कक्षा 12 भौतिक विज्ञान (PHYSICS)

अध्याय 1: विद्युत आवेश तथा क्षेत्र (Electric Charges and Fields)

बोर्ड लक्ष्य: MP Board + NCERT (100% अंक) **माध्यम:** हिंदी (Handwritten Style Notes) **विशेषता:** सिद्धान्त + PYQs + संख्यात्मक + ट्रिक्स

1. अध्याय का संक्षिप्त परिचय (INTRODUCTION)

स्थिरवैद्युतिकी (Electrostatics): भौतिक विज्ञान की वह शाखा जिसके अंतर्गत हम स्थिर आवेशों (Static Charges), उनके गुणों, उनके कारण उत्पन्न बल, विद्युत क्षेत्र तथा विभव का अध्ययन करते हैं, उसे **स्थिरवैद्युतिकी** कहते हैं।

विद्युत आवेश (Electric Charge): आवेश किसी पदार्थ का वह मूलभूत आंतरिक गुणधर्म है जिसके कारण वह वैद्युत तथा चुंबकीय प्रभाव उत्पन्न करता है अथवा उनका अनुभव करता है। आवेश एक **अदिश राशि** है। इसका SI मात्रक **कूलॉम (Coulomb - C)** होता है।

> 📌 **याद रखने योग्य बिंदु (Types of Charges):**
> 1. **धनावेश (Positive Charge):** इलेक्ट्रॉन की कमी के कारण उत्पन्न होता है।
> 2. **ऋणावेश (Negative Charge):** इलेक्ट्रॉन की अधिकता के कारण उत्पन्न होता है।
> 3. सजातीय आवेश (Like charges) एक-दूसरे को **प्रतिकर्षित** करते हैं, जबकि विजातीय आवेश (Unlike charges) एक-दूसरे को **आकर्षित** करते हैं।

2. महत्वपूर्ण परिभाषाएँ एवं आवेश के मूल गुण

(i) आवेश का क्वांटीकरण (Quantization of Charge)

प्रकृति में प्रत्येक स्वतंत्र आवेश मूल आवेश e (इलेक्ट्रॉन का आवेश) का पूर्ण गुणज होता है। इसे आवेश का क्वांटीकरण कहते हैं।

सूत्र: आवेश का क्वांटीकरण

$$q = \pm n \cdot e$$

जहाँ: $n = 1, 2, 3, \ldots$ (पूर्णांक) एवं $e = 1.6 \times 10^{-19}\ C$ (मूल आवेश)

(ii) आवेश संरक्षण का नियम (Conservation of Charge)

किसी पृथक्कृत निकाय (Isolated System) का कुल आवेश सदैव संरक्षित रहता है। आवेश को न तो उत्पन्न किया जा सकता है और न ही नष्ट किया जा सकता है; इसे केवल एक वस्तु से दूसरी वस्तु में स्थानांतरित किया जा सकता है।

(iii) आवेश की योज्यता (Additivity of Charge)

किसी निकाय का कुल विद्युत आवेश उसमें उपस्थित सभी पृथक आवेशों के बीजगणितीय योग (Algebraic Sum) के बराबर होता है: $Q = q_1 + q_2 + q_3 + \ldots + q_n$।

3. कूलॉम का नियम (COULOMB'S LAW)

इस नियमानुसार, "दो स्थिर बिन्दु आवेशों के मध्य लगने वाला आकर्षण या प्रतिकर्षण बल दोनों आवेशों के परिमाणों के गुणनफल के समानुपाती तथा उनके बीच की दूरी के वर्ग के व्युत्क्रमानुपाती होता है।"

कूलॉम के नियम का गणितीय रूप

$$F = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot (|q_1 q_2| / r^2)$$

- निर्वात/वायु के लिए: $1 / (4\pi\varepsilon_0) = 9 \times 10^9\ N{\cdot}m^2/C^2$
- निर्वात की विद्युतशीलता: $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}\ C^2/N{\cdot}m^2$ [विमा: $M^{-1} L^{-3} T^4 A^2$]
- किसी माध्यम (परावैद्युतांक K) में: $F_m = F_vac / K = (1 / 4\pi\varepsilon_0 K) \cdot (|q_1 q_2| / r^2)$

चित्र 1.1: दो बिन्दु आवेशों के मध्य कूलॉम बल

4. विद्युत क्षेत्र एवं विद्युत बल रेखाएँ

विद्युत क्षेत्र की तीव्रता (Electric Field Intensity): विद्युत क्षेत्र में किसी बिन्दु पर रखे एकांक धनात्मक परीक्षण आवेश (q_0) पर लगने वाले बल को उस बिन्दु पर विद्युत क्षेत्र की तीव्रता (E) कहते हैं।

विद्युत क्षेत्र की तीव्रता (सदिश राशि)

$$E = F / q_0 \quad \Rightarrow \quad \text{बिन्दु आवेश के कारण: } E = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot (q / r^2)$$

- मात्रक: **N/C** या **V/m** | विमा: $[M\ L\ T^{-3}\ A^{-1}]$

विद्युत बल रेखाओं के मुख्य गुणधर्म (Properties of Electric Lines of Force):

यह धन आवेश से प्रारंभ होकर ऋण आवेश पर समाप्त होती हैं।

बल रेखा के किसी भी बिन्दु पर खींची गई स्पर्श रेखा (Tangent) उस बिन्दु पर विद्युत क्षेत्र की दिशा प्रदर्शित करती है।

दो बल रेखाएँ कभी भी एक-दूसरे को नहीं काटतीं, क्योंकि कटान बिन्दु पर दो स्पर्श रेखाएं खिंचेंगी जो एक ही बिन्दु पर विद्युत क्षेत्र की दो दिशाएं दर्शाएंगी जो असंभव है।

ये रेखाएं खींची हुई लचकदार डोरी की तरह लंबाई में सिकुड़ने का प्रयास करती हैं (प्रतिकर्षण/आकर्षण दर्शाती हैं)।

5. विद्युत द्विध्रुव (ELECTRIC DIPOLE)

जब दो समान परिमाण किंतु विपरीत प्रकृति के बिन्दु आवेश एक-दूसरे से अल्प दूरी ($2l$) पर स्थित हों, तो इस निकाय को **विद्युत द्विध्रुव** कहते हैं।

विद्युत द्विध्रुव आघूर्ण (Dipole Moment, p): किसी एक आवेश के परिमाण तथा दोनों आवेशों के बीच की दूरी के गुणनफल को द्विध्रुव आघूर्ण कहते हैं।

विद्युत द्विध्रुव आघूर्ण

$$p = q \times 2l$$

• राशि: **सदिश** | दिशा: **-q से +q की ओर** | मात्रक: **C·m (कूलॉम-मीटर)** | विमा: **[M^0 L T A]**

द्विध्रुव के कारण विद्युत क्षेत्र की तीव्रता:

स्थिति	व्यंजक (सामान्य)	अल्प द्विध्रुव हेतु (r >> l)
1. अक्षय स्थिति (Axial)	$E = (1/4\pi\varepsilon_0) \cdot [2pr / (r^2 - l^2)^2]$	$E = (1/4\pi\varepsilon_0) \cdot (2p / r^3)$
2. निरक्षीय स्थिति (Equatorial)	$E = (1/4\pi\varepsilon_0) \cdot [p / (r^2 + l^2)^{(3/2)}]$	$E = (1/4\pi\varepsilon_0) \cdot (p / r^3)$

💡 **MP Board परीक्षा ट्रिक:** समान दूरी ***r*** पर, अक्षय स्थिति में विद्युत क्षेत्र की तीव्रता, निरक्षीय स्थिति की तुलना में **दुगुनी** होती है: $E_{axial} = 2 \times E_{equatorial}$।

एकसमान विद्युत क्षेत्र में द्विध्रुव पर बल-युग्म का आघूर्ण (Torque):

$$\tau = p E \sin\theta \quad \text{या} \quad \vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}$$

• अधिकतम बल आघूर्ण ($\theta = 90°$): $\tau_{max} = pE$
• कार्य (**$0°$ से θ तक घुमाने में**): $W = pE(1 - \cos\theta)$
• स्थितिज ऊर्जा: $U = -pE\cos\theta = -\vec{p} \cdot \vec{E}$

6. विद्युत फ्लक्स एवं गॉस की प्रमेय (GAUSS'S THEOREM)

विद्युत फ्लक्स (Electric Flux, Φ_E): विद्युत क्षेत्र में स्थित किसी पृष्ठ से लंबवत गुजरने वाली कुल बल रेखाओं की संख्या को उस पृष्ठ से बद्ध विद्युत फ्लक्स कहते हैं।

$$\Phi_E = \vec{E} \cdot \vec{A} = E A \cos\theta$$

• मात्रक: **$N \cdot m^2/C$** या **V·m** | अदिश राशि | विमा: **[$M L^3 T^{-3} A^{-1}$]**

गॉस की प्रमेय (Gauss's Theorem):

कथन: "किसी बंद पृष्ठ (Gaussian Surface) से गुजरने वाला कुल विद्युत फ्लक्स उस पृष्ठ द्वारा परिबद्ध कुल आवेश ***q*** का $1 / \varepsilon_0$ गुना होता है।"

गॉस का नियम

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = q / \varepsilon_0$$

गॉस की प्रमेय के प्रमुख अनुप्रयोग (Applications):

1. **अनंत लंबाई के सीधे आवेशित तार के कारण:** $E = \lambda / (2\pi\varepsilon_0 r)$ (जहाँ λ = रेखीय आवेश घनत्व)
2. **अनंत विस्तार की समतल आवेशित अचालक चादर के कारण:** $E = \sigma / (2\varepsilon_0)$ (जहाँ σ = पृष्ठीय आवेश घनत्व)
3. **एकसमान आवेशित पतले गोलीय खोल (Spherical Shell) के कारण:**
   - बाहरी बिन्दु ($r > R$): $E = (1/4\pi\varepsilon_0) \cdot (q / r^2)$
   - पृष्ठ पर ($r = R$): $E = (1/4\pi\varepsilon_0) \cdot (q / R^2)$
   - आंतरिक बिन्दु ($r < R$): $E = 0$ (क्योंकि खोल के अंदर कोई आवेश नहीं होता)

7. अध्याय के सभी मुख्य सूत्र (FORMULA SHEET)

भौतिक राशि / नियम	सूत्र (Formula)	मात्रक (SI Unit)
आवेश क्वांटीकरण	$q = \pm n e$	कूलॉम (C)
कूलॉम का नियम	$F = (1/4\pi\varepsilon_0) \cdot (q_1 q_2 / r^2)$	न्यूटन (N)
विद्युत क्षेत्र की तीव्रता	$E = F / q_0 = (1/4\pi\varepsilon_0) \cdot (q / r^2)$	N/C या V/m
द्विध्रुव आघूर्ण	$p = q \times 2l$	C·m
बल आघूर्ण (Torque)	$\tau = p E \sin\theta$	N·m
द्विध्रुव को घुमाने में कार्य	$W = p E (1 - \cos\theta)$	जूल (J)
विद्युत फ्लक्स	$\Phi = E A \cos\theta$	$N \cdot m^2/C$
रेखीय आवेश घनत्व	$\lambda = q / L$	C/m
पृष्ठीय आवेश घनत्व	$\sigma = q / A$	C/m^2
आयतन आवेश घनत्व	$\rho = q / V$	C/m^3

8. महत्वपूर्ण बोर्ड प्रश्नोत्तर (QUESTIONS 1 TO 30)

अतिलघु उत्तरीय प्रश्न (2 अंक वाले प्रश्न)

प्रश्न 1: आवेश का क्वांटीकरण किसे कहते हैं? — 2 अंक | PYQ 2020, 2023

उत्तर: प्रकृति में प्रत्येक स्वतंत्र आवेश मूल आवेश e (1.6×10^{-19} C) का पूर्ण गुणज होता है। अर्थात् आवेश को अनिश्चित रूप से विभाजित नहीं किया जा सकता। इसे ही आवेश का क्वांटीकरण कहते हैं ($q = \pm ne$)।

