अध्याय 11: विकिरण तथा द्रव्य की द्वैत प्रकृति (Dual Nature of Radiation and Matter)

कक्षा: 12वीं (MP Board + NCERT) | **माध्यम:** हिंदी माध्यम नोट्स

1. अध्याय का संक्षिप्त परिचय (Introduction)

उन्नीसवीं सदी के अंत तक प्रकाश को पूरी तरह से एक तरंग (Wave) माना जाता था क्योंकि व्यतिकरण (Interference), विवर्तन (Diffraction) तथा ध्रुवण (Polarization) जैसी घटनाओं की व्याख्या केवल तरंग सिद्धांत द्वारा ही संभव थी। परंतु, जब प्रकाश-विद्युत प्रभाव (Photoelectric Effect) और कॉम्पटन प्रभाव की खोज हुई, तो तरंग सिद्धांत पूरी तरह विफल हो गया। इन घटनाओं को समझाने के लिए अल्बर्ट आइंस्टीन ने मैक्स प्लांक के क्वांटम सिद्धांत का उपयोग किया, जिसके अनुसार प्रकाश ऊर्जा के छोटे-छोटे पैकेटों या बंडलों के रूप में चलता है, जिन्हें **फोटॉन (Photon)** कहते हैं। इसका अर्थ यह हुआ कि प्रकाश तरंग और कण (Particle) दोनों की तरह व्यवहार करता है। इसी को **विकिरण की द्वैत प्रकृति** कहा जाता है।

2. महत्वपूर्ण परिभाषाएँ (Important Definitions)

- **मुक्त इलेक्ट्रॉन (Free Electrons):** धातुओं की बाहरी कक्षा में उपस्थित वे इलेक्ट्रॉन जो नाभिक से बहुत क्षीण बल द्वारा बंधे होते हैं तथा धातु के भीतर गति करने के लिए स्वतंत्र होते हैं।
- **कार्य फलन (Work Function - Φ_0 या W):** वह न्यूनतम बाह्य ऊर्जा जो किसी धातु की सतह से एक इलेक्ट्रॉन को ठीक बाहर निकालने के लिए आवश्यक होती है, उस धातु का कार्य फलन कहलाती है। इसका मात्रक इलेक्ट्रॉन-वोल्ट (eV) होता है।
- **इलेक्ट्रॉन-वोल्ट (1 eV):** जब किसी इलेक्ट्रॉन को 1 वोल्ट के विभवांतर द्वारा त्वरित किया जाता है, तो उसके द्वारा अर्जित ऊर्जा 1 eV कहलाती है। $1\ eV = 1.6 \times 10^{-19}\ Joule$.
- **प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन (Photoelectric Emission):** जब किसी उपयुक्त उच्च आवृत्ति या लघु तरंगदैर्ध्य का प्रकाश किसी धातु की सतह पर आपतित होता है, तो उसकी सतह से इलेक्ट्रॉनों का उत्सर्जन होने लगता है। इस परिघटना को प्रकाश-विद्युत प्रभाव कहते हैं। उत्सर्जित इलेक्ट्रॉनों को प्रकाश-इलेक्ट्रॉन कहते हैं।
- **देहली आवृत्ति (Threshold Frequency - ν_0):** आपतित प्रकाश की वह न्यूनतम आवृत्ति जो किसी धातु की सतह से इलेक्ट्रॉनों का उत्सर्जन प्रारंभ कर सके, देहली आवृत्ति कहलाती है। इससे कम आवृत्ति पर कोई इलेक्ट्रॉन उत्सर्जित नहीं होता, चाहे प्रकाश की तीव्रता कितनी भी अधिक क्यों न हो।
- **देहली तरंगदैर्ध्य (Threshold Wavelength - λ_0):** आपतित प्रकाश का वह अधिकतम तरंगदैर्ध्य जिससे अधिक तरंगदैर्ध्य का प्रकाश धातु सतह से इलेक्ट्रॉन उत्सर्जित न कर सके, देहली तरंगदैर्ध्य कहलाता है।
- **निरोधी विभव या कट-ऑफ विभव (Stopping Potential - V_0):** प्रकाश-विद्युत सेल के एनोड पर लगाया गया वह ऋणात्मक (मंदक) विभव जिस पर प्रकाश-विद्युत धारा का मान ठीक शून्य हो जाता है, निरोधी विभव कहलाता है। यह उत्सर्जित इलेक्ट्रॉनों की अधिकतम गतिज ऊर्जा की माप है।

