में अमेरिकी नागरिक बने। सन् 1945 में वे प्रोफेसर के पद से सेवा निवृत्त हुए। 1945-1955 के दरम्यान तथा जीवन के उत्तरार्ध में पूरा समय आपेक्षिकता के सामान्य सिद्धान्त तथा प्रमुख बुनियादी बलों का एकीकरण जैसे कार्यों पर लगाया। आइन्सटाइन ने विज्ञानयुक्त मानवीयता को विकसित और प्रोत्साहित किया। उन्होंने अमेरिकी राष्ट्रपति रूसवेल्ट को नाभिकीय बम का मानवीय विनाश में किए जाने के विरुद्ध अपना विरोध-पत्र भेजा था। उन्हें इस पृथ्वी ग्रह पर कदम रखने वाला सबसे महान वैज्ञानिक माना जाता रहा और इसी लिए उन्हें इस शताब्दी का वैज्ञानिक घोषित किया गया।

आइए, देखें कि प्रेक्षित परिणामों की व्याख्या इस सिद्धांत के आधार पर कैसे की जा सकती है। अगर हम यह मान लें कि

$$\phi_0 = h\nu_0.$$

तो समीकरण (25.3) को हम इस प्रकार लिख सकते हैं:

$$K_{max} = \frac{1}{2}mv^2 = h(\nu - \nu_o) \qquad (25.4)$$

इस समीकरण, जिसे आइन्सटाइन का प्रकाश-विद्युत समीकरण कहते हैं, निम्नलिखित निहितार्थ निकलते हैं:

- यदि ν_{max} धनात्मक होगा तो $\nu < \nu_o$ के लिए इलेक्ट्रॉन उत्सर्जन नहीं होगा। तात्पर्य यह है कि आपतित प्रकाश की आवृत्ति देहली-आवृत्ति से अधिक होनी चाहिए।
- K_{max} $(\nu - \nu_o)$ के समानुपाती होता है।
- धातु सतह पर ν आवृत्ति का जो प्रकाश आपतित हो रहा है उसकी तीव्रता (इन्टेन्सीटी) में वृद्धि करते हैं तो साथ-साथ इलेक्ट्रॉन की संख्या (फोटॉन) में भी बढ़ोत्तरी होती है। प्रत्येक फोटॉन में समान ऊर्जा रहती है और उनकी ऊर्जा में किसी प्रकार की अभिवृद्धि नहीं होती। उत्सर्जित इलेक्ट्रॉनों की संख्या बढ़ने से प्रकाश विद्युतधारा में भी वृद्धि होती है। प्रकाश की तीव्रता इस प्रकार इन दोनों में वृद्धि के कारक सिद्ध होते हैं।
- चूंकि प्रकाश-विद्युत प्रभाव फोटॉन एवं इलेक्ट्रॉन के आपस में टकराने से उत्पन्न होता है इसलिए फोटॉन से ऊर्जा का स्थानान्तरण तत्क्षणिक (इन्सटेन्टीनियस) होता है। इसमें किसी प्रकार की समय पश्चता (टाइम लेग) नहीं होती।
- चूंकि कार्यफलन पदार्थ का विशेष गुण है अत: ν_0 आवृत्ति का जो प्रकाश आपतित होता है उसकी तीव्रता से इसका कोई संबंध नहीं रहता।

इस प्रकार हम देखते हैं कि आइन्सटाइन के प्रकाश-विद्युत प्रभाव का सिद्धान्त फोटॉन की भौतिक उत्पत्ति की सफलतापूर्वक व्याख्या कर सकता है।

उपरोक्त सैद्धान्तिक अवधारणाओं को अच्छी तरह से समझने के लिए निम्नलिखित उदाहरण को सावधानीपूर्वक हल करें:

उदाहरण 25.1: सोडियम का कार्यफलन 2.3 eV है। परिकलन कीजिए (i) इसकी देहली आवृत्ति (ii) 5×10^{-7} m तरंगदैर्ध्य वाले प्रकाश द्वारा दीप्त सोडियम द्वारा उत्पन्न फोटो इलेक्ट्रॉन का अधिकतम वेग (iii) इसी तरंगदैर्ध्य के प्रकाश का निरोधी-विभव। दिया हुआ है–$h = 6.6 \times 10^{-34}$ J s, $c = 3 \times 10^8$ m s^{-1}, 1eV = 1.6×10^{-19} J, इलेक्ट्रॉन का द्रव्यमान $m = 9.1 \times 10^{-31}$ kg.

हल: (i) देहली आवृत्ति प्राप्त करने के लिए सूत्र है $h\nu_0 = \phi_0$. यहाँ $h = 6.6 \times 10^{-34}$ Js और $\phi_0 = 2.3$ eV $= 2.3 \times 1.6 \times 10^{-19}$ J.

$$\therefore \qquad \nu_0 = \frac{\phi_0}{h}$$

$$= \frac{2.3\times1.6\times10^{-19}\text{ J}}{6.6\times10^{-34}\text{ J s}} = 5.6 \times 10^{14}\text{ Hz}$$

(ii) आइन्सटाइन के प्रकाश-विद्युत समीकरण से हम जानते हैं कि

$$h\nu = \phi_0 + K_{max} = \phi_0 + \frac{1}{2} m\upsilon^2_{max},$$

चूंकि $\nu = \frac{c}{\lambda}$, इसे हम इस प्रकार से लिख सकते हैं–

$$E = h \times \frac{c}{\lambda} = \phi_0 + \frac{1}{2} \left(m\upsilon^2_{max}\right)$$

जहाँ c प्रकाश का वेग और λ इसका तरंगदैर्ध्य है। दिए गए मानों को समीकरण में भरने पर

$$\therefore \qquad E = \frac{(6.6\times10^{-34}\,\text{Js})(3\times10^{8}\,\text{ms}^{-1})}{5\times10^{-7}\,\text{m}}$$

$$= 3.96 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

$$\Rightarrow \qquad 3.96 \times 10^{-19} = 2.3 \times 1.6 \times 10^{-19} + \frac{1}{2}\, m\, \upsilon^2_{max}$$

$$= 3.68 \times 10^{-19} + \frac{1}{2}\, m\, \upsilon^2_{max}$$

$$\therefore \qquad \upsilon^2_{max} = \frac{2\times0.28\times10^{-19}}{m} = \frac{2\times0.28\times10^{-19}}{9.1\times10^{-31}}$$

$$\therefore \qquad \upsilon_{max} = \sqrt{\frac{0.56\times10^{-19}\,\text{J}}{9.1\times10^{-31}\,\text{kg}}} = 2.5 \times 10^{5}\ \text{m s}^{-1}$$