प्रश्न 2: विद्युत क्षेत्र रेखाओं के दो मुख्य गुण लिखिए। — 2 अंक | PYQ 2019

उत्तर: 1. ये रेखाएँ धनावेश से प्रारंभ होकर ऋणावेश पर समाप्त होती हैं।
2. दो विद्युत क्षेत्र रेखाएँ कभी भी एक-दूसरे को नहीं काटती हैं।

प्रश्न 3: दो विद्युत बल रेखाएं एक-दूसरे को क्यों नहीं काटती हैं? 2 अंक

उत्तर: यदि दो बल रेखाएं एक-दूसरे को काटेंगी, तो कटान बिन्दु पर दो स्पर्श रेखाएं खींची जा सकेंगी, जिसका अर्थ यह होगा कि उस बिन्दु पर परिणामी विद्युत क्षेत्र की दो दिशाएं हैं, जो कि भौतिक रूप से असंभव है।

प्रश्न 4: विद्युत फ्लक्स किसे कहते हैं? इसका SI मात्रक तथा विमीय सूत्र लिखिए। 2 अंक | PYQ 2022

उत्तर: विद्युत क्षेत्र में स्थित किसी पृष्ठ के लंबवत गुजरने वाली कुल विद्युत बल रेखाओं की संख्या को विद्युत फ्लक्स कहते हैं।

- SI मात्रक: $N \cdot m^2/C$ या $V \cdot m$
- विमीय सूत्र: $[M\ L^3\ T^{-3}\ A^{-1}]$

प्रश्न 5: विद्युत द्विध्रुव आघूर्ण की परिभाषा एवं मात्रक लिखिए। 2 अंक

उत्तर: विद्युत द्विध्रुव के किसी एक आवेश के परिमाण तथा दोनों आवेशों की बीच की दूरी के गुणनफल को विद्युत द्विध्रुव आघूर्ण कहते हैं ($p = q \times 2l$)। यह एक सदिश राशि है जिसकी दिशा ऋणावेश से धनावेश की ओर होती है। मात्रक: कूलॉम-मीटर ($C \cdot m$)।

प्रश्न 6: परावैद्युतांक (Dielectric Constant) किसे कहते हैं? 2 अंक | PYQ 2018

उत्तर: किसी माध्यम की विद्युतशीलता (ε) तथा निर्वात की विद्युतशीलता (ε_0) के अनुपात को उस माध्यम का परावैद्युतांक (K) कहते हैं: $K = \varepsilon / \varepsilon_0 = F_{vac} / F_{med}$। यह एक बीमाहीन राशि है। (धातुओं के लिए $K = \infty$)।

प्रश्न 7: 1 कूलॉम आवेश में कितने इलेक्ट्रॉन होते हैं? (गणना कीजिए) 2 अंक

उत्तर: सूत्र $q = n\,e$ से,

$n = q / e = 1 / (1.6 \times 10^{-19}) = 6.25 \times 10^{18}$ इलेक्ट्रॉन।

प्रश्न 8: रेखीय आवेश घनत्व (λ) तथा पृष्ठीय आवेश घनत्व (σ) को स्पष्ट कीजिए। 2 अंक

उत्तर:

- **रेखीय आवेश घनत्व (λ):** प्रति एकांक लंबाई पर उपस्थित आवेश ($\lambda = q / L$), मात्रक: C/m।
- **पृष्ठीय आवेश घनत्व (σ):** प्रति एकांक क्षेत्रफल पर उपस्थित आवेश ($\sigma = q / A$), मात्रक: C/m^2।

प्रश्न 9: क्या किसी वस्तु पर 4.8×10^{-19} C आवेश हो सकता है? तर्क दीजिए। 2 अंक

उत्तर: हाँ, हो सकता है।

क्योंकि $n = q / e = (4.8 \times 10^{-19}) / (1.6 \times 10^{-19}) = 3$ (जो कि एक पूर्ण संख्या है)। अतः क्वांटीकरण के नियम के अनुसार यह संभव है।

प्रश्न 10: आवेश संरक्षण का नियम उदाहरण सहित लिखिए। 2 अंक

उत्तर: आवेश न तो उत्पन्न किया जा सकता है और न ही नष्ट। उदाहरण: कांच की छड़ को रेशम से रगड़ने पर जितना धनावेश कांच पर आता है, उतना ही ऋणावेश रेशम पर उत्पन्न हो जाता है। कुल आवेश शून्य ही रहता है।

लघु उत्तरीय प्रश्न (3 अंक वाले प्रश्न)

प्रश्न 11: कूलॉम का नियम लिखिए तथा इसके आधार पर एकांक आवेश (1 Coulomb) को परिभाषित कीजिए।

3 अंक | PYQ 2022

उत्तर: कूलॉम के नियमानुसार: $F = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot (q_1 q_2 / r^2)$

यदि $q_1 = q_2 = q$, $r = 1\ m$ तथा निर्वात में बल $F = 9 \times 10^9\ N$ हो, तो:

$9 \times 10^9 = (9 \times 10^9) \cdot (q^2 / 1^2) \Rightarrow q^2 = 1 \Rightarrow q = \pm 1\ C$

परिभाषा: 1 कूलॉम वह आवेश है जो निर्वात में 1 मीटर की दूरी पर स्थित अपने ही समान परिमाण के आवेश को $9 \times 10^9\ N$ के बल से प्रतिकर्षित करता है।

प्रश्न 12: एकसमान विद्युत क्षेत्र में द्विध्रुव को घुमाने में किए गए कार्य के लिए व्यंजक प्राप्त कीजिए।

3 अंक

उत्तर: एकसमान विद्युत क्षेत्र E में द्विध्रुव को θ कोण पर रखने पर उस पर बल आघूर्ण $\tau = pE \sin\theta$ लगता है।

द्विध्रुव को अत्यंत सूक्ष्म कोण $d\theta$ घुमाने में किया गया कार्य:

$dW = \tau \cdot d\theta = pE \sin\theta\, d\theta$

द्विध्रुव को θ_1 से θ_2 कोण तक घुमाने में कुल कार्य:

$W = \int_{\theta_1}^{\theta_2} pE \sin\theta\, d\theta = pE\, [-\cos\theta]_{\theta_1}^{\theta_2} = pE\, (\cos\theta_1 - \cos\theta_2)$

यदि द्विध्रुव प्रारम्भ में साम्यावस्था ($\theta_1 = 0°$) में हो तथा इसे θ कोण घुमाया जाए:

$W = pE\, (1 - \cos\theta)$।

प्रश्न 13: गॉस की प्रमेय लिखिए तथा इसे सिद्ध कीजिए।

3 अंक | PYQ 2021

उत्तर:

प्रमेय: किसी बंद पृष्ठ से बद्ध कुल विद्युत फ्लक्स $\Phi_E = q / \varepsilon_0$ होता है।

उपपत्ति: माना एक बिन्दु आवेश $+q$ त्रिज्या r के एक गोलीय गौसीयन पृष्ठ के केंद्र O पर स्थित है।

पृष्ठ के किसी बिन्दु पर विद्युत क्षेत्र $E = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot (q / r^2)$ (बाहर की ओर)।

सूक्ष्म क्षेत्रफल dA से गुजरने वाला फ्लक्स $d\Phi = \vec{E} \cdot d\vec{A} = E\, dA \cos 0° = E\, dA$।

संपूर्ण पृष्ठ से गुजरने वाला कुल फ्लक्स:

$\Phi = \oint E\, dA = E \oint dA = E \cdot (4\pi r^2)$

$\Phi = [(1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot (q / r^2)] \times (4\pi r^2) = q / \varepsilon_0$। (इति सिद्धम)

प्रश्न 14: एकसमान आवेशित अनंत समतल अचालक चादर के कारण विद्युत क्षेत्र की तीव्रता ज्ञात कीजिए।

3 अंक

उत्तर: माना चादर पर पृष्ठीय आवेश घनत्व σ है। चादर के दोनों ओर r दूरी पर एक बेलनाकार गौसीयन पृष्ठ (अनुप्रस्थ काट A) की कल्पना करते हैं।

बेलन के दोनों समतल सिरों से गुजरने वाला कुल फ्लक्स: $\Phi = E A + E A = 2 E A$।

गॉस के नियम से: $\Phi = q / \varepsilon_0 = (\sigma A) / \varepsilon_0$

अतः $2 E A = (\sigma A) / \varepsilon_0 \Rightarrow E = \sigma / (2\varepsilon_0)$।

(ध्यान दें: यह तीव्रता दूरी r पर निर्भर नहीं करती)।

प्रश्न 15: स्थिरवैद्युत बल तथा गुरुत्वाकर्षण बल में तुलना कीजिए (समानताएं एवं अंतर)। 3 अंक

उत्तर:

• **समानता:** दोनों बल व्युत्क्रम वर्ग नियम ($1/r^2$) का पालन करते हैं तथा केंद्रीय बल हैं।

• **अंतर:** स्थिरवैद्युत बल आकर्षण तथा प्रतिकर्षण दोनों हो सकता है, जबकि गुरुत्वाकर्षण बल केवल आकर्षक होता है। स्थिरवैद्युत बल, गुरुत्वाकर्षण बल की तुलना में अत्यंत प्रबल होता है।

दीर्घ उत्तरीय प्रश्न (4 एवं 5 अंक वाले प्रश्न)

प्रश्न 16: विद्युत द्विध्रुव की अक्षय स्थिति (Axial Position) में किसी बिन्दु पर विद्युत क्षेत्र की तीव्रता का व्यंजक व्युत्पन्न कीजिए। 5 अंक | PYQ 2019, 2023

उत्तर:

माना: AB एक विद्युत द्विध्रुव है जो $-q$ और $+q$ आवेशों से बना है, जिनके बीच की दूरी $2l$ है। इसके मध्य बिन्दु O से r दूरी पर अक्षीय रेखा पर एक बिन्दु P स्थित है जहाँ तीव्रता ज्ञात करनी है।

चित्र 1.2: द्विध्रुव की अक्षय स्थिति

व्युत्पत्ति:

• $+q$ आवेश के कारण P पर तीव्रता: $E_1 = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot [q / (r - l)^2]$ (BP दिशा में)

• $-q$ आवेश के कारण P पर तीव्रता: $E_2 = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot [q / (r + l)^2]$ (PA दिशा में)

परिणामी तीव्रता $E = E_1 - E_2$ (क्योंकि $E_1 > E_2$):

$$E = (q / 4\pi\varepsilon_0) \cdot [1 / (r - l)^2 - 1 / (r + l)^2]$$

$$E = (q / 4\pi\varepsilon_0) \cdot [(4 r l) / (r^2 - l^2)^2] = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot [(2 \cdot (q \cdot 2l) \cdot r) / (r^2 - l^2)^2]$$

चूँकि $p = q \times 2l$, अतः:

$$E = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot [2 p r / (r^2 - l^2)^2]$$

यदि $r >> l$ हो, तो l^2 को नगण्य मानने पर:

$$E = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot (2p / r^3)$$

प्रश्न 17: विद्युत द्विध्रुव की निरक्षीय स्थिति (Equatorial Position) में विद्युत क्षेत्र की तीव्रता का सूत्र स्थापित कीजिए। 5 अंक | PYQ 2020, 2022

उत्तर:

माना: एक द्विध्रुव AB के लंब-अर्द्धक पर मध्य बिन्दु O से r दूरी पर निरक्षीय स्थिति में एक बिन्दु P स्थित है। बिन्दु P की दोनों आवेशों से दूरी $AP = BP = \sqrt{(r^2 + l^2)}$ होगी।

- $+q$ के कारण तीव्रता $E_1 = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot [q / (r^2 + l^2)]$
- $-q$ के कारण तीव्रता $E_2 = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot [q / (r^2 + l^2)]$

घटकों में वियोजित करने पर, लंबवत घटक ($E_1 \sin\theta$ व $E_2 \sin\theta$) निरस्त हो जाते हैं तथा समांतर घटक ($E_1 \cos\theta$ व $E_2 \cos\theta$) जुड़ जाते हैं।