फार्मूला बॉक्स 1: फोटॉन और कार्य फलन

1. फोटॉन की ऊर्जा:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

2. कार्य फलन:

$$\Phi_0 = h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0}$$

यहाँ, $h = 6.63 \times 10^{-34}$ $J \cdot s$ (प्लांक नियतांक), $c = 3 \times 10^8$ m/s (प्रकाश की चाल), ν = आवृत्ति, λ = तरंगदैर्ध्य।

3. आइंस्टीन का प्रकाश-विद्युत समीकरण (Einstein's Photoelectric Equation)

आइंस्टीन के अनुसार, जब $h\nu$ ऊर्जा का एक फोटॉन धातु की सतह पर गिरता है, तो वह अपनी संपूर्ण ऊर्जा धातु के किसी एक इलेक्ट्रॉन को दे देता है। यह ऊर्जा दो भागों में खर्च होती है:

1. ऊर्जा का एक भाग इलेक्ट्रॉन को धातु की सतह से बाहर निकालने (कार्य फलन Φ_0) में।
2. शेष भाग उत्सर्जित इलेक्ट्रॉन को अधिकतम गतिज ऊर्जा (K_{max}) प्रदान करने में।

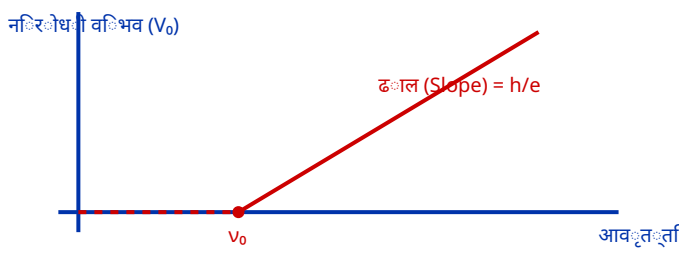
फार्मूला बॉक्स 2: आइंस्टीन का समीकरण तथा निरोधी विभव

$$h\nu = \Phi_0 + K_{max}$$

$$K_{max} = h\nu - h\nu_0 = h(\nu - \nu_0)$$

चूँकि $K_{max} = eV_0$, इसलिए:

$$eV_0 = h(\nu - \nu_0) \implies V_0 = \frac{h}{e}\nu - \frac{h}{e}\nu_0$$



चित्र 1: निरोधी विभव (V_0) तथा आपतित प्रकाश की आवृत्ति (ν) के मध्य आरेख

4. द्रव्य तरंगें एवं दे ब्रॉग्ली परिकल्पना (Matter Waves & de Broglie Hypothesis)

सन 1924 में लुई दे ब्रॉग्ली ने प्रतिपादित किया कि जिस प्रकार विकिरण की द्वैत प्रकृति होती है, ठीक उसी प्रकार गतिमान द्रव्य कण (जैसे इलेक्ट्रॉन, प्रोटॉन) भी तरंग की भाँति व्यवहार करते हैं। गतिमान कणों से संबद्ध इन तरंगों को **द्रव्य तरंगें** या **दे ब्रॉग्ली तरंगें** कहते हैं।

फार्मूला बॉक्स 3: दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्ध्य सूत्र

1. सामान्य कण के लिए:

$$\lambda = rac{h}{p} = rac{h}{mv} = rac{h}{\sqrt{2mK}}$$

2. V वोल्ट विभवांतर से त्वरित इलेक्ट्रॉन के लिए:

$$\lambda = rac{h}{\sqrt{2meV}} = rac{12.27}{\sqrt{V}} ext{ Å}$$

यहाँ p = संवेग, m = कण का द्रव्यमान, K = गतिज ऊर्जा, V = विभवांतर (Volts).

छात्र शॉर्टकट ट्रिक: बोर्ड परीक्षा के संख्यात्मक प्रश्नों में यदि सीधे इलेक्ट्रॉन को त्वरित करने का विभव दिया हो, तो लंबे कैलकुलेशन के बजाय सीधे $\lambda = rac{12.27}{\sqrt{V}}$ Å का प्रयोग करें। समय बचेगा!