(iii) निरोधी-विभव का सूत्र है–

$$eV_0 = \frac{1}{2} m\upsilon^2_{max}$$

$$\therefore \qquad V_0 = \frac{0.28\times10^{-19}\,\text{J}}{1.6\times10^{-19}\,\text{JV}^{-1}} = 0.18\ \text{V}$$

अब आप कुछ सरल प्रश्नों का उत्तर देना चाहेंगे।

पाठगत प्रश्न 25.2

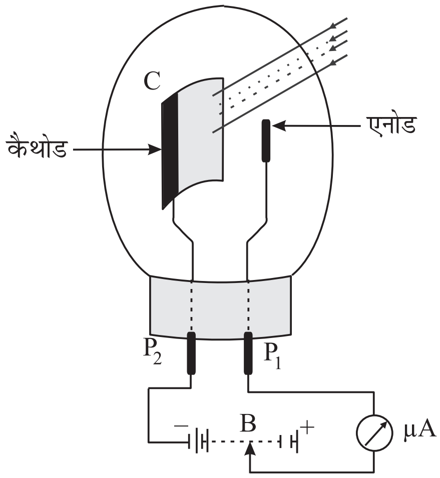
1. ν आवृत्ति वाले फोटॉन के संवेग का परिकलन कीजिए।

2. यदि किसी विद्युत-चुम्बकीय विकिरण का तरंगदैर्ध्य को दुगना कर दिया जाए तो फोटॉनों की ऊर्जा में किस प्रकार परिवर्तन होगा?

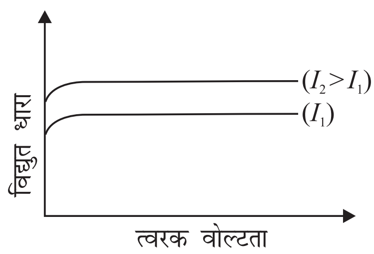
3. आपतित विकिरण की तीव्रता को दुगना कर दिया जाता है। उत्सर्जित फोटॉन की गतिज ऊर्जा पर किस प्रकार प्रभाव पड़ेगा?

25.3 प्रकाश-विद्युत नलिका

आपने अब तक विस्तार से प्रकाश-विद्युत प्रभाव को पढ़ लिया है। हम जानते हैं कि जब v_0 से अधिक आवृत्ति वाला प्रकाश किसी पदार्थ की सतह पर आपतित होता है तब इलेक्ट्रॉन का उत्सर्जन होता है। इनकी गतिज ऊर्जा भिन्न-भिन्न होती है। हम यह भी जानते हैं कि इलेक्ट्रॉन के प्रवाह से ही विद्युत धारा उत्पन्न होती है। प्रकाश विद्युत नलिका भी प्रकाश-विद्युत प्रभाव पर आधारित है।



(a)



(b)

चित्र 24.5: विद्युतधारा तथा त्वरक वोल्टता के बीच संबंध का ग्राफ

प्रकाश-विद्युत नलिका में एक निर्वातित कांच का पात्र होता है जिसमें एक अर्ध-बेलनाकार कैथोड तथा सीधे तार के रूप में एक एनोड होता है। कैथोड पर ऐसे धातु का लेपन होता है जिसका कार्य फलन बहुत कम होता है। इससे यह सुनिश्चित हो जाता है कि पूर्व-निर्धारित आवृत्ति वाले प्रकाश को आपतित करने पर फोटो-इलेक्ट्रॉनों का उत्सर्जन होगा। वह देहली आवृत्ति जिसके ऊपर प्रकाश-विद्युत नलिका कार्य करती है, इस लेप के चयन को निर्धारित करती है।

ऐनोड सामान्यत: निकल धातु या प्लेटिनम का बना होता है। विद्युत कनेक्शन P_1 और P_2 इस काँच के पात्र के पृष्ठ पर बाहर तक आते हैं। कैथोड एवं एनोड के बीच एक बैटरी तथा धारामापी को जोड़ दिया जाता है ताकि त्वरण के लिए वोल्टता दी जा सके। बैटरी पर तीर का निशान इस तथ्य को प्रकट करता है कि इसके द्वारा अनुप्रयुक्त वोल्टता को बदला जा सकता है। विद्युत परिपथ में लगा माइक्रोएमीटर प्रवाहित होने वाली विद्युत धारा को नाप सकता हैं [चित्र 25.5 (a)]।

प्रकाश-विद्युत नलिका की कार्य प्रणाली को समझने के लिए मान लीजिए कि देहली-आवृत्ति से उच्च आवृत्ति का प्रकाश कैथोड पर आपतित होता है। कैथोड और एनोड के बीच त्वरित विभव शून्य होने के बावजूद भी कुछ फोटो इलेक्ट्रॉन उत्सर्जित होंगे। जैसा कि आप जान चुके हैं कि ये इलेक्ट्रॉन कैथोड से एक निश्चित गतिज ऊर्जा से उत्सर्जित होकर एनोड तक पहुँचते हैं। इससे एक विद्युत धारा उत्पन्न होती है जिसे माइक्रो एमिटर इंगित करता है। आइए अब हम कुछ त्वरक वोल्टता का प्रयोग करें और देखें कि क्या होता है। स्पष्ट है कि कुछ अधिक इलेक्ट्रॉन एनोड तक पहुंचेंगे और इससे विद्युत धारा का परिणाम बढ़ेगा। इसे चित्र 25.5 (b) में दर्शाया गया है।