परिणामी तीव्रता $E = E_1 \cos\theta + E_2 \cos\theta = 2 E_1 \cos\theta$

समकोण त्रिभुज AOP से: $\cos\theta = l / \sqrt{(r^2 + l^2)}$

$E = 2 \times [(1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot (q / (r^2 + l^2))] \times [l / \sqrt{(r^2 + l^2)}]$

$E = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot [(q \cdot 2l) / (r^2 + l^2)^{(3/2)}] = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot [p / (r^2 + l^2)^{(3/2)}]$

यदि $r >> l$ हो, तो:

$$E = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot (p / r^3)$$

प्रश्न 18: गॉस के नियम का प्रयोग करके अनंत लंबाई के सीधे आवेशित तार के कारण विद्युत क्षेत्र की तीव्रता ज्ञात कीजिए। 5 अंक | PYQ 2018, 2021

उत्तर:

माना: एक अनंत लंबाई का सीधा तार जिस पर रेखीय आवेश घनत्व λ है। इससे r दूरी पर बिन्दु P स्थित है।

तार के चारों ओर r त्रिज्या व l लंबाई के बेलनाकार गौसीयन पृष्ठ की कल्पना करते हैं।

- बेलन के वृत्ताकार (समतल) सिरों से फ्लक्स = 0 (क्योंकि E व dA परस्पर 90° पर हैं)।
- वक्र पृष्ठ से गुजरने वाला फ्लक्स: $\Phi = E \times (2\pi r l)$

गॉस के नियमानुसार: $\Phi = q / \varepsilon_0 = (\lambda l) / \varepsilon_0$

समीकरणों की तुलना करने पर:

$E \times (2\pi r l) = (\lambda l) / \varepsilon_0 \Rightarrow E = \lambda / (2\pi \varepsilon_0 r)$

या अंश व हर में 2 से गुणा करने पर:

$$E = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot (2\lambda / r)$$

9. महत्वपूर्ण अंकगणितीय प्रश्न (NUMERICAL PROBLEMS SOLVED)

प्रश्न 19: दो बिन्दु आवेश +2μC तथा +6μC एक-दूसरे से 12 cm दूरी पर रखे हैं। उनके मध्य लगने वाले कूलॉम बल की गणना कीजिए। संख्यात्मक 1

हल:

दिया है: $q_1 = 2 \times 10^{-6}$ C, $q_2 = 6 \times 10^{-6}$ C, $r = 12$ cm $= 0.12$ m

कूलॉम के नियम से: $F = (9 \times 10^9) \times (q_1 q_2 / r^2)$

$F = (9 \times 10^9 \times 2 \times 10^{-6} \times 6 \times 10^{-6}) / (0.12)^2$

$F = (108 \times 10^{-3}) / (0.0144) = 7.5$ N (प्रतिकर्षण बल)।

प्रश्न 20: 5.0×10^{-8} C m द्विध्रुव आघूर्ण का एक विद्युत द्विध्रुव 10^4 N/C के एकसमान विद्युत क्षेत्र में 30° के कोण पर झुका है। द्विध्रुव पर लगने वाले बल युग्म के आघूर्ण (τ) की गणना कीजिए। संख्यात्मक 2

हल:

दिया है: $p = 5.0 \times 10^{-8}$ C·m, $E = 10^4$ N/C, $\theta = 30°$

सूत्र: $\tau = p E \sin\theta$

$\tau = (5.0 \times 10^{-8}) \times 10^4 \times \sin 30°$

$\tau = (5.0 \times 10^{-4}) \times (1/2) = 2.5 \times 10^{-4}$ N·m।

प्रश्न 21: यदि किसी बंद पृष्ठ में प्रवेश करने वाला तथा बाहर निकलने वाला विद्युत फ्लक्स क्रमशः 4×10^3 तथा 8×10^3 N·m²/C है, तो पृष्ठ के अंदर परिबद्ध कुल आवेश कितना होगा? संख्यात्मक 3

हल:

कुल बद्ध फ्लक्स $\Phi = \Phi_{out} - \Phi_{in} = (8 \times 10^3) - (4 \times 10^3) = 4 \times 10^3$ N·m²/C

गॉस के नियम से: $\Phi = q / \varepsilon_0 \Rightarrow q = \Phi \times \varepsilon_0$

$q = (4 \times 10^3) \times (8.854 \times 10^{-12}) = 3.54 \times 10^{-8}$ C।

प्रश्न 22: एक स्थान पर विद्युत क्षेत्र $E = 3\times10^3\ \hat{i}$ N/C है। 10 cm भुजा वाले वर्ग के पृष्ठ से कितना फ्लक्स गुजरेगा जब पृष्ठ का तल Y-Z तल के समांतर हो? संख्यात्मक 4

हल:

Y-Z तल के समांतर पृष्ठ का क्षेत्रफल सदिश X-अक्ष के अनुदिश ($\hat{i}$) होगा।

क्षेत्रफल $A = (0.10\ m)^2 = 0.01\ m^2 = 10^{-2}\ m^2\ \hat{i}$

फ्लक्स $\Phi = vec(E) \cdot vec(A) = (3 \times 10^3\ \hat{i}) \cdot (10^{-2}\ \hat{i}) = 30$ N·m²/C।

10. अन्य महत्वपूर्ण एवं बार-बार पूछे गए प्रश्न (PYQS)

प्रश्न 23: मूल आवेश (Elementary Charge) का मान कितना होता है? 2 अंक

उत्तर: प्रकृति में न्यूनतम संभव स्वतंत्र आवेश को मूल आवेश कहते हैं। इसका मान $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C होता है। (जैसे एक इलेक्ट्रॉन या प्रोटॉन का आवेश)।

प्रश्न 24: विद्युत बल रेखाएं बंद वक्र (Closed Loops) क्यों नहीं बनाती हैं? 2 अंक

उत्तर: क्योंकि विद्युत बल रेखाएं धनावेश से प्रारंभ होकर ऋणावेश पर समाप्त हो जाती हैं, वे पुनः ऋणावेश से धनावेश की ओर वापस नहीं लौटतीं। इसीलिए ये बंद लूप नहीं बनातीं (चुंबकीय क्षेत्र रेखाओं से भिन्न)।

प्रश्न 25: किसी परावैद्युत माध्यम के अंदर रखने पर दो आवेशों के बीच बल पर क्या प्रभाव पड़ता है? 3 अंक

उत्तर: किसी परावैद्युतांक K वाले माध्यम में रखने पर दो आवेशों के मध्य लगने वाला विद्युत बल निर्वात की तुलना में K गुना घट जाता है: $F_{med} = F_{vac} / K$।

प्रश्न 26: आवेश के पृष्ठ घनत्व से क्या तात्पर्य है? इसका मात्रक लिखिए। 2 अंक

उत्तर: किसी चालक के प्रति एकांक पृष्ठ क्षेत्रफल पर उपस्थित आवेश की मात्रा को आवेश का पृष्ठीय घनत्व (σ) कहते हैं। $\sigma = q / A$। मात्रक: कूलॉम/मीटर^2 (C/m^2)।

प्रश्न 27: गौसीयन पृष्ठ (Gaussian Surface) क्या है? इसके दो प्रमुख लक्षण लिखिए। 3 अंक

उत्तर: गॉस के नियम का उपयोग करने के लिए आवेश को परिबद्ध करने वाला एक काल्पनिक बंद पृष्ठ गौसीयन पृष्ठ कहलाता है।
लक्षण: 1. यह पूर्णतः बंद पृष्ठ होना चाहिए। 2. इसके प्रत्येक बिन्दु पर विद्युत क्षेत्र E या तो पृष्ठ के लंबवत हो या समांतर हो।

प्रश्न 28: स्थिरवैद्युत परिरक्षण (Electrostatic Shielding) क्या है? 2 अंक

उत्तर: किसी निश्चित क्षेत्र को बाह्य विद्युत क्षेत्र के प्रभाव से बचाने की प्रक्रिया को स्थिरवैद्युत परिरक्षण कहते हैं। खोखले चालक के अंदर विद्युत क्षेत्र शून्य होता है, इसी कारण बिजली कड़कते समय कार/बस के कांच बंद रखना सुरक्षित रहता है।

प्रश्न 29: एकसमान विद्युत क्षेत्र में रखे द्विध्रुव की स्थितिज ऊर्जा का व्यंजक व्युत्पन्न कीजिए। 3 अंक

उत्तर: द्विध्रुव को अनंत से विद्युत क्षेत्र के अंदर लाने में तथा फिर उसे θ कोण घुमाने में किया गया कुल कार्य स्थितिज ऊर्जा के रूप में संचित होता है:

$U = -p E \cos\theta = -\vec{p} \cdot \vec{E}$

- स्थायी संतुलन ($\theta = 0°$): $U_{min} = -pE$
- अस्थायी संतुलन ($\theta = 180°$): $U_{max} = +pE$

प्रश्न 30: कूलॉम के नियम की सीमाएं (Limitations) लिखिए। 3 अंक

उत्तर:

1. यह नियम केवल स्थिर आवेशों (Static Charges) के लिए सत्य है।
2. यह केवल बिन्दु आवेशों (Point Charges) के लिए लागू होता है।
3. यह अत्यंत सूक्ष्म दूरियों ($< 10^{-15}$ m) से लेकर अत्यधिक दूरियों तक के लिए ही सही काम करता है।

11. QUICK REVISION & SMART MEMORY TRICKS

🚀 **अंतिम समय में त्वरित दोहराव (Quick Memory Points):**

- **आवेश का नियम:** $q = \pm ne$ ($e = 1.6 \times 10^{-19}$ C)
- **1 कूलॉम =** 6.25×10^{18} इलेक्ट्रॉन।
- **कूलॉम बल नियतांक:** $k = 1/(4\pi\varepsilon_0) = 9 \times 10^9$ $N \cdot m^2/C^2$
- **अक्षय स्थिति vs निरक्षीय स्थिति:** $E_axial = 2 \times E_equatorial$ (समान दूरी r के लिए)।
- **गॉस नियम:** $\Phi = q_in / \varepsilon_0$ (केवल बंद पृष्ठ के अंदर वाले कुल आवेश पर निर्भर करता है, आकार पर नहीं)।
- **खोखले गोले के अंदर:** विद्युत क्षेत्र $E = 0$ होता है।

***** बोर्ड परीक्षा में 100% सफलता के लिए यह अध्याय पूर्ण हुआ *****

कक्षा 12 भौतिक विज्ञान (Physics)

MP Board + NCERT | अध्याय 2: स्थिरवैद्युत विभव तथा धारिता (Handwritten Master Notes)

1. अध्याय का संक्षिप्त परिचय (Introduction)

स्थिरवैद्युतिकी (Electrostatics) के इस अध्याय में हम अध्ययन करते हैं कि किस प्रकार एक स्थिर विद्युत आवेश अपने चारों ओर **वैद्युत क्षेत्र** उत्पन्न करता है और उस क्षेत्र में किसी अन्य आवेश को लाने में कार्य करना पड़ता है। यह कार्य **वैद्युत स्थितिज ऊर्जा** के रूप में संचित होता है। इसके अतिरिक्त, हम ऊर्जा संचय करने वाले महत्वपूर्ण उपकरण **धारिता (Capacitance)** तथा **संधारित्र (Capacitor)** के सिद्धांतों और उनके अनुप्रयोगों का विस्तार से अध्ययन करेंगे।

2. सभी महत्वपूर्ण परिभाषाएँ (Important Definitions)