5. महत्वपूर्ण प्रश्न एवं उत्तर (बोर्ड परीक्षा स्तर)

[2 अंक वाले लघु उत्तरीय प्रश्न]

प्रश्न 1. फोटॉन किसे कहते हैं? इसके दो प्रमुख गुण लिखिए। 2 अंक

उत्तर: प्लांक के क्वांटम सिद्धांत के अनुसार, प्रकाश ऊर्जा के छोटे-छोटे पैकेटों के रूप में उत्सर्जित तथा संचरित होता है, जिन्हें फोटॉन कहते हैं।

गुण:

1. फोटॉन का विराम द्रव्यमान (Rest Mass) शून्य होता है।
2. फोटॉन उदासीन होते हैं, इसलिए ये विद्युत तथा चुंबकीय क्षेत्रों द्वारा विक्षेपित नहीं होते।

प्रश्न 2. किसी धातु का कार्य फलन 2.3 eV है। इस कथन का क्या अर्थ है? 2 अंक

उत्तर: इस कथन का अर्थ यह है कि उस धातु की सतह से एक इलेक्ट्रॉन को ठीक बाहर निकालने के लिए न्यूनतम $2.3\ eV$ बाह्य ऊर्जा की आवश्यकता होगी। यदि आपतित फोटॉन की ऊर्जा $2.3\ eV$ से कम होगी, तो धातु की सतह से कोई भी इलेक्ट्रॉन उत्सर्जित नहीं हो पाएगा।

प्रश्न 3. प्रकाश-विद्युत प्रभाव में 'निरोधी विभव' की परिभाषा दीजिए। यह आपतित प्रकाश की तीव्रता पर कैसे निर्भर करता है? **2 अंक**

उत्तर: एनोड पर लगाया गया वह न्यूनतम ऋणात्मक विभव जिस पर प्रकाश-विद्युत धारा का मान शून्य हो जाता है, निरोधी विभव कहलाता है। निरोधी विभव आपतित प्रकाश की तीव्रता पर **निर्भर नहीं करता**; यह केवल आपतित प्रकाश की आवृत्ति तथा धातु की प्रकृति पर निर्भर करता है।

[3 अंक वाले प्रश्न]

प्रश्न 4. प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन के नियम लिखिए। **3 अंक**

उत्तर: प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन के प्रमुख नियम निम्नलिखित हैं:

1. किसी धातु की सतह से इलेक्ट्रॉन उत्सर्जन की दर (प्रकाश-विद्युत धारा) आपतित प्रकाश की तीव्रता के अनुक्रमानुपाती होती है।
2. उत्सर्जित प्रकाश-इलेक्ट्रॉनों की अधिकतम गतिज ऊर्जा, आपतित प्रकाश की तीव्रता पर निर्भर नहीं करती।
3. इलेक्ट्रॉनों की अधिकतम गतिज ऊर्जा आपतित प्रकाश की आवृत्ति के अनुक्रमानुपाती होती है।
4. यदि आपतित प्रकाश की आवृत्ति देहली आवृत्ति से कम है, तो धातु से कोई इलेक्ट्रॉन उत्सर्जित नहीं होगा।
5. धातु सतह पर प्रकाश के गिरने तथा इलेक्ट्रॉन के बाहर निकलने के बीच कोई समय पश्चता (Time lag) नहीं होती (यह एक तात्क्षणिक प्रक्रिया है)।

प्रश्न 5. तरंग सिद्धांत प्रकाश-विद्युत प्रभाव की व्याख्या करने में क्यों असफल रहा? कोई तीन कारण स्पष्ट कीजिए। **3 अंक**

उत्तर: तरंग सिद्धांत की विफलता के तीन मुख्य कारण:

1. **तीव्रता संबंधी समस्या:** तरंग सिद्धांत के अनुसार तीव्र प्रकाश में अधिक ऊर्जा होनी चाहिए जिससे इलेक्ट्रॉनों की गतिज ऊर्जा बढ़नी चाहिए, परंतु वास्तव में गतिज ऊर्जा तीव्रता पर नहीं, आवृत्ति पर निर्भर करती है।
2. **देहली आवृत्ति की व्याख्या न होना:** तरंग सिद्धांत के अनुसार किसी भी आवृत्ति का प्रकाश इलेक्ट्रॉन निकाल सकता है बशर्ते उसकी तीव्रता पर्याप्त हो, जो कि असत्य है।
3. **समय पश्चता:** तरंग सिद्धांत के अनुसार तरंग की ऊर्जा पूरी धातु सतह पर फैलती है, अतः इलेक्ट्रॉन को बाहर निकलने में समय लगना चाहिए, जबकि यह प्रक्रिया तुरंत होती है।

[5 अंक वाले दीर्घ उत्तरीय प्रश्न]

प्रश्न 6. आइंस्टीन के प्रकाश-विद्युत समीकरण की स्थापना कीजिए तथा इसके आधार पर प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन के नियमों की व्याख्या कीजिए। **5 अंक**

उत्तर:

समीकरण की स्थापना: माना ν आवृत्ति का एक फोटॉन ($E = h\nu$) धातु की सतह पर आपतित होता है। ऊर्जा संरक्षण के नियम से यह ऊर्जा दो रूपों में प्रयुक्त होती है: कार्य फलन (Φ_0) और अधिकतम गतिज ऊर्जा (K_{max})।

अतः, $h\nu = \Phi_0 + K_{max}$

यदि उत्सर्जित इलेक्ट्रॉन का अधिकतम वेग v_{max} हो, तो $K_{max} = \frac{1}{2}mv_{max}^2$.