जैसे-जैसे हम कैथोड और एनोड के बीच वोल्टता बढ़ाते जाते हैं, प्रकाश-विद्युत नलिका में विद्युत धारा भी बढ़ती जाएगी। परन्तु उच्च वोल्टता पर यह विद्युत धारा एक स्थिर मान पर संतृप्त हो जाती है। इसे चित्र 25.5(b) में दर्शाया गया है। संतृप्त धारा आपतित प्रकाश की तीव्रता (I) द्वारा निर्धारित होती है। संतृप्त धारा का परिमाण नैनो-एम्पियर ($\sim 10^{-9}$ A) की कोटि का होता है। यह प्रेक्षित किया गया है कि यदि प्रकाश की तीव्रता बढ़ा दी जाए तो संतृप्त धारा भी बढ़ जाती है। इसे चित्र 25.5 (b) में दर्शाया गया है।

25.3.1 अनुप्रयोग

प्रकाश-विद्युत नलिका उन सभी प्रकार की प्रक्रियाओं में अत्यन्त उपयोगी सिद्ध हुई है जहाँ प्रकाश-ऊर्जा को तुल्यात्मक विद्युत धारा में रूपान्तरित करना पड़ता है।

(i) चल चित्रों में ध्वनि का पुनरोत्पादन (रिप्रोडक्शन) प्रकाश-विद्युत सेलों का सबसे महत्वपूर्ण उपयोग फिल्मों से ध्वनि का पुनरोत्पादन करना है। ध्वनि-पट्टी एक समान चौड़ाई की फिल्म होती है जिसकी तीव्रता श्रव्य आवृत्ति के अनुसार बदलती रहती है। प्रकाश को इस फिल्म से गुजारने के पश्चात् प्रकाश-विद्युत सेल के कैथोड पर गिराया जाता है। प्रकाश-विद्युत सेल के परिपथ में उत्पन्न विद्युतधारा श्रव्य आवृत्ति के अनुपात में होती है तथा धारा में परिवर्तन भी श्रव्य आवृत्ति में हुए परिवर्तनों के अनुसार होते हैं। इस उत्पन्न हुई वोल्टता को तब एक प्रतिरोध से होकर गुजारा जाता है। प्रतिरोध के दोनों सिरों के बीच उत्पन्न वोल्टता को उपयुक्त ढंग से प्रवर्धित किया जाता है और इसे फिर एक लाउड-स्पीकर में भेज दिया जाता है। लाउड-स्पीकर उसी प्रकार की ध्वनि का पुनरोत्पादन करता है जिसे फिल्म की ध्वनि पट्टी पर रिकार्ड किया गया था। आप इसके बारे में और विस्तार से जान पाएंगे जब फोटोग्राफी और ऑडियो वीडियो-रिकार्डिंग के वैकल्पिक माड्यूल पर चर्चा होगी।

(ii) लम्बी दूरी तक चित्रों का संप्रेषण: प्रकाश-विद्युत नलिकाओं का उन प्रणालियों में भी उपयोग किया जाता है जो चित्रों को लम्बी दूरी तक संप्रेषित कर सके। लम्बी दूरियों तक चित्रों को संप्रेषित करने की तकनीक को प्रकाश-टेलीग्राफी कहते हैं।

(iii) अन्य उपयोग: वस्तुओं अथवा सजीव प्राणियों की गणना करने के लिए प्रयुक्त कई प्रकार की प्रणालियाँ प्रकाश-विद्युत नलिका पर ही आधारित होती हैं। इनका उपयोग चोर-घंटियों, अग्नि-सूचक घंटियों, ट्रैफ्रिक नियम का उल्लंघन करने वालों की पहचान के लिए प्रयुक्त संसूचकों, टेलीविजन कैमरों में, स्केनिंग और प्रसारण तथा उद्योगों में धातु की शीटों में विद्यमान सूक्ष्म त्रुटियों अथवा छिद्रों का पता लगाने के लिए भी होता है।

पाठगत प्रश्न 25.3

1. बताइये कि निम्न कथन सत्य है या असत्य?

   (अ) प्रकाश-इलेक्ट्रॉन नलिका में कैथोड को एनोड के सापेक्ष धनात्मक रूप से बायसित किया जाता है।

(ब) प्रकाश-इलेक्ट्रॉन में संतृप्त धारा आपतित विकिरण की आवृत्ति पर निर्भर करती है।

(स) प्रकाश-इलेक्ट्रॉन डायोड में संतृप्त धारा आपतित प्रकाश की तीव्रता के साथ बढ़ती है।

2. प्रकाश-इलेक्ट्रॉन नलिका के तीन अनुप्रयोगों को बताइये।

3. फोटो-ट्यूब को एक छोटे प्रकाश स्रोत, जो उससे 100 cm दूरी पर रखा है, प्रदीप्त किया जाता है। यदि स्रोत को 50 cm पर रख दिया जाए तो फोटो-ट्यूब के अन्दर कैथोड से उत्सर्जित होने वाले इलेक्ट्रॉनों की संख्या पर क्या प्रभाव पड़ेगा।

इस पाठ के पिछले खण्ड में आपने आइन्सटाइन के प्रकाश-विद्युत प्रभाव के बारे में पढ़ा तथा यह भी पढ़ा कि प्रकाश फोटॉनों से बना होता है आपने यह भी पढ़ा कि व्यतिकरण और विवर्तन (डिफ्रेक्शन) की परिघटनाओं को प्रकाश के तरंग सिद्धान्त के आधार पर समझाया जा सकता है। प्रकाश की द्वैती प्रकृति को 20वीं सदी के प्रारंभ में भौतिकीविदों ने स्वीकृति प्रदान की। प्रकाश की द्वैती प्रकृति पर विचार करते हुए डी-ब्राग्ली ने स्वयं से प्रश्न किया: यदि प्रकाश द्वैती प्रकृति का प्रदर्शन करता है तो क्या पदार्थ कण भी तरंगों जैसा व्यवहार करेंगे? इस प्रश्न के सही समाधान ने ही डि-ब्रॉग्ली की परिकल्पना को जन्म दिया।