- **वैद्युत विभव (Electric Potential, V):** एकांक धनावेश को अनंत से वैद्युत क्षेत्र के किसी बिंदु तक लाने में बाह्य बल द्वारा किए गए कार्य को उस बिंदु पर वैद्युत विभव कहते हैं। $V = W / q_0$। इसका SI मात्रक **वोल्ट (V)** या **J/C** है। यह एक अदिश राशि है।
- **विभवांतर (Potential Difference, ΔV):** वैद्युत क्षेत्र में एकांक धनावेश को एक बिंदु से दूसरे बिंदु तक ले जाने में किए गए कार्य को उन दो बिंदुओं के बीच का विभवांतर कहते हैं। $V_B - V_A = W_{AB} / q_0$।
- **समविभव पृष्ठ (Equipotential Surface):** ऐसा पृष्ठ जिसके प्रत्येक बिंदु पर वैद्युत विभव का मान समान होता है, समविभव पृष्ठ कहलाता है। समविभव पृष्ठ के किन्हीं दो बिंदुओं के बीच आवेश को ले जाने में किया गया कार्य **शून्य** होता है।
- **वैद्युत धारिता (Electric Capacitance, C):** किसी चालक द्वारा आवेश ग्रहण करने की क्षमता को उसकी वैद्युत धारिता कहते हैं। $C = Q / V$। इसका SI मात्रक **फैराड (Farad, F)** है।
- **संधारित्र (Capacitor):** संधारण या संधारित्र वह समायोजन है जिसमें चालक के आकार में वृद्धि किए बिना उसकी धारिता बढ़ाई जा सकती है।
- **परावैद्युत सामर्थ्य (Dielectric Strength):** किसी परावैद्युत पदार्थ द्वारा बिना भंजन के सहन किए जाने वाले अधिकतम वैद्युत क्षेत्र को उसकी परावैद्युत सामर्थ्य कहते हैं।
- **इलेक्ट्रॉन वोल्ट (eV):** वह ऊर्जा जो कोई इलेक्ट्रॉन 1 वोल्ट के विभवांतर द्वारा त्वरित होने पर प्राप्त करता है। $1\ eV = 1.6 \times 10^{-19}\ J$।

3. महत्वपूर्ण सूत्र (Formula Box)

★ बिंदु आवेश एवं द्विध्रुव के कारण विभव

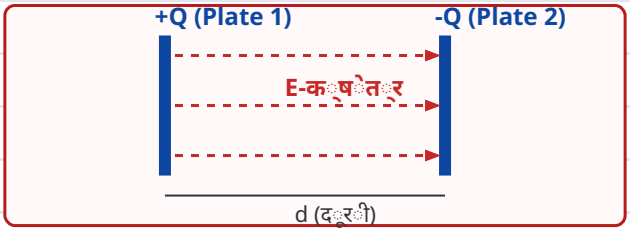
- **बिंदु आवेश के कारण विभव:** $V = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot (q / r)$
- **द्विध्रुव की अक्षीय स्थिति पर विभव:** $V = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot (p / r^2)$
- **द्विध्रुव की निरक्षीय स्थिति पर विभव:** $V = 0$
- **द्विध्रुव की सामान्य स्थिति (r, θ) पर:** $V = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot (p \cos\theta / r^2)$

★ धारिता एवं संधारित्र के सूत्र

- **विलगित गोलीय चालक की धारिता:** $C = 4\pi\varepsilon_0 R$
- **समानांतर पट्टिका संधारित्र की धारिता (वायु/निर्वात):** $C_0 = (\varepsilon_0 A) / d$
- **के-परावैद्युतांक (K) माध्यम की उपस्थिति में:** $C = (K \varepsilon_0 A) / d = K C_0$
- **आंशिक रूप से परावैद्युत पट्टी (मोटाई t) की उपस्थिति में:** $C = (\varepsilon_0 A) / [d - t + (t / K)]$

★ संधारित्रों का संयोजन एवं स्थितिज ऊर्जा

- **श्रेणीक्रम संयोजन (Series):** $1/C_{eq} = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3$
- **समानांतरक्रम संयोजन (Parallel):** $C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3$
- **आवेशित संधारित्र की संचित ऊर्जा:** $U = (1/2)\, C\, V^2 = (1/2)\, (Q^2 / C) = (1/2)\, Q\, V$
- **ऊर्जा घनत्व (Energy Density, u):** $u = (1/2)\, \varepsilon_0\, E^2$
- **उभयनिष्ठ विभव (Common Potential):** $V_{common} = (C_1V_1 + C_2V_2) / (C_1 + C_2)$
- **ऊर्जा हानि (Loss of Energy):** $\Delta U = [C_1\, C_2 / 2(C_1 + C_2)] \cdot (V_1 - V_2)^2$



चित्र *2.1:* समानांतर पट्टिका संधारित्र की संरचना

4. सभी महत्वपूर्ण बिंदु (Key Points for Concept Clarity)

1. **समविभव पृष्ठ की विशेषताएँ:**
   - समविभव पृष्ठ के प्रत्येक बिंदु पर विभव समान होता है।
   - वैद्युत क्षेत्र रेखाएं सदैव समविभव पृष्ठ के लंबवत (90°) होती हैं।
   - दो समविभव पृष्ठ कभी भी एक-दूसरे को नहीं काटते।
2. **विद्युत विभव एवं वैद्युत क्षेत्र में संबंध:** $E = -(dV / dr)$ (विभव प्रवणता)। वैद्युत क्षेत्र की दिशा में चलने पर विभव का मान घटता है।
3. **चालक के भीतर विभव:** किसी आवेशित खोखले गोलीय चालक के अंदर वैद्युत क्षेत्र शून्य होता है, परंतु विभव पूरे आयतन में नियत (Constant) तथा सतह के विभव के बराबर रहता है ($V = const$)।
4. **संधारित्र में परावैद्युत का प्रभाव:** जब संधारित्र की पट्टियों के बीच परावैद्युत माध्यम (K) भरा जाता है, तो:
   - धारिता K गुना बढ़ जाती है ($C = K\, C_0$)।
   - बैटरियाँ जुड़ी रहने पर विभव नियत रहता है, तथा आवेश $Q = K\, Q_0$ हो जाता है।
   - बैटरी हटाने पर आवेश नियत रहता है, तथा विभवांतर $V = V_0 / K$ घट जाता है।

5 & 6. बोर्ड परीक्षा स्तर के महत्वपूर्ण प्रश्न एवं उत्तर (1 - 30 Marks Distribution)

[अति लघु उत्तरीय प्रश्न - 2 अंक]

प्रश्न 1. समविभव पृष्ठ किसे कहते हैं? इसके दो मुख्य गुण लिखिए। **2 Marks**

उत्तर:

वह पृष्ठ जिसके प्रत्येक बिंदु पर वैद्युत विभव का मान समान रहता है, समविभव पृष्ठ कहलाता है।

गुण: 1. समविभव पृष्ठ पर किसी आवेश को एक बिंदु से दूसरे बिंदु तक ले जाने में किया गया कार्य शून्य होता है।

2. वैद्युत क्षेत्र रेखाएँ समविभव पृष्ठ के सदैव लंबवत होती हैं।

प्रश्न 2. सिद्ध कीजिए कि विद्युत द्विध्रुव की निरक्षीय स्थिति पर किसी बिंदु पर विद्युत विभव शून्य होता है। 2 Marks

उत्तर:

मानो निरक्षीय बिंदु P की +q तथा -q आवेशों से दूरियाँ समान ($r' = \sqrt{(r^2 + l^2)}$) हैं।

+q आवेश के कारण विभव: $V_1 = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot (q / r')$

-q आवेश के कारण विभव: $V_2 = - (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot (q / r')$

कुल विभव: $V = V_1 + V_2 = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot [(q / r') - (q / r')] = 0$। (इति सिद्धम)

प्रश्न 3. संधारित्र की धारिता को प्रभावित करने वाले कौन-कौन से कारक हैं? 2 Marks

उत्तर:

सूत्र $C = (K \varepsilon_0 A) / d$ के अनुसार संधारित्र की धारिता निम्नलिखित कारकों पर निर्भर करती है: 1. **पट्टिकाओं का क्षेत्रफल (A):** धारिता क्षेत्रफल के समानुपाती होती है ($C \propto A$)।

2. **पट्टिकाओं के बीच की दूरी (d):** धारिता दूरी के व्युत्क्रमानुपाती होती है ($C \propto 1/d$)।

3. **माध्यम का परावैद्युतांक (K):** परावैद्युत माध्यम रखने पर धारिता K गुना बढ़ जाती है ($C \propto K$)।

प्रश्न 4. 1 फैराड (1 Farad) धारिता को परिभाषित कीजिए। क्या 1 F धारिता का चालक व्यावहारिक रूप से संभव है? 2 Marks

उत्तर:

यदि किसी चालक को 1 कूलॉम आवेश देने पर उसके विभव में 1 वोल्ट की वृद्धि हो, तो उस चालक की धारिता 1 फैराड होती है।

व्यावहारिक रूप: नहीं, 1 F बहुत बड़ा मात्रक है। 1 F धारिता के गोलीय चालक की त्रिज्या पृथ्वी की त्रिज्या से भी बहुत अधिक (लगभग 9×10^9 m) होगी, जो व्यावहारिक रूप से संभव नहीं है।

प्रश्न 5. विभव प्रवणता से आप क्या समझते हैं? इसका मात्रक तथा सूत्र लिखिए। 2 Marks

उत्तर:

वैद्युत क्षेत्र की दिशा में दूरी के साथ विभव परिवर्तन की दर को **विभव प्रवणता** कहते हैं।

सूत्र: विभव प्रवणता $= - (dV / dr)$

मात्रक: वोल्ट/मीटर (V/m) या न्यूटन/कूलॉम (N/C)। यह एक सदिश राशि है।

प्रश्न 6. इलेक्ट्रॉन वोल्ट (eV) क्या है? इसका मान जूल में व्यक्त कीजिए। 2 Marks

उत्तर:

इलेक्ट्रॉन वोल्ट ऊर्जा का एक बहुत छोटा मात्रक है। 1 eV वह कार्य/ऊर्जा है जो एक इलेक्ट्रॉन 1 वोल्ट विभवांतर से त्वरित होने पर प्राप्त करता है।

$1\ eV = e \times 1\ V = 1.6 \times 10^{-19}\ C \times 1\ V = 1.6 \times 10^{-19}\ J$।

[लघु उत्तरीय प्रश्न - 3 अंक]

प्रश्न 7. किसी बिंदु आवेश Q के कारण r दूरी पर स्थित बिंदु पर विद्युत विभव का व्यंजक व्युत्पन्न कीजिए। **3 Marks**

उत्तर:

माना बिंदु O पर +Q आवेश स्थित है। इससे r दूरी पर बिंदु P है जहाँ विभव ज्ञात करना है।

माना P की दिशा में O से x दूरी पर एक परीक्षण आवेश q_0 रखा है।

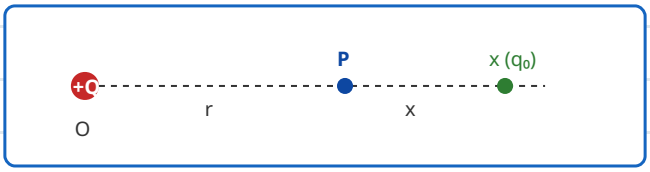
कूलॉम के नियम से, बल $F = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot (Q\, q_0 / x^2)$

परीक्षण आवेश को dx सूक्ष्म दूरी विस्थापित करने में किया गया कार्य: $dW = - F\, dx$

अनंत (∞) से r दूरी तक लाने में किया गया कुल कार्य:

$$W = \int_{\infty}^{r} - (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot (Q\, q_0 / x^2)\, dx = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot Q\, q_0 \, [\, 1/x \,]_{\infty}^{r} = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot (Q\, q_0 / r)$$

अतः विभव की परिभाषा से, $V = W / q_0 = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot (Q / r)$। (इति सिद्धम)



चित्र 2.2: बिंदु आवेश के कारण विभव का परिकलन

प्रश्न 8. संधारित्रों के श्रेणीक्रम संयोजन की तुल्य धारिता का सूत्र स्थापित कीजिए। **3 Marks**

उत्तर:

माना तीन संधारित्र जिनकी धारिताएँ क्रमशः C_1, C_2, C_3 हैं, श्रेणीक्रम में जुड़े हैं। श्रेणीक्रम में प्रत्येक संधारित्र पर आवेश Q समान रहता है, परंतु विभवांतर V_1, V_2, V_3 भिन्न होता है।