अतः, $h\nu = h\nu_0 + \frac{1}{2}mv_{max}^2 \implies \frac{1}{2}mv_{max}^2 = h(\nu - \nu_0)$। यही आइंस्टीन का प्रकाश-विद्युत समीकरण है।

नियमों की व्याख्या:

1. यदि $\nu < \nu_0$ हो, तो गतिज ऊर्जा ऋणात्मक हो जाएगी, जो कि असंभव है। अतः देहली आवृत्ति से कम पर उत्सर्जन संभव नहीं है।
2. समीकरण से स्पष्ट है कि गतिज ऊर्जा केवल आवृत्ति ν पर निर्भर करती है, तीव्रता पर नहीं।
3. तीव्रता बढ़ाने पर आपतित फोटॉनों की संख्या बढ़ती है, जिससे उत्सर्जित इलेक्ट्रॉनों की संख्या (धारा) बढ़ती है, गतिज ऊर्जा नहीं।

6. महत्वपूर्ण संख्यात्मक प्रश्न (Solved Numericals)

प्रश्न 7. एक धातु का कार्य फलन 4.2 eV है। क्या यह धातु 330 nm तरंगदैर्ध्य के आपतित विकिरण के लिए प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन दर्शाएगी? **3 अंक**

हल: Given: कार्य फलन $\Phi_0 = 4.2\ eV$

आपतित प्रकाश का तरंगदैर्ध्य $\lambda = 330\ nm = 330 \times 10^{-9}\ m$

हम जानते हैं कि आपतित फोटॉन की ऊर्जा:

$$E = rac{hc}{\lambda} = rac{6.63 imes 10^{-34} imes 3 imes 10^8}{330 imes 10^{-9}} ext{ Joules}$$

$$E = rac{1.989 imes 10^{-25}}{330 imes 10^{-9}} = 6.027 imes 10^{-19} ext{ Joules}$$

अब इसे eV में बदलने के लिए 1.6×10^{-19} से भाग देंगे:

$$E = rac{6.027 imes 10^{-19}}{1.6 imes 10^{-19}} pprox 3.76 ext{ eV}$$

निष्कर्ष: चूँकि आपतित फोटॉन की ऊर्जा ($E = 3.76\ eV$), धातु के कार्य फलन ($\Phi_0 = 4.2\ eV$) से कम है ($E < \Phi_0$), अतः धातु की सतह से **कोई प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन नहीं होगा**।

प्रश्न 8. 100 V के विभवांतर द्वारा त्वरित किसी इलेक्ट्रॉन से संबद्ध दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्ध्य की गणना कीजिए। **2 अंक**

हल: Given: विभवांतर $V = 100 ext{ Volts}$

शॉर्टकट सूत्र का उपयोग करने पर:

$$\lambda = rac{12.27}{\sqrt{V}} ext{ Å}$$

$$\lambda = rac{12.27}{\sqrt{100}} = rac{12.27}{10} = 1.227 ext{ Å}$$

अथवा मीटर में: $\lambda = 1.227 \times 10^{-10} ext{ m} = 0.123 ext{ nm}$.

उत्तर: इलेक्ट्रॉन से संबद्ध दे ब्रॉग्ली तरंगदैर्ध्य $1.227\ Å$ है।

7. क्विक रिवीजन नोट्स (Quick Revision Notes)

- प्रकाश की कण प्रकृति का प्रमाण **प्रकाश-विद्युत प्रभाव** तथा **कॉम्पटन प्रभाव** से मिलता है।
- प्रकाश की तरंग प्रकृति का प्रमाण **व्यतिकरण, विवर्तन** से मिलता है।
- द्रव्य तरंगें अनुप्रस्थ या अनुदैर्ध्य या विद्युत-चुंबकीय तरंगें नहीं हैं, ये केवल गतिमान कण से संबद्ध प्रायिकता तरंगें हैं।
- डेविसन-जर्मर प्रयोग द्वारा इलेक्ट्रॉनों की तरंग प्रकृति (विवर्तन) की सफल पुष्टि की गई थी।
- फोटॉन का संवेग: $p = \ rac{h}{\lambda} = \ rac{E}{c}$.