25.4 डि-ब्रॉग्ली की परिकल्पना

एक युवा स्नातक विद्यार्थी के रूप में डि ब्रॉग्ली ने गहन अंतर्दृष्टि के साथ तर्क रखा कि जब प्रकृति में सममितता होती है, प्रकृति अपने सभी भौतिक परिघटनाओं में सादगी और समरूपता को पसन्द करती है तब साधारण कण जिसे हम इलेक्ट्रॉन और प्रोटॉन कहते हैं, वे भी तरंग की विशेषताओं को किसी खास परिस्थिति में प्रदर्शित करेंगे। डि-ब्रॉग्ली का तर्क कुछ इस प्रकार था–प्रकाश एक विद्युत-चुम्बकीय विकिरण है और वह कण-तरंग द्वैतवाद को दर्शाता है। इसलिए आइन्सटीन का द्रव्य-ऊर्जा समतुल्यता का संबंध ($E = mc^2$) जो प्रकाश को फोटॉन के क्वान्टम के रूप में मानता है तभी मान्य होगा यदि पदार्थ भी तरंगवत व्यवहार करे। डि-ब्रॉग्ली ने प्रस्ताव रखा कि किसी कण-द्रव्य का तरंगदैर्ध्य एवं आवृत्ति का निर्धारण उनके संवेग (मोमेन्टम) तथा कण की ऊर्जा द्वारा किया जाना चाहिये ठीक उसी तरह जिस तरह फोटॉन का किया जाता है: ($E = pc$) और p संवेग वाले किसी कण के साथ संबद्ध तरंगदैर्ध्य λ को हम इस प्रकार लिख सकते हैं :

$$\lambda = \frac{h}{p} \tag{25.5}$$

चूंकि ऐसे कण का संवेग $p = mv$ सूत्र द्वारा दिया जाता है, हम लिख सकते हैं

$$\lambda = \frac{h}{mv} \tag{25.6}$$

टिप्पणियाँ

λ को डि-ब्रॉग्ली तरंगदैर्ध्य कहते हैं। समीकरण (25.5) तरंग-कण द्वैती की पूर्णरूप से व्याख्या करता है। इसका निहितार्थ यह है कि एक कण जिसका संवेग p है, वह तरंग-जैसे गुणधर्म दर्शा सकता है और उसके साथ संबद्ध पदार्थ तरंगों का तरंगदैर्ध्य $\lambda = (h/p)$ है। इसका विलोम भी सत्य है अर्थात् λ तरंगदैर्ध्य वाली कोई तरंग कण जैसे गुण दर्शा सकती है और तरंग-पदार्थ का संवेग h/λ है।

डि-ब्रॉग्ली की पी.एच.डी थीसिस में यही परिकल्पना थी जिसे परीक्षकों द्वारा पहले अस्वीकृत कर दिया गया था। शीघ्र ही प्रायोगिक साक्ष्य द्वारा डी-ब्रॉग्ली की परिकल्पना सत्य सिद्ध हुई। इससे हम सबको एक प्रेरणात्मक सीख लेनी चाहिए: हमें प्रत्येक कथन का गंभीरता के साथ विश्लेषण करना चाहिए तथा उसके प्रयोगात्मक साक्ष्य को खोजना चाहिए।

किसी भी स्थूल वस्तु का वास्तविक तरंगदैर्ध्य अत्यल्प होता है। आप चाहें तो क्रिकेट की गेंद के लिए इसकी गणना करके देख सकते हैं। परन्तु मूल कणों जैसे कि इलेक्ट्रॉन के लिए एकदम भिन्न स्थिति है। जब इसे विभावांतर V से त्वरित किया जाता है तो इसकी ऊर्जा E होती है। अत: हम लिख सकते हैं–

$$\frac{1}{2}mv^2 = qV \qquad (25.7)$$

या

$$v = \sqrt{\frac{2qV}{m}}$$

ताकि

$$mv = p = \sqrt{2qmV} \qquad (25.8)$$

इस परिमाण को समीकरण (25.5) के साथ मिलाने पर डी.ब्रॉग्ली तरंगदैर्ध्य को हम इस प्रकार व्यक्त कर सकते हैं

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2qmV}} \qquad (25.9)$$

समीकरण (25.9) में आने वाले स्थिरांकों के मान है : $h = 6.625 \times 10^{-34}$ Js, $q = 1.602 \times 10^{-19}$ C और $m = 9.11 \times 10^{-31}$kg। इन मानों को समीकरण (25.9) में रखने पर हम पाते हैं कि

$$\lambda = \frac{6.625\times10^{-34}\,\text{Js}}{\sqrt{2\times(1.602\times10^{-19}\,\text{C})\times(9.11\times10^{-31}\,\text{kg})}\times\sqrt{V}}$$

$$= \frac{12.3}{\sqrt{V}}\times10^{-10}\,\text{m}$$

$$= \frac{12.3}{\sqrt{V}}\ \text{Å} \qquad (25.10)$$

इससे यह परिणाम निकलता है कि यदि एक इलेक्ट्रॉन को 100V के विभवांतर से त्वरित किया जाए तो इसका तरंदैर्ध्य होगा

$$\lambda = \frac{12.3}{\sqrt{100}} \text{Å} = 1.23 \text{ Å}$$

100V ऊर्जा वाले इलेक्ट्रॉन के तरंगदैध्यर्ध का भी यही मान है। निम्नलिखित समीकरण के प्रयोग द्वारा इसका आप आसानी से सत्यापन कर सकते हैं

$$\lambda = \frac{h}{(2meE)^{1/2}}$$

100eV ऊर्जा के इलेक्ट्रॉनों के साथ संबंध द्रव्य तरंगों का तरंगदैर्ध्य एक्स-किरण परिसर में होता है और यह किसी ठोस के अंतरापरमाणुक पृथक्करण की कोटि का होता है। इसलिए हम उम्मीद कर सकते हैं कि क्रिस्टल जालक द्वारा उनमें विवर्तन (डिफ्रेक्शन) उत्पन्न हो सकता है।

पदार्थ तरंगों का सबसे प्रथम प्रायोगिक साक्ष्य डेविसन और जर्मर के कार्यों द्वारा प्राप्त हुआ। ये दोनों क्रिस्टल द्वारा इलेक्ट्रॉनों के प्रकीर्णन का अध्ययन कर रहे थे। आइए अब इसके बारे में जानें।