कुल विभवांतर: $V = V_1 + V_2 + V_3$

हम जानते हैं $V_1 = Q / C_1$, $V_2 = Q / C_2$, $V_3 = Q / C_3$

मान रखने पर: $V = Q\, (1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3)$

यदि तुल्य धारिता C हो, तो $V = Q / C$

अतः: $1/C = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3$।

प्रश्न 9. सिद्ध कीजिए कि एक आवेशित संधारित्र की स्थितिज ऊर्जा $U = (1/2)\, C\, V^2$ होती है। **3 Marks**

उत्तर:

माना संधारित्र को Q आवेश देने की प्रक्रिया में किसी क्षण उस पर आवेश q तथा विभव v है, जहाँ $v = q / C$।

संधारित्र को अनंत सूक्ष्म आवेश dq देने में किया गया कार्य:

$$dW = v\, dq = (q / C)\, dq$$

कुल Q आवेश देने में किया गया कार्य:

$$W = \int_0^Q (q / C)\, dq = (1 / C)\, [\, q^2 / 2 \,]_0^Q = Q^2 / (2C)$$

चूँकि $Q = CV$, अतः संचित स्थितिज ऊर्जा:

$$U = W = (1/2)\, (C^2V^2 / C) = (1/2)\, C\, V^2$$

[दीर्घ उत्तरीय प्रश्न - 4 & 5 अंक]

प्रश्न 10. समानांतर पट्टिका संधारित्र की धारिता के लिए व्यंजक व्युत्पन्न कीजिए, जब पट्टियों के बीच आंशिक रूप से 't' मोटाई की परावैद्युत पट्टी रखी हो। **5 Marks**

उत्तर:

संरचना: माना एक समानांतर पट्टिका संधारित्र की पट्टिकाओं का क्षेत्रफल A तथा उनके बीच की दूरी d है। इनके बीच 't' मोटाई तथा K परावैद्युतांक की एक पट्टी रखी है ($t < d$)।

पट्टियों के बीच वायु क्षेत्र की मोटाई = $(d - t)$

परावैद्युत माध्यम की मोटाई = t

वैद्युत क्षेत्र:

1. वायु में वैद्युत क्षेत्र: $E_0 = \sigma / \varepsilon_0 = Q / (A\,\varepsilon_0)$
2. परावैद्युत में वैद्युत क्षेत्र: $E = \sigma / (K\,\varepsilon_0) = Q / (K\,A\,\varepsilon_0)$

कुल विभवांतर (V):

$$V = E_0\,(d - t) + E \cdot t$$

$$V = [\,Q / (A\,\varepsilon_0)\,]\,(d - t) + [\,Q / (K\,A\,\varepsilon_0)\,]\,t$$

$$V = [\,Q / (A\,\varepsilon_0)\,]\,[\,(d - t) + (t / K)\,]$$

धारिता (C):

$$C = Q / V = (\varepsilon_0\,A) / [\,(d - t) + (t / K)\,]$$

विशेष स्थितियाँ:

- यदि परावैद्युत पूरे स्थान में भरा हो ($t = d$): $C = (K\,\varepsilon_0\,A) / d$
- यदि पट्टियों के बीच धातु की पट्टी हो ($K = \infty$): $C = (\varepsilon_0\,A) / (d - t)$

7. सभी महत्वपूर्ण संख्यात्मक प्रश्न (Numericals with Solutions)

प्रश्न 11. 9 μF धारिता वाले तीन संधारित्रों को (i) श्रेणीक्रम (ii) समानांतरक्रम में जोड़ा गया है। प्रत्येक स्थिति में तुल्य धारिता ज्ञात कीजिए। **Numerical**

हल:

दिया है: $C_1 = C_2 = C_3 = 9\,\mu F$

(i) श्रेणीक्रम में:

$1/C_{eq} = 1/9 + 1/9 + 1/9 = 3/9 = 1/3 \Rightarrow$ **C_{eq} = 3 μF**

(ii) समानांतरक्रम में:

$C_{eq} = 9 + 9 + 9 =$ **27 μF**।

प्रश्न 12. 12 pF का एक संधारित्र 50 V की बैटरी से जुड़ा है। संधारित्र में कितनी स्थिरवैद्युत ऊर्जा संचित होगी? Numerical

हल:

दिया है: $C = 12\ pF = 12 \times 10^{-12}\ F$, $V = 50\ V$

सूत्र: $U = (1/2)\ C\ V^2$

$U = (1/2) \times (12 \times 10^{-12}\ F) \times (50)^2$

$U = 6 \times 10^{-12} \times 2500 = 15000 \times 10^{-12}\ J =$ **1.5×10^{-8} J**।

प्रश्न 13. 20 cm त्रिज्या के एक गोलीय चालक को 10 μC का आवेश दिया जाता है। चालक के पृष्ठ पर तथा केंद्र पर वैद्युत विभव ज्ञात कीजिए। Numerical

हल:

दिया है: $R = 20\ cm = 0.2\ m$, $Q = 10\ \mu C = 10 \times 10^{-6}\ C$

(i) पृष्ठ पर विभव: $V = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot (Q / R)$

$V = (9 \times 10^9) \times (10 \times 10^{-6} / 0.2) = 4.5 \times 10^5\ Volt$

(ii) केंद्र पर विभव: आवेशित खोखले गोलीय चालक के अंदर प्रत्येक बिंदु (केंद्र सहित) पर विभव पृष्ठ के विभव के समान होता है।

अतः केंद्र पर विभव = **4.5×10^5 Volt**।

प्रश्न 14. 600 pF के एक संधारित्र को 200 V के सप्लाय से आवेशित किया जाता है। फिर इसे सप्लाय से अलग करके एक अनावेशित 600 pF के संधारित्र के साथ जोड़ा जाता है। इस प्रक्रिया में कितनी ऊर्जा की हानि होगी? Numerical

हल:

दिया है: $C_1 = 600\ pF$, $V_1 = 200\ V$, $C_2 = 600\ pF$, $V_2 = 0\ V$

ऊर्जा हानि का सूत्र: $\Delta U = [\ C_1\ C_2 / 2(C_1 + C_2)\ ] \cdot (V_1 - V_2)^2$

$\Delta U = [\ (600 \times 10^{-12} \times 600 \times 10^{-12}) / (2 \times 1200 \times 10^{-12})\ ] \times (200 - 0)^2$

$\Delta U = (150 \times 10^{-12}) \times 40000 =$ **6×10^{-6} J**।

8. सभी आवश्यक उदाहरण (Selected Essential Examples)

उदाहरण A: पृथ्वी को 6400 km त्रिज्या का गोलीय चालक मानकर उसकी धारिता ज्ञात कीजिए।

हल: $R = 6400\ km = 6.4 \times 10^6\ m$

$C = 4\pi\varepsilon_0\ R = (6.4 \times 10^6) / (9 \times 10^9) = 0.711 \times 10^{-3}\ F = 711\ \mu F$।

10. महत्वपूर्ण तथ्य, ट्रिक्स और याद रखने योग्य बिंदु (Exam Hacks)

- 💡 **ट्रिक 1 (विभव तथा क्षेत्र):** जहाँ विद्युत क्षेत्र $E = 0$ होता है (जैसे आवेशित चालक के अंदर), वहाँ विभव शून्य होना आवश्यक नहीं है; विभव नियत (Constant) रहता है।
- 💡 **ट्रिक 2 (बैटरी कनेक्शन नियम):**
  - यदि परावैद्युत डालते समय **बैटरी जुड़ी है** ⇒ $V = const$, $C \uparrow$, $Q \uparrow$, $U \uparrow$।
  - यदि **बैटरी हटा दी गई है** ⇒ $Q = const$, $C \uparrow$, $V \downarrow$, $U \downarrow$।
- 💡 **शून्य विभव बिंदु:** दो सजातीय आवेशों के बीच विभव कभी शून्य नहीं होता। दो विजातीय (+q तथा -q) आवेशों को जोड़ने वाली रेखा पर दो बिंदुओं (एक बीच में और एक बाहर) पर विभव शून्य हो सकता है।

11. Quick Revision Notes (अंतिम मिनट पुनरीक्षण)

भौतिक राशि	सूत्र (Formula)	SI मात्रक	प्रकृति (Nature)
विद्युत विभव (V)	W / q_0	Volt (J/C)	अदिश (Scalar)
विभव प्रवणता	$- dV/dr$	V/m	सदिश (Vector)
गोलीय चालक की धारिता	$4\pi\varepsilon_0 R$	Farad (F)	अदिश (Scalar)
समानांतर पट्टी संधारित्र	$K \varepsilon_0 A / d$	Farad (F)	अदिश (Scalar)
ऊर्जा घनत्व (u)	$(1/2) \varepsilon_0 E^2$	J/m^3	अदिश (Scalar)

12. पिछले वर्षों में बार-बार पूछे गए प्रश्न (PYQs) एवं बोर्ड परीक्षा उत्तर

PYQ 1 (MP Board 2023, 2019): "किसी समविभव पृष्ठ के किन्हीं दो बिंदुओं के बीच 2 μC आवेश को ले जाने में कितना कार्य करना पड़ेगा?" **1 Mark**

उत्तर:
चूँकि समविभव पृष्ठ के प्रत्येक बिंदु पर विभव समान होता है ($\Delta V = 0$), अतः कार्य $W = q \cdot \Delta V = 0\ J$ (शून्य कार्य)।

PYQ 2 (MP Board 2022, 2020): "समानांतर पट्टिका संधारित्र की पट्टिकाओं के बीच दूरी आधी कर दी जाए और परावैद्युतांक 4 का माध्यम भर दिया जाए तो धारिता पर क्या प्रभाव पड़ेगा?" **3 Marks**

उत्तर:
प्रारंभिक धारिता $C_0 = (\varepsilon_0 A) / d$
नई दूरी $d' = d / 2$, परावैद्युतांक $K = 4$
नई धारिता $C' = (K \varepsilon_0 A) / d' = (4 \cdot \varepsilon_0 A) / (d / 2) = 8 \cdot [(\varepsilon_0 A) / d] = 8 C_0$
अतः नई धारिता प्रारंभिक धारिता की **8 गुना** हो जाएगी।

PYQ 3 (MP Board 2024, 2018): "दो आवेशित चालकों को आपस में जोड़ने पर ऊर्जा की हानि का सूत्र लिखिए तथा सिद्ध कीजिए कि ऊर्जा की सदैव हानि होती है।" **4 Marks**

उत्तर:
जब दो पृथक्कृत आवेशित चालकों (धारिताएँ C_1, C_2 तथा विभव V_1, V_2) को चालक तार से जोड़ा जाता है, तो उच्च विभव से निम्न विभव की ओर आवेश का पुनर्वितरण होता है।

ऊर्जा हानि का व्यंजक:

$$\Delta U = U_{\text{प्रारंभिक}} - U_{\text{अंतिम}} = [C_1 C_2 / 2(C_1 + C_2)] \cdot (V_1 - V_2)^2$$

निष्कर्ष: चूँकि C_1 तथा C_2 धनात्मक हैं और $(V_1 - V_2)^2$ सदैव धनात्मक होता है, इसलिए $\Delta U > 0$ होगा। यह ऊर्जा हानि तार में ऊष्मा एवं प्रकाश के रूप में प्रस्फुटित होती है।

MP BOARD + NCERT | कक्षा 12 भौतिक विज्ञान

अध्याय - 3 : विद्युत धारा (Current Electricity) — 100% बोर्ड परीक्षा स्पेशल हस्तलिखित नोट्स

[विशेषताएँ: नीली व लाल स्याही शैली | संपूर्ण सैद्धांतिक व्युत्पत्ति | प्रश्न 1 से 30 हल सहित | आंकिक प्रश्न | PYQs 2018-2025]

1. अध्याय का संक्षिप्त परिचय (Chapter Introduction)