लुई विक्टर डि ब्रॉग्ली
(1892-1987)

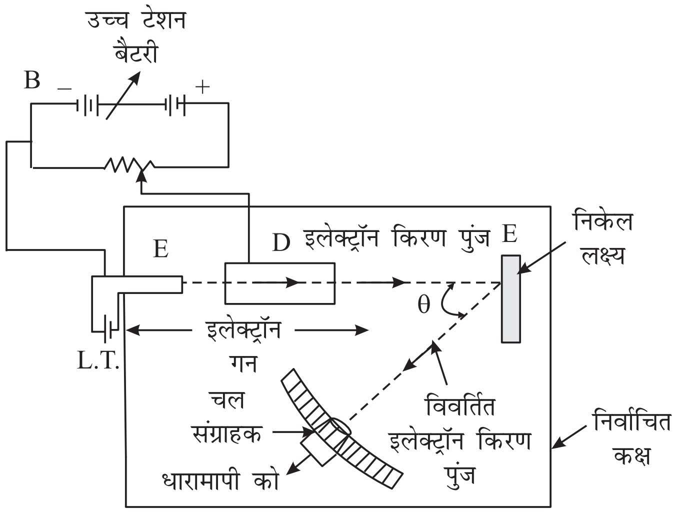
लुई डि ब्रॉग्ली का जन्म 15 अगस्त 1992 को फ्रांस के दीपे (Diepe) नामक स्थान में हुआ था। इन्होंने पहले कला विषयों का अध्ययन किया और 1910 में इतिहास में डिग्री ली। चूंकि उनकी अभिरूचि एवं रूझान विज्ञान के प्रति थी उन्होंने विज्ञान की डिग्री के लिए अध्ययन किया। यह डिग्री उन्हें 1913 में प्राप्त हुई। सन् 1924 में इन्होंने पेरिस विश्वविद्यालय के विज्ञान संकाय में अपना शोध-प्रबंध जमा किया जिस पर उन्हें डाक्टरेट की उपाधि प्राप्त हुई। शोध-प्रबंध का शीर्षक था–''क्वान्टम सिद्धान्त पर शोध''। इस शोध-प्रबंध में कई महत्वपूर्ण परिणाम दिए गए थे जिन्हें उन्होंने लगभग दो वर्ष की अवधि में प्राप्त किए थे। जिन अवधारणाओं को शोध-प्रबंध में सम्मिलित किया गया था वे ही आगे चलकर **तरंग-यांत्रिकी** के विकास में सहायक हुईं। यह सिद्धान्त परमाणु स्तर की भौतिक परिघटनाओं संबंधी हमारी समझ में क्रांतिकारी परिवर्तन लाया।

डि-ब्रॉग्ली को 1929 में इलेक्ट्रॉनों की तरंग-प्रकृति की उनकी खोज के लिए नोबेल पुरस्कर दिया गया।

25.4.1 डि-ब्रॉग्ली तरंगों के अस्तित्व का प्रायोगिक सत्यापन

चित्र 25.6 में डेविसन और जर्मर द्वारा बनाई गई प्रायोगिक व्यवस्था को दर्शाया गया है। इस व्यवस्था में एक तन्तु (F) होता है जो इलेक्ट्रॉन-स्रोत का कार्य करता है। इससे उत्सर्जित इलेक्ट्रॉनों को धात्विक डायाफ्रामों के एक समुच्चय से होकर गुजारा जाता है। इस डायफ्राम

में कई झिरियाँ होती हैं। फिलामेन्ट E से उत्सर्जित इलेक्ट्रॉन विभिन्न दिशाओं में बाहर निकलते हैं। धात्विक डायाफ्राम इन इलेक्ट्रॉनों को समान्तर करने का कार्य करते हैं। केवल वे ही इलेक्ट्रॉन जो डायाफ्राम में बनी झिरियों से होकर गुजर सकते हैं, बाहर निकल सकते हैं। ध्यान दीजिए कि इलेक्ट्रॉनों के समान्तर पुंज की ऊर्जा को त्वरक वोल्टता के परिमाण को नियंत्रित करके परिवर्तित किया जा सकता है। इस व्यवस्था में संसूचक *DT* भी होता है जिसे निकेल क्रिस्टल के अभिलंब के सापेक्ष किसी भी कोण पर रखा जा सकता है। यह संसूचक परावर्तित किरण पुंज की तीव्रता को माप सकता है। ध्यान दीजिए कि निकेल के चयन में कोई विशेष बात नहीं है।



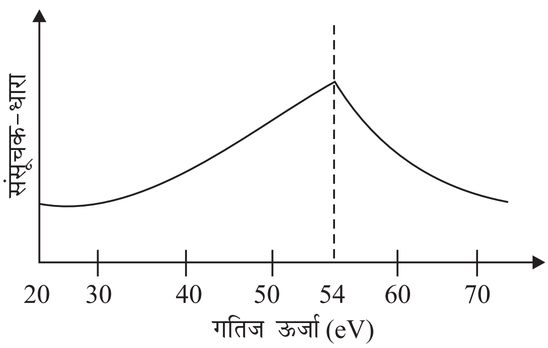
चित्र 25.6: द्रव्य-तरंगों के अस्तित्व के सत्यापन हेतु प्रायोगिक व्यवस्था।