आवेश की गति की अवस्था का अध्ययन **गतिमय विद्युत (Current Electricity)** कहलाता है। स्थिर विद्युत में आवेश विराम अवस्था में रहते हैं, परंतु जब किसी चालक के सिरों पर विभवांतर स्थापित किया जाता है, तो मुक्त इलेक्ट्रॉन निश्चित दिशा में गति करने लगते हैं, जिससे **विद्युत धारा** का प्रवाह होता है। यह अध्याय बोर्ड परीक्षा की दृष्टि से अत्यंत महत्वपूर्ण है क्योंकि इसमें से **7 से 8 अंक** के प्रश्न प्रतिवर्ष पूछे जाते हैं।

2. सभी महत्वपूर्ण परिभाषाएँ (Key Definitions)

1. **विद्युत धारा (Electric Current):** किसी चालक के किसी अनुप्रस्थ काट से प्रति एकांक समय में प्रवाहित होने वाले आवेश की मात्रा को विद्युत धारा कहते हैं। यह एक **अदिश राशि** है। इसका SI मात्रक **एम्पीयर (A)** है।
2. **धारा घनत्व (Current Density, J):** चालक के भीतर किसी बिंदु पर प्रति एकांक अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल से अभिलंबवत गुजरने वाली विद्युत धारा को धारा घनत्व कहते हैं। यह एक **सदिश राशि** है। मात्रक: A/m^2।
3. **अनुगमन वेग / अपवाह वेग (Drift Velocity, v_d):** बाह्य विद्युत क्षेत्र के प्रभाव में चालक के भीतर मुक्त इलेक्ट्रॉनों द्वारा प्राप्त किया गया औसत सूक्ष्म वेग अनुगमन वेग कहलाता है। इसका मान लगभग 10^{-4} m/s होता है।
4. **गतिशीलता (Mobility, μ):** प्रति एकांक विद्युत क्षेत्र की तीव्रता पर आवेश वाहक द्वारा प्राप्त अनुगमन वेग को गतिशीलता कहते हैं। ($\mu = v_d / E$)।
5. **ओम का नियम (Ohm's Law):** यदि किसी चालक की भौतिक अवस्थाएँ (जैसे ताप, लंबाई, दाब आदि) अपरिवर्तित रहें, तो चालक के सिरों पर लगाया गया विभवांतर उसमें प्रवाहित धारा के समानुपाती होता है ($V \propto I$ अर्थात् $V = IR$)।
6. **विशिष्ट प्रतिरोध / प्रतिरोधकता (Resistivity, ρ):** इकाई लंबाई और इकाई अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल वाले चालक के प्रतिरोध को उस पदार्थ की प्रतिरोधकता कहते हैं। इसका SI मात्रक **ओम-मीटर (Ω·m)** है।
7. **विद्युत चालकता (Electrical Conductivity, σ):** प्रतिरोधकता के व्युत्क्रम को चालकता कहते हैं ($\sigma = 1 / \rho$)। मात्रक: $\Omega^{-1}m^{-1}$ या S/m (सीमेंस/मीटर)।
8. **विद्युत वाहक बल (EMF, E):** एकांक धनावेश को पूरे परिपथ में (सेल के अंदर सहित) प्रवाहित करने में सेल द्वारा दी गई कुल ऊर्जा को सेल का विद्युत वाहक बल कहते हैं। मात्रक: **वोल्ट (V)**।
9. **टर्मिनल विभवांतर (Terminal Voltage, V):** एकांक धनावेश को परिपथ के किन्हीं दो बिंदुओं के बीच प्रवाहित करने में किया गया कार्य टर्मिनल विभवांतर कहलाता है।
10. **सेल का आंतरिक प्रतिरोध (Internal Resistance, r):** सेल के अंदर विद्युत अपघट्य द्वारा विद्युत धारा के प्रवाह में उत्पन्न रुकावट को सेल का आंतरिक प्रतिरोध कहते हैं।

3. अध्याय के सभी सूत्र (Master Formula Box)

⚡ धारा, अनुगमन वेग एवं ओम का नियम

भौतिक राशि	सूत्र (Formula)	संकेत व मात्रक
विद्युत धारा	$I = Q / t = n e / t$	Q = आवेश, n = इलेक्ट्रॉनों की संख्या (Ampere)
धारा घनत्व	$J = I / A = n e v_d$	A = क्षेत्रफल (A/m^2)
अनुगमन वेग	$v_d = (e E / m) \tau = (e V / m l) \tau$	τ = विश्रांति काल, E = विद्युत क्षेत्र
ओम का नियम / प्रतिरोध	$V = I R$ | $R = \rho (l / A)$	R = प्रतिरोध (Ohm, Ω)
प्रतिरोधकता (सूक्ष्म रूप)	$\rho = m / (n e^2 \tau)$	m = इलेक्ट्रॉन का द्रव्यमान, n = संख्या घनत्व
ताप पर निर्भरता	$R_T = R_0 (1 + \alpha \Delta T)$	α = प्रतिरोध ताप गुणांक ($°C^{-1}$)

🔋 सेल, परिपथ एवं मापन यंत्र

अवधारणा / यंत्र	मुख्य सूत्र	विवरण
सेल समीकरण	$E = V + I r \Rightarrow I = E / (R + r)$	r = आंतरिक प्रतिरोध, R = बाह्य प्रतिरोध
आंतरिक प्रतिरोध	$r = R (E / V - 1) = R (l_1 / l_2 - 1)$	l_1, l_2 = विभवमापी की संतुलन लंबाइयाँ
प्रतिरोधों का संयोजन	श्रेणी: $R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$ समांतर: $1/R_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$	श्रेणी में धारा समान, समांतर में विभवांतर समान रहता है।
व्हीटस्टोन सेतु संतुलन	$P / Q = R / S$	धारामापी में धारा $I_G = 0$
मीटर सेतु (अज्ञात प्रतिरोध)	$S = R (100 - l) / l$	l = संतुलन लंबाई (cm में)
विभव प्रवणता	$K = V / L = (I R_{AB}) / L$	प्रति एकांक लंबाई विभव पतन (V/m)
विद्युत शक्ति व ऊष्मा	$P = VI = I^2R = V^2 / R$ $H = I^2 R t$ (जूल नियम)	शक्ति का मात्रक: वाट (Watt, W)

4. मुख्य सैद्धांतिक व्युत्पत्ति एवं हस्तलिखित आरेख (Derivations & Diagrams)

(A) अनुगमन वेग एवं विद्युत धारा में संबंध (Relation between I and v_d)

माना किसी चालक की लंबाई l तथा अनुप्रस्थ काट का क्षेत्रफल A है। चालक के प्रति एकांक आयतन में मुक्त इलेक्ट्रॉनों की संख्या n है।

- चालक का कुल आयतन = $A \times l$
- चालक में कुल मुक्त इलेक्ट्रॉनों की संख्या = $N = n A l$
- चालक में कुल आवेश = $Q = N e = n A l e$

जब चालक के सिरों पर विभवांतर V लगाया जाता है, तो इलेक्ट्रॉन v_d अनुगमन वेग से गति करते हैं। इलेक्ट्रॉनों को चालक पार करने में लगा समय:

$$t = l / v_d$$

अतः प्रवाहित विद्युत धारा:

$$I = Q / t = (n A l e) / (l / v_d) = n e A v_d$$

चित्र 4.1: चालक के भीतर इलेक्ट्रॉनों का अनुगमन वेग (v_d)

(B) व्हीटस्टोन सेतु का सिद्धांत (Wheatstone Bridge Principle)

प्रो. व्हीटस्टोन ने चार प्रतिरोधों को एक चतुर्भुज की चार भुजाओं में जोड़कर अज्ञात प्रतिरोध ज्ञात करने का एक परिपथ तैयार किया। जब चतुर्भुज के विकर्ण में लगे धारामापी (G) में कोई विक्षेप न हो, तो सेतु **संतुलित अवस्था** में कहलाता है।

संतुलन का प्रतिबंध: $P / Q = R / S$

चित्र 4.2: व्हीटस्टोन सेतु परिपथ का आरेख

5. बोर्ड परीक्षा अति महत्वपूर्ण प्रश्न एवं उत्तर (प्रश्न 1 से 30)

क. 2 अंक वाले अति लघु उत्तरीय प्रश्न (Questions 1 to 10)

प्रश्न 1: अनुगमन वेग (Drift Velocity) से आप क्या समझते हैं? इसका परिमाण कितना होता है? 2 अंक

उत्तर: चालक के सिरों पर विभवांतर लगाने पर उसमें उपस्थित मुक्त इलेक्ट्रॉन जिस नियत औसत सूक्ष्म वेग से उच्च विभव वाले सिरे की ओर गति करते हैं, उसे **अनुगमन वेग** (v_d) कहते हैं। धातुओं में इसका परिमाण लगभग 10^{-4} m/s होता है।

प्रश्न 2: धारा घनत्व किसे कहते हैं? यह सदिश राशि है या अदिश? इसका मात्रक लिखिए। 2 अंक

उत्तर: चालक के अंदर किसी बिंदु पर प्रति एकांक अनुप्रस्थ काट के क्षेत्रफल से अभिलंबवत बहने वाली धारा को धारा घनत्व (J) कहते हैं। ($J = I / A$)। यह एक **सदिश राशि** है और इसका SI मात्रक **एम्पीयर/मीटर²** (A/m^2) है।

प्रश्न 3: ओमीय एवं अन-ओमीय प्रतिरोध में दो अंतर लिखिए। 2 अंक

उत्तर:

1. **ओमीय प्रतिरोध:** जो परिपथ ओम के नियम का पालन करते हैं (जैसे तांबे का तार)। इनका V-I ग्राफ एक सरल रेखा होता है।
2. **अन-ओमीय प्रतिरोध:** जो ओम के नियम का पालन नहीं करते (जैसे डायोड, ट्रांजिस्टर)। इनका V-I ग्राफ वक्राकार होता है।

प्रश्न 4: ताप बढ़ाने पर धातुओं एवं अर्धचालकों की प्रतिरोधकता पर क्या प्रभाव पड़ता है? 2 अंक

उत्तर:

• **धातुओं (Conductors):** ताप बढ़ाने पर विश्रांति काल (τ) घटता है, जिससे प्रतिरोधकता **बढ़ती है**।

• **अर्धचालकों (Semiconductors):** ताप बढ़ाने पर मुक्त इलेक्ट्रॉनों की संख्या (n) तेजी से बढ़ती है, जिससे प्रतिरोधकता **घटती है**।

प्रश्न 5: गतिशीलता (Mobility) किसे कहते हैं? इसका सूत्र एवं SI मात्रक लिखिए। 2 अंक

उत्तर: किसी आवेश वाहक के प्रति एकांक विद्युत क्षेत्र में अनुगमन वेग को उसकी गतिशीलता (μ) कहते हैं।

सूत्र: $\mu = v_d / E$ | मात्रक: $m^2 / (V \cdot s)$ या $m^2 V^{-1} s^{-1}$।

प्रश्न 6: किरचॉफ का प्रथम नियम (धारा नियम) किस संरक्षण नियम पर आधारित है? 2 अंक

उत्तर: किरचॉफ का प्रथम नियम (सुलभ बिंदु नियम / धारा नियम $\sum I = 0$) **आवेश संरक्षण के नियम (Law of Conservation of Charge)** पर आधारित है।

प्रश्न 7: किरचॉफ का द्वितीय नियम (पाश नियम) किस संरक्षण नियम पर आधारित है? 2 अंक

उत्तर: किरचॉफ का द्वितीय नियम (वोल्टता नियम $\sum IR = \sum E$) **ऊर्जा संरक्षण के नियम (Law of Conservation of Energy)** पर आधारित है।

प्रश्न 8: अतिचालकता (Superconductivity) किसे कहते हैं? 2 अंक

उत्तर: अति निम्न ताप पर (एक निश्चित क्रांतिक ताप पर) कुछ पदार्थों का विद्युत प्रतिरोध अचानक शून्य हो जाता है। इस परिघटना को **अतिचालकता** और ऐसे पदार्थ को अतिचालक कहते हैं (जैसे पारा 4.2 K पर)।