चित्र 25.7 में संसूचक धारा और आपतित इलेक्ट्रॉन की गतिज ऊर्जा के बीच ग्राफ को $\theta = 50^\circ$ के लिए ऊर्जा दर्शाया गया है। ग्राफ से आप देख सकते हैं कि संसूचक धारा 50 eV गतिज ऊर्जा वाले इलेक्ट्रॉनों के लिए उच्चिष्ठ का प्रदर्शन करता है। यदि आप समीकरण 25.9 के आधार पर इन इलेक्ट्रॉनों के तरंगदैर्ध्य का परिकलन करें तो आपको निम्न परिणाम प्राप्त होगा।

$$\lambda = \frac{6.62\times10^{-34}\,\text{Js}}{[2\times(9.1\times10^{-31}\,\text{kg})\times54\times1.6\times10^{-19}\,\text{J}]^{1/2}}$$

$$= 1.67\ \text{Å}$$

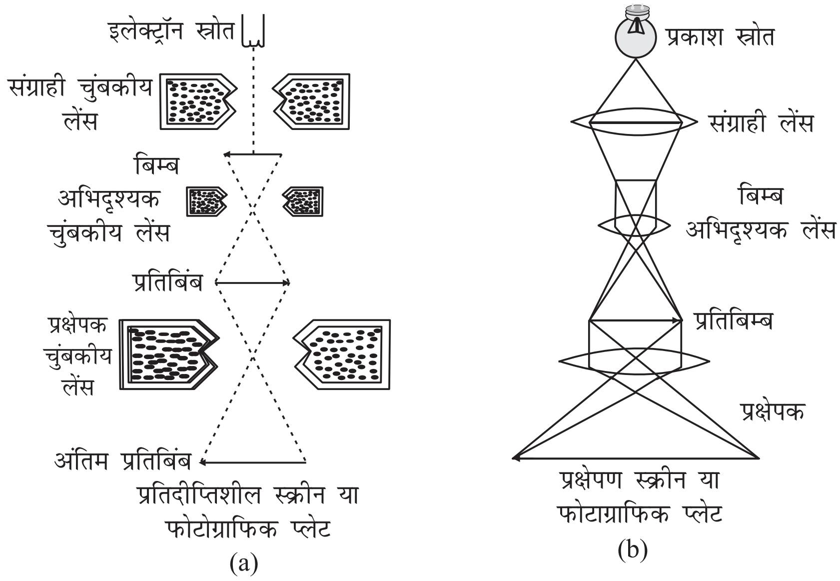
ब्रैग विवर्तन समीकरण $2d\sin\theta = n\lambda$ के आधार पर भी हमें यही मान प्राप्त होता है। अत: डेविसन एवं जर्मर का प्रयोग डी ब्रॉग्ली तरंगों के अस्तित्व का स्पष्ट प्रमाण है।



चित्र 25.7: संसूचक धारा और इलेक्ट्रॉनों की गतिज ऊर्जा के बीच ग्राफ

25.4.2 डि-ब्रॉग्ली तरंगों के अनुप्रयोग

हम जाने चुके हैं कि सूक्ष्मतम परिमाण के तरंगदैर्ध्य को इलेक्ट्रॉन की गतिज ऊर्जा को बढ़ाकर प्राप्त किया जा सकता है। 23वें पाठ के अन्तर्गत आपने पढ़ा था कि प्रकाशीय सूक्ष्मदर्शी की विभेदन क्षमता प्रकाश के तरंगदैर्ध्य पर निर्भर करती है। वस्तुत: तरंगदैर्ध्य को कम करने से सूक्ष्मदर्शी की विभेदन क्षमता बढ़ती है। क्या आप अनुमान लगा सकते हैं कि यदि फोटॉनों के स्थान पर अति ऊर्जायुक्त इलेक्ट्रॉन पुंज का प्रयोग किया जाए तो क्या होगा? स्पष्ट है कि इलेक्ट्रॉनों के साथ संबद्ध डि-ब्रॉग्ली तरंगदैर्ध्य को कम कर देने से आपको सूक्ष्मदर्शी से अति उच्च विभेदन और आवर्धन प्राप्त होगा। इस तकनीक का प्रयोग इलेक्ट्रॉन सूक्ष्मदर्शी में किया जाता है। डि-ब्रॉग्ली तरंगों का यह सबसे उत्तम अनुप्रयोग है। चित्र 25.8 में इलेक्ट्रॉन सूक्ष्मदर्शी तथा प्रकाशीय सूक्ष्मदर्शियों की संरचनाओं एवं कार्य-प्रणाली को तुलनात्मक रूप से प्रदर्शित किया गया है।



चित्र 25.8 : (a) इलेक्ट्रॉन सूक्ष्मदर्शी (b) प्रकाशीय सूक्ष्मदर्शी

डेविसन और जर्मर के प्रयोग की कहानी

जर्मर ने अपने नोटबुक में यह अंकित किया था कि उसने निर्वात ट्रेप में (जो कि इलेक्ट्रॉनों को प्रकीर्णित करने का उपकरण है) कुछ दरारों को (क्रेक्स) ढूंढ लिया है (ता. 5 फरवरी 1925) जर्मर तब क्लिंटन डेविसन के साथ न्यूयार्क (यू. एस.ए.) के वेस्टर्न इलेक्ट्रिक संस्था में काम करते थे। वैसे यह कोई पहली बार नहीं था जब उनका उपकरण टूटा हो, और न ही यह पहली बार था जब अपने बेशकीमती निकेल क्रिस्टल को उन्होंने दोबारा उपयोग में लाने योग्य बनाया हो।

टिप्पणियाँ

उनके प्रयोग में इस प्रकार की टूट-फूट और फिर उनका ठीक-ठाक मरम्मत करना, यह सिलसिला कई बार चलता रहा। परन्तु टूटने की और मरम्मत करने की परिणति के रूप में इस क्रिया का महत्त्वपूर्ण योगदान इलेक्ट्रॉन के विवर्तन की खोज से हुआ। प्रयोग का जो उपकरण 5 फरवरी 1925 में क्षतिग्रस्त हुआ था उसकी मरम्मत अप्रैल 1925 में पूरी हुई और उस ट्यूब को पुनः प्रयोग में लाया जा सका। आने वाले सप्ताहों में जब प्रयोग पुनः शुरू किए गए तो उन्हें वैसे ही परिणाम मिले जो 4 वर्ष पूर्व मिले थे। तब अचानक मई 1925 के मध्य में अप्रत्याशित परिणाम आने शुरू हुए। इससे परेशान डेविसन एवं जर्मर ने प्रयोग को कुछ दिनो के लिए स्थगित कर दिया। उन्होंने ट्यूब को काट-छांटकर उस निकेल लक्ष्य की जांच की जिसपर प्रकीर्णित इलेक्ट्रॉन लम्बवत् टकराते थे। जांच इसलिए भी जरूरी थी ताकि जो अप्रत्याशित परिणाम मिल रहे थे उनके कारण का कोई सुराग ढूंढ़ा जा सके। उन्होंने निकल क्रिस्टल की जांच की तो यह पाया–बहुफलक वाले ''क्रिस्टल निकेल'' की रूपरेखा (मोरफोलोजी) में बदलाव आ गया है। शायद बहुत ज्यादा गरम तापक्रम पर दस फलक (टेन फेसेट्स) वाला क्रिस्टल बन गया था। डेविसन और जेमर ने सोचा कि जो अप्रत्याशित परिणाम आ रहे थे उसका कारण संभवतः टारगेट निकल क्रिस्टल के बाह्य रूपरेखा में बदलाव के कारण प्रकीर्णित इलेक्ट्रॉन का पैटर्न भी बदलने से होगा। दूसरे शब्दों में उन्होंने यह निष्कर्ष निकाला कि क्रिस्टल के अन्दर परमाणुओं का विन्यास (अरेन्जमेन्ट) बदला होगा ना कि परमाणु संरचना जिसके कारण प्रकीर्णन का पैटर्न बदल गया।