प्रश्न 9: विभवमापी वोल्टमीटर से श्रेष्ठ क्यों है? (अत्यंत महत्वपूर्ण) 2 अंक

उत्तर: विभवमापी शून्य विक्षेप की स्थिति पर कार्य करता है, इसलिए यह मापन के दौरान परिपथ से कोई धारा नहीं लेता और सही विद्युत वाहक बल मापता है। जबकि वोल्टमीटर मापने के लिए परिपथ से कुछ धारा अवश्य लेता है।

प्रश्न 10: तांबे के तार को खींचकर उसकी लंबाई दोगुनी करने पर उसके प्रतिरोध पर क्या प्रभाव पड़ेगा? 2 अंक

उत्तर: जब तार को खींचा जाता है, तो आयतन स्थिर रहता है। प्रतिरोध $R \propto l^2$ होता है। लंबाई दोगुनी ($2l$) करने पर नया प्रतिरोध प्रारंभिक प्रतिरोध का **4 गुना ($4R$)** हो जाएगा।

ख. 3 अंक वाले लघु उत्तरीय प्रश्न (Questions 11 to 18)

प्रश्न 11: अनुगमन वेग (v_d) तथा धारा घनत्व (J) में संबंध स्थापित कीजिए। 3 अंक

उत्तर: माना किसी चालक का अनुप्रस्थ क्षेत्रफल A है और इसमें प्रवाहित धारा I है।
हम जानते हैं कि धारा एवं अनुगमन वेग में संबंध:

$$I = n e A v_d$$

धारा घनत्व की परिभाषा से: $J = I / A$
समीकरण में I का मान रखने पर:

$$J = (n e A v_d) / A = n e v_d$$

यही धारा घनत्व एवं अनुगमन वेग में अभीष्ट संबंध है।

प्रश्न 12: सेल के विद्युत वाहक बल (EMF) तथा टर्मिनल विभवांतर में तीन मुख्य अंतर लिखिए। 3 अंक

उत्तर:

क्र.	विद्युत वाहक बल (EMF)	टर्मिनल विभवांतर (V)
1	खुले परिपथ में सेल के दोनों ध्रुवों का विभवांतर।	बंद परिपथ में परिपथ के दो बिंदुओं के बीच का विभवांतर।
2	यह परिपथ के प्रतिरोध पर निर्भर नहीं करता।	यह परिपथ के बाह्य प्रतिरोध पर निर्भर करता है।
3	इसका मान सदैव टर्मिनल विभवांतर से अधिक होता है (डिस्चार्जिंग में)।	इसका मान EMF से कम होता है।

प्रश्न 13: सेल के आंतरिक प्रतिरोध से आप क्या समझते हैं? यह किन-किन कारकों पर निर्भर करता है? 3 अंक

उत्तर: सेल के अंदर घोल (विद्युत अपघट्य) द्वारा धारा के प्रवाह में उत्पन्न रुकावट को सेल का **आंतरिक प्रतिरोध (r)** कहते हैं।
निर्भरता:
1. **प्लेटों की दूरी (d):** दूरी बढ़ाने पर r बढ़ता है ($r \propto d$)।
2. **डूबे क्षेत्रफल (A):** क्षेत्रफल बढ़ाने पर r घटता है ($r \propto 1/A$)।
3. **विद्युत अपघट्य की सांद्रता (c):** सांद्रता बढ़ाने पर r बढ़ता है।
4. **तापमान (T):** ताप बढ़ाने पर आंतरिक प्रतिरोध घटता है।

प्रश्न 14: प्रतिरोधकों के समांतर क्रम (Parallel) संयोजन के लिए तुल्य प्रतिरोध का सूत्र व्युत्पन्न कीजिए। 3 अंक

उत्तर: मान लीजिए तीन प्रतिरोध R_1, R_2, R_3 समांतर क्रम में विभवांतर V के साथ जुड़े हैं। मुख्य धारा I तीन शाखाओं में विभाजित होती है: $I = I_1 + I_2 + I_3$।
ओम के नियम से: $I_1 = V/R_1$, $I_2 = V/R_2$, $I_3 = V/R_3$.
कुल धारा: $I = V (1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3)$.
यदि तुल्य प्रतिरोध R_{eq} हो, तो $I = V / R_{eq}$.
तुलना करने पर:

$$1 / R_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$$

प्रश्न 15: मीटर सेतु (Meter Bridge) किस सिद्धांत पर कार्य करता है? परिपथ चित्र बनाइए। 3 अंक

उत्तर: मीटर सेतु **व्हीटस्टोन सेतु के सिद्धांत** ($P/Q = R/S$) पर आधारित एक व्यावहारिक उपकरण है। इसका उपयोग चालक का अज्ञात प्रतिरोध ज्ञात करने में किया जाता है। इसमें 1 मीटर लंबा मैंगनीन या कांस्टेंटन का तार लगा होता है।

सूत्र: $S = R (100 - l) / l$ (जहाँ l संतुलन लंबाई है)।

प्रश्न 16: विभव प्रवणता (Potential Gradient) किसे कहते हैं? इसका सूत्र एवं SI मात्रक लिखिए। 3 अंक

उत्तर: विभवमापी के तार की प्रति एकांक लंबाई में होने वाले विभव पतन (पतन की दर) को **विभव प्रवणता** (K) कहते हैं।

सूत्र: $K = V / L$ (जहाँ V = तार के सिरों पर विभवांतर, L = तार की कुल लंबाई)।

SI मात्रक: **वोल्ट/मीटर (V/m)** या वोल्ट/सेमी (V/cm)।

प्रश्न 17: पेल्टियर प्रभाव एवं सीबेक प्रभाव में अंतर स्पष्ट कीजिए। 3 अंक

उत्तर: सीबेक प्रभाव में दो भिन्न धातुओं की संधियों पर तापांतर उत्पन्न करने से विद्युत धारा प्रवाहित होती है (तापीय ऊर्जा → विद्युत ऊर्जा)। जबकि पेल्टियर प्रभाव में संधि से धारा प्रवाहित करने पर संधि पर ऊष्मा का अवशोषण या उत्सर्जन होता है (सीबेक प्रभाव का उत्क्रम)।

प्रश्न 18: कार्बन प्रतिरोधक के वर्ण कोड (Color Code) से प्रतिरोध ज्ञात करने की विधि संक्षेप में समझाइए। 3 अंक

उत्तर: कार्बन प्रतिरोधक पर 4 रंगीन पट्टियाँ (A, B, C, D) होती हैं।

- पहली दो पट्टियाँ (A, B): सार्थक अंक (First two digits)
- तीसरी पट्टी (C): 10 की घात (Multiplier 10^C)
- चौथी पट्टी (D): सहनशीलता / शुद्धता सीमा (Tolerance - Sona: ±5%, Chandi: ±10%, No color: ±20%)

ट्रिक: **B B ROY Great Britain Very Good Wife** (0 से 9 तक कोड)।

ग. 4 अंक वाले दीर्घ उत्तरीय प्रश्न (Questions 19 to 24)

प्रश्न 19: अनुगमन वेग की अवधारणा के आधार पर ओम के नियम का व्युत्पत्ति कीजिए। 4 अंक

उत्तर: माना लंबाई l तथा अनुप्रस्थ क्षेत्रफल A के चालक पर विभवांतर V लगाया गया है।

चालक में विद्युत क्षेत्र: $E = V / l$.

प्रत्येक इलेक्ट्रॉन पर बल: $F = e E = e V / l$.

इलेक्ट्रॉन का त्वरण: $a = F / m = (e V) / (m l)$.

अनुगमन वेग: $v_d = a \tau = (e V \tau) / (m l)$ (जहाँ τ विश्रांति काल है)।

धारा तथा अनुगमन वेग में संबंध से: $I = n e A v_d$.

v_d का मान रखने पर:

$$I = n e A [(e V \tau) / (m l)] = [(n e^2 A \tau) / (m l)] V$$

अतः:

$$V / I = (m l) / (n e^2 A \tau) = R \text{ (नियतांक)}$$

नियत ताप पर m, l, n, e, A, τ सभी नियत रहते हैं। अतः $V / I = R$ (ओम का नियम सिद्ध हुआ)।

प्रश्न 20: किरचॉफ के दोनों नियमों को चित्र बनाकर स्पष्ट समझाइए। 4 अंक

उत्तर:

1. प्रथम नियम (धारा नियम / संधि नियम): किसी विद्युत परिपथ में किसी भी संधि पर मिलने वाली समस्त धाराओं का बीजगणितीय योग शून्य होता है।

$$\sum I = 0$$

(संधि की ओर आने वाली धाराएँ धनात्मक तथा दूर जाने वाली ऋणात्मक मानी जाती हैं: $I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0$)।

2. द्वितीय नियम (पाश नियम / वोल्टता नियम): किसी बंद परिपथ (लूप) के विभिन्न भागों में प्रवाहित धाराओं और उनके संगत प्रतिरोधों के गुणनफलों का बीजगणितीय योग उस पाश में लगे कुल विद्युत वाहक बलों के योग के बराबर होता है।

$$\sum I R = \sum E$$

प्रश्न 21: सेलों के श्रेणीक्रम संयोजन के लिए कुल धारा का व्यंजक प्राप्त कीजिए। यह संयोजन कब लाभदायक है? 4 अंक

उत्तर: माना n समान सेल (प्रत्येक का EMF = E, आंतरिक प्रतिरोध = r) श्रेणीक्रम में बाह्य प्रतिरोध R से जुड़े हैं।

- कुल विद्युत वाहक बल = $n E$
- कुल आंतरिक प्रतिरोध = $n r$
- परिपथ का कुल प्रतिरोध = $R + n r$

अतः परिपथ में प्रवाहित कुल धारा:

$$I = (n E) / (R + n r)$$

उपयोगिता / लाभ: यदि बाह्य प्रतिरोध आंतरिक प्रतिरोध की तुलना में बहुत अधिक हो ($R >> n r$), तो $I \approx n (E/R)$, अर्थात् एक सेल से प्राप्त धारा की n गुनी धारा प्राप्त होती है। अतः श्रेणीक्रम तब लाभदायक है जब **बाह्य प्रतिरोध बहुत अधिक हो**।

प्रश्न 22: सेलों के समांतर क्रम संयोजन के लिए कुल धारा का व्यंजक निकालिए। यह कब लाभदायक है? 4 अंक

उत्तर: माना m समान सेल समांतर क्रम में जुड़े हैं।

- कुल विद्युत वाहक बल = E (समांतर में EMF समान रहता है)
- कुल आंतरिक प्रतिरोध = r / m
- परिपथ का कुल प्रतिरोध = $R + (r / m) = (m R + r) / m$

अतः प्रवाहित कुल धारा:

$$I = (m E) / (m R + r)$$

लाभ: यदि आंतरिक प्रतिरोध बाह्य प्रतिरोध से बहुत अधिक हो ($r >> m R$), तो $I \approx m (E/r)$। अतः समांतर क्रम तब लाभदायक है जब **सेल का आंतरिक प्रतिरोध बाह्य प्रतिरोध से बहुत अधिक हो**।

प्रश्न 23: विभवमापी की सुग्राहिता (Sensitivity) से क्या तात्पर्य है? इसे कैसे बढ़ाया जा सकता है? 4 अंक

उत्तर: विभवमापी की वह क्षमता जिससे वह अत्यंत सूक्ष्म विभवांतर को भी यथार्थता से माप सके, उसकी **सुग्राहिता** कहलाती है। सुग्राहिता विभव प्रवणता (K) के व्युत्क्रमानुपाती होती है ($Sensitivity \propto 1 / K$)।

सुग्राहिता बढ़ाने के उपाय:

1. विभवमापी के तार की लंबाई (L) बढ़ाकर (लंबाई बढ़ाने से $K = V/L$ घटता है)।
2. प्राथमिक परिपथ में धारा का मान घटाकर (धारा नियंत्रक द्वारा)।

प्रश्न 24: विद्युत शक्ति (Electric Power) तथा विद्युत ऊर्जा को समझाइए। इनके मात्रक एवं संबंध लिखिए। 4 अंक

उत्तर:

• **विद्युत शक्ति (P):** किसी परिपथ में विद्युत ऊर्जा के व्यय होने की दर को विद्युत शक्ति कहते हैं। ($P = W / t = V I = I^2 R = V^2 / R$)। SI मात्रक: **वाट (Watt, W)**।

• **विद्युत ऊर्जा (E):** कार्य करने की कुल क्षमता। ($E = P \times t$)। व्यावसायिक मात्रक: **किलोवाट-घंटा (kWh) या यूनिट**।

• **संबंध:** $1\ kWh = 1000\ W \times 3600\ s = 3.6 \times 10^6\ J$ **(जूल)**.