1926 के ग्रीष्मकाल में डेविसन अपनी पत्नी के साथ अपने रिश्तेदारों से मेल-मुलाकात करने इंग्लैंड गए थे। इस यात्रा में कुछ यादगार घटना होनी थी। उन दिनों सैद्धान्तिक भौतिकी में मूलभूत परिवर्तन हो रहे थे। इन सभी पेपरों पर बड़ी ही जीवन्त बहस एवं परिचर्चा ब्रिटिश एसोसिएशन फार एडवान्समेन्ट आफ साइन्स द्वारा आक्सफोर्ड में की जा रही थी। डेविसन जो अपने शोधकार्य के क्षेत्र में होनेवाले समकालीन विकास से तो अपने को अवगत रखते थे परन्तु क्वांटम यांत्रिकी के क्षेत्र में जानकारियों से अनभिज्ञ थे। उनके आश्चर्य की सीमा नहीं रही जब इस मीटिंग में डेविसन की उपस्थिति में बॉन नामक वैज्ञानिक ने पेपर पढ़ा जिसमें डेविसन (1923) और कसमान (प्लेटिनम टारगेट) ग्राफ को डि-ब्रॉग्ली के द्रव्य-तरंग के अस्तित्व को सिद्ध करने के लिए ठोस सबूत के रूप में उद्घृत किया गया।

डेविसन 1937 के नोबल पुरस्कार में जी.पी. थॉमसन (जे. जे.थॉमसन के पुत्र) के साथ सहभागी थे।

उदाहरण 25.2: एक इलेक्ट्रॉन को 182V विभवान्तर से त्वरित किया गया। उसके सहचरी तरंगदैर्ध्य का परिकलन कीजिए।

हल: हम जानते हैं कि डि-ब्रॉग्ली द्रव्य तरंगदैर्ध्य $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{12.3}{\sqrt{V}}$ Å. यहाँ $V = 182$V.

$$\lambda = \frac{12.3}{\sqrt{182}} \text{Å} = \frac{12.3}{13.5} = 0.91\text{Å}$$

टिप्पणियाँ

उदाहरण 25.3: 10^{15}Hz आवृत्ति का प्रकाश एक जिंक प्लेट पर आपतित होता है। उत्सर्जित होने वाले फोटो इलेक्ट्रॉनों की अधिकतम गतिज ऊर्जा का परिकलन कीजिए। जिंक का कार्य फलन 3.4 eV है।

हल: आइन्सटाइन के संबंध का प्रयोग करने पर

$$h\nu = \phi_0 + K_{max}$$

इस प्रश्न में $h = 6.625 \times 10^{-34}$ Js, $\nu = 10^{15}$ Hz, $E = h\nu = 6.625 \times 10^{-34} \times 10^{15} = 6.625 \times 10^{-19}$ J और $\phi_0 = 3.4$ eV $= 3.4 \times 1.602 \times 10^{19}$J $= 5.4468 \times 10^{-19}$ J

$$\therefore \quad K_{max} = E - \phi_0$$
$$= (6.625 - 5.447) \times 10^{-19} \text{J}$$
$$= 1.178 \times 10^{-19} \text{ J}$$

पाठगत प्रश्न 25.4

1. स्पष्ट कीजिए कि निम्नलिखित कथन सत्य है या असत्य:

   (अ) डि-ब्रॉग्ली के अनुसार स्थिर कणें द्वारा तरंग सदृश गुण दर्शाए जाते हैं।

   (ब) द्रव्य तरंगे वही हैं जिन्हें हम डि-ब्रॉग्ली तरंग कहते हैं।

   (c) इलेक्ट्रॉनों के साथ संबद्ध डि-ब्रॉग्ली तरंगदैर्ध्य को कम करने पर, ऊर्जायुक्त इलेक्ट्रॉनों का प्रयोग करने वाली सूक्ष्मदर्शी से अत्यल्प विभेदन प्राप्त होता है।

2. टेबिल पर 50 g वजन की एक गेंद लुढ़क रही है जिसकी चाल 20 cm s^{-1} प्रति सेकंड है। इसका सहचारी तरंगदैर्ध्य कितना होगा? दिया गया है $h = 6.625 \times 10^{-34}$ Js.

3. क्रिकेट बॉल के साथ संबद्ध डि-ब्रॉग्ली तरंगदैर्ध्य का हम क्यों प्रेक्षण नहीं कर सकते?

आपने क्या सीखा

- उचित आवृत्ति के प्रकाश के किसी धातु की सतह पर गिरने पर उससे उत्सर्जित होने वाले इलेक्ट्रॉनों को प्रकाश इलेक्ट्रॉन उत्सर्जन कहते हैं।
- प्रकाश इलेक्ट्रॉन उत्सर्जन में इलेक्ट्रॉन प्रकाश से ऊर्जा ग्रहण करते हैं।
- निरोधी-विभव आपतित प्रकाश की आवृत्ति में वृद्धि होने के साथ बढ़ता है।

- हर पदार्थ की एक आवृत्ति v_0 होती है, जिसके नीचे कोई प्रकाश-विद्युत प्रभाव घटित नहीं होता है।
- प्रकाश इलेक्ट्रॉनों का अधिकतम वेग आपतित प्रकाश की आवृत्ति में वृद्धि के साथ बढ़ता है परन्तु यह आपतित प्रकाश की तीव्रता पर निर्भर नहीं करता।
- सतह से उत्सर्जित होने वाले प्रकाश इलेक्ट्रॉनों की संख्या आपतित प्रकाश की तीव्रता के समानुपाती होती है।
- आइन्सटाइन ने यह परिकल्पना की कि प्रत्येक फोटॉन की नैसर्गिक ऊर्जा hv के बराबर होती है जिसमें h प्लैंक का नियतांक और v आवृत्ति है।
- प्रकाश इलेक्ट्रॉन उत्सर्जक प्रकार की प्रकाश नलिका, प्रकाश-विद्युत प्रभाव पर निर्भर करती है।
- प्रकाश नलिका की संतृप्त धारा आपतित प्रकाश की बढ़ती तीव्रता के साथ बढ़ती है।
- गतिमान कणों के साथ-साथ उनकी सहचरी तरंगे होती हैं। तरंगदैर्ध्य का मान h/p द्वारा व्यक्त होता है जहाँ p संवेग (मोमेन्टम) है।

पाठान्त प्रश्न

1. प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन में, आपतित फोटॉनों का क्या होता है?
2. फोटॉन कण और द्रव्य कण में क्या अंतर है?
3. दैनिक जीवन में द्रव्य की तरंग प्रकृति का आभास क्यों नहीं होता?
4. आपतित प्रकाश की तरंग-दैर्ध्य में वृद्धि करने पर प्रकाश-इलेक्ट्रॉन के वेग पर क्या प्रभाव पड़ता है?
5. किसी धातु की देहली-आवृत्ति 5×10^{14} Hz है। क्या 6000Å तरंदैर्ध्य का कोई फोटॉन ऊर्जायुक्त प्रकाश-इलेक्ट्रॉन को उत्सर्जित कर सकता है?
6. क्या किसी धातु की देहली-आवृत्ति उस पर आपतित विकिरणों पर निर्भर करती है?
7. प्रकाश-विद्युत सेल के विभिन्न उपयोग क्या हैं?
8. डेविसन और जर्मर के प्रयोग का उद्देश्य क्या था? यह प्रयोग किस सिद्धान्त पर आधारित है?
9. प्रकाश-विद्युत प्रभाव के अध्ययन के लिए प्रयुक्त प्रयोग का वर्णन कीजिए।
10. निम्नलिखित पदों की व्याख्या कीजिए-(अ) संतृप्त वोल्टता, (ब) निरोधी-विभव।
11. प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन के नियमों का उल्लेख कीजिए।

12. आइन्सटाइन के प्रकाश-विद्युत प्रभाव सिद्धान्त की प्रमुख विशेषताओं का वर्णन कीजिए।

13. आइन्सटाइन के संबंध की व्याख्या कीजिए: $hv = E_0 + K_{max}$

14. वेग $v = 1 \times 10^8$ mèks से गतिशील इलेक्ट्रॉनों की सहचरी तरंगदैर्ध्य परिकलित कीजिए। इलेक्ट्रॉन के द्रव्यमान को 9.1×10^{-31} kg तथा h को 6.6×10^{-34} J.s लें।

15. डि-ब्रॉग्ली तरंगों के अस्तित्व का सत्यापन करने वाले प्रयोग का वर्णन कीजिए।

16. दिखाइए कि विभव V से त्वरित इलेक्ट्रॉनों की सहचरी डि-ब्रॉग्ली तरंगदैर्ध्य निम्न संबंध का पालन करती है:

$$\lambda = \frac{12.3}{\sqrt{V}}\ \text{Å}$$

पाठगत प्रश्नों के उत्तर

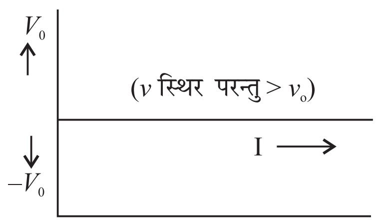
25.1

1. (a) असत्य (b) असत्य (c) सत्य

2. x – अंत:खंड देहली आवृत्ति को दर्शाता है।

y – अंत:खंड ex कार्यफलन (ϕ_0) को दर्शाता है।

$V_0 = \frac{h}{e} v - \frac{h}{e} v_0$, इसलिए ग्राफ की प्रवणता $\frac{h}{e}$ होगी।

3. 

25.2

(1) $\lambda = \frac{h}{p} \Rightarrow p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{c/v} = \frac{hv}{c}$

2. $E = hc$èkλ

यदि λ को दुगना कर दें तो E का मान Eèk2 हो जाएगा।

3. कोई प्रभाव नहीं पड़ेगा।

टिप्पणियाँ

25.3

1. (a) असत्य (b) असत्य (c) सत्य
2. (i) फिल्मों में ध्वनि के पुनरोत्पादन में

   (ii) चित्रों को अत्यधिक दूरी तक संचरित करना

   (iii) चोरों कापता लगाने वाली प्रणाली में
3. प्रकाश–इलेक्ट्रॉनों की संख्या में वृद्धि 4 के गुणक से होगी।

25.4

1. (a) असत्य (b) सत्य (c) सत्य
2. $P = mv$ और $\lambda = \dfrac{h}{P}$

   यहाँ पर $m = 50$ ग्राम $= 0.05$ कि. ग्रा. और $v = 20 \text{ cm s}^{-1}\ 0.02 \text{ m s}^{-1}$

   $\therefore \lambda = 6.6 \times 10^{-32}\text{m}$
3. समीकरण (25.14) से स्पष्ट है कि यदि द्रव्यमान m अधिक है तो λ का कम होगा। यही स्थिति क्रिकेट की गेंद के साथ है।
4. 7.25Å

अन्तिम अभ्यास प्रश्न के उत्तर

14. 7.25 Å