घ. 5 अंक वाले विस्तृत निबंधात्मक प्रश्न (Questions 25 to 30)

प्रश्न 25: किरचॉफ के नियमों की सहायता से व्हीटस्टोन सेतु के संतुलन का प्रतिबंध $P/Q = R/S$ स्थापित कीजिए। 5 अंक

उत्तर: चित्र 4.2 के अनुसार व्हीटस्टोन सेतु में चार प्रतिरोध P, Q, R, S जुड़े हैं। संतुलन की स्थिति में धारामापी शाखा BD में कोई धारा नहीं बहती ($I_G = 0$)।

अतः बिंदु B पर: $I_1 = I_2$ तथा बिंदु D पर: $I_3 = I_4$.

• **बंद पाश ABDA में किरचॉफ के द्वितीय नियम से:**

$$I_1 P - I_3 R = 0 \Rightarrow I_1 P = I_3 R \quad ---(1)$$

• **बंद पाश BCDB में किरचॉफ के द्वितीय नियम से:**

$$I_2 Q - I_4 S = 0 \Rightarrow I_2 Q = I_4 S \quad ---(2)$$

चूँकि $I_1 = I_2$ तथा $I_3 = I_4$, अतः समीकरण (2) को लिखा जा सकता है: $I_1 Q = I_3 S$.

समीकरण (1) में समीकरण (2) का भाग देने पर:

$$(I_1 P) / (I_1 Q) = (I_3 R) / (I_3 S) \Rightarrow P / Q = R / S$$

इति सिद्धम्। यह व्हीटस्टोन सेतु के संतुलन का अभीष्ट नियम है।

प्रश्न 26: विभवमापी की सहायता से दो सेलों के विद्युत वाहक बलों (E_1 व E_2) की तुलना करने के प्रयोग का वर्णन निम्नलिखित शीर्षकों के अंतर्गत कीजिए: (i) परिपथ का रेखाचित्र, (ii) सिद्धांत एवं सूत्र, (iii) दो सावधानियाँ। 5 अंक

उत्तर:

(i) सिद्धांत एवं सूत्र व्युत्पत्ति: माना विभवमापी के तार की विभव प्रवणता K है।

• प्रथम सेल E_1 को परिपथ में जोड़ने पर यदि संतुलन लंबाई l_1 प्राप्त होती है, तो:

$$E_1 = K l_1 \quad ---(1)$$

• द्वितीय सेल E_2 को परिपथ में जोड़ने पर यदि संतुलन लंबाई l_2 प्राप्त होती है, तो:

$$E_2 = K l_2 \quad ---(2)$$

समीकरण (1) में (2) का भाग देने पर:

$$E_1 / E_2 = l_1 / l_2$$

(ii) सावधानियाँ:

1. संचायक सेल (मुख्य सेल) का EMF परीक्षण सेलों के EMF से अधिक होना चाहिए।
2. सभी सेलों के धन ध्रुव विभवमापी के एक ही सिरे (A) से जुड़े होने चाहिए।

प्रश्न 27: विभवमापी की सहायता से किसी सेल का आंतरिक प्रतिरोध (r) ज्ञात करने के प्रयोग का वर्णन सूत्र व्युत्पत्ति सहित कीजिए। 5 अंक

उत्तर:

• जब सेल खुले परिपथ में हो (कुंजी K_2 खुली हो), तो संतुलन लंबाई l_1 प्राप्त होती है। अतः सेल का EMF:

$$E = K\, l_1 \quad ---(1)$$

• जब प्रतिरोध बॉक्स से प्रतिरोध R निकालकर कुंजी K_2 बंद की जाती है, तो संतुलन लंबाई l_2 प्राप्त होती है। अतः टर्मिनल विभवांतर:

$$V = K\, l_2 \quad ---(2)$$

• हम जानते हैं कि सेल का आंतरिक प्रतिरोध: $r = R\,[\,(E / V) - 1\,]$.

समीकरण (1) तथा (2) से $E/V = l_1/l_2$ रखने पर:

$$r = R\,[\,(l_1 / l_2) - 1\,]$$

इस सूत्र की सहायता से आंतरिक प्रतिरोध r की गणना की जाती है।

प्रश्न 28: सेलों के मिश्रित क्रम (Mixed Grouping) संयोजन के लिए कुल धारा का सूत्र प्राप्त कीजिए तथा अधिकतम धारा प्राप्त करने की शर्त लिखिए। 5 अंक

उत्तर: माना n सेल श्रेणीक्रम में जुड़े हैं और ऐसी m पंक्तियाँ समांतर क्रम में जुड़ी हैं (कुल सेल = $N = m \times n$)। प्रत्येक सेल का EMF = E तथा आंतरिक प्रतिरोध = r है।

• प्रत्येक पंक्ति का EMF = $n\,E$ → कुल EMF = $n\,E$

• प्रत्येक पंक्ति का आंतरिक प्रतिरोध = $n\,r$ → कुल आंतरिक प्रतिरोध = $(n\,r) / m$

• कुल परिपथ प्रतिरोध = $R + (n\,r / m)$

अतः कुल धारा:

$$I = (n\,E) / [\,R + (n\,r / m)\,] = (m\,n\,E) / (m\,R + n\,r)$$

अधिकतम धारा की शर्त: धारा I का मान अधिकतम तब होगा जब हर $(m\,R + n\,r)$ न्यूनतम हो। गणितीय रूप से:

$$m\,R = n\,r \;\Rightarrow\; R = (n\,r) / m$$

अर्थात् **जब बाह्य प्रतिरोध सेलों के कुल आंतरिक प्रतिरोध के बराबर हो**, तब परिपथ में अधिकतम धारा प्राप्त होती है।

प्रश्न 29: मीटर सेतु द्वारा किसी तार का अज्ञात प्रतिरोध ज्ञात करने की प्रयोग विधि, सिद्धांत एवं सूत्र की स्थापना कीजिए। इसमें तांबे की मोटी पट्टियाँ क्यों लगाई जाती हैं? 5 अंक

उत्तर:

तांबे की मोटी पट्टियाँ लगाने का कारण: तांबे की पट्टियों का अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल बहुत अधिक होता है, जिससे उनका प्रतिरोध नगण्य रहता है और मापन में अंत-त्रुटि (End Resistance Error) न्यूनतम हो जाती है।

सिद्धांत: 100 सेमी लंबे तार AC के संतुलन बिंदु B पर लंबाई $AB = l$ सेमी तथा $BC = (100 - l)$ सेमी हो, तो तार के भागों के प्रतिरोध $P = \sigma\, l$ तथा $Q = \sigma\,(100 - l)$ होंगे।

व्हीटستون नियम से: $P / Q = R / S \;\Rightarrow\; (\sigma\, l) / [\,\sigma\,(100 - l)\,] = R / S$.

अज्ञात प्रतिरोध S का सूत्र:

$$S = [\,R\,(100 - l)\,] / l$$

प्रश्न 30: विद्युत अपघट्य में धारा प्रवाह की प्रक्रिया को समझाइए। यह धात्विक चालकों में धारा प्रवाह से किस प्रकार भिन्न है? 5 अंक

उत्तर:

• **धात्विक चालक (Metallic Conductors):** धारा का प्रवाह केवल मुक्त इलेक्ट्रॉनों (Free Electrons) की गति के कारण होता है। इसमें कोई रासायनिक परिवर्तन नहीं होता और ताप बढ़ाने पर प्रतिरोध बढ़ता है।

• **विद्युत अपघट्य (Electrolytic Conduction):** धारा का प्रवाह धन आयनों (*Cations*) एवं ऋण आयनों (*Anions*) की विपरीत गतियों के कारण होता है। इसमें रासायनिक परिवर्तन (अपघटन) होता है तथा ताप बढ़ाने पर श्यानता घटने के कारण प्रतिरोध घटता है।

6. महत्वपूर्ण हल सहित आंकिक प्रश्न (Numerical Problems)

आंकिक प्रश्न 1: एक तांबे के तार का अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल $1 \times 10^{-7}\ m^2$ है। इसमें $1.5\ A$ की धारा बह रही है। यदि मुक्त इलेक्ट्रॉनों की संख्या घनत्व $9 \times 10^{28} / m^3$ हो, तो अनुगमन वेग की गणना कीजिए।

हल:

दिया है: $A = 1 \times 10^{-7}\ m^2$, $I = 1.5\ A$, $n = 9 \times 10^{28} / m^3$, $e = 1.6 \times 10^{-19}\ C$.

सूत्र: $I = n\,e\,A\,v_d \Rightarrow v_d = I / (n\,e\,A)$.

मान रखने पर:

$$v_d = 1.5 / (9 \times 10^{28} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1 \times 10^{-7})$$

$$v_d = 1.5 / (14.4 \times 10^{2}) = 1.5 / 1440 \approx 1.04 \times 10^{-3}\ m/s$$

उत्तर: अनुगमन वेग $v_d = 1.04 \times 10^{-3}\ m/s$ (या $1.04\ mm/s$)।

आंकिक प्रश्न 2: 10 V विद्युत वाहक बल और 3 Ω आंतरिक प्रतिरोध वाली बैटरी को एक प्रतिरोधक से जोड़ा गया है। यदि परिपथ में धारा 0.5 A हो, तो (i) बाह्य प्रतिरोधक का मान तथा (ii) बैटरी की टर्मिनल वोल्टता ज्ञात कीजिए।

हल:

दिया है: $E = 10\ V$, $r = 3\ \Omega$, $I = 0.5\ A$.

(i) सूत्र: $I = E / (R + r) \Rightarrow 0.5 = 10 / (R + 3)$

$$R + 3 = 10 / 0.5 = 20 \Rightarrow R = 20 - 3 = 17\ \Omega$$

(ii) टर्मिनल वोल्टता: $V = E - I\,r = 10 - (0.5 \times 3) = 10 - 1.5 = 8.5\ V$.

उत्तर: बाह्य प्रतिरोध = **17 Ω**, टर्मिनल विभवांतर = **8.5 V**.

आंकिक प्रश्न 3: एक मीटर सेतु में जब प्रतिरोध बॉक्स से 12 Ω का प्रतिरोध निकाला जाता है, तो संतुलन बिंदु 40 सेमी की दूरी पर प्राप्त होता है। अज्ञात प्रतिरोध का मान ज्ञात कीजिए।

हल:

दिया है: $R = 12\ \Omega$, $l = 40\ cm$, अतः $(100 - l) = 60\ cm$.

सूत्र: $S = [\,R\,(100 - l)\,] / l$.

मान रखने पर:

$$S = (12 \times 60) / 40 = 720 / 40 = 18\ \Omega$$

उत्तर: अज्ञात प्रतिरोध $S = 18\ \Omega$.

आंकिक प्रश्न 4: विभवमापी के प्रयोग में 1.25 V विद्युत वाहक बल वाले सेल के लिए संतुलन बिंदु 35.0 सेमी पर प्राप्त होता है। यदि इस सेल को किसी अन्य सेल से बदल दिया जाए, तो संतुलन बिंदु 63.0 सेमी पर स्थानांतरित हो जाता है। दूसरे सेल का EMF ज्ञात कीजिए।

हल:

दिया है: $E_1 = 1.25\ V$, $l_1 = 35.0\ cm$, $l_2 = 63.0\ cm$.

सूत्र: $E_1 / E_2 = l_1 / l_2 \Rightarrow E_2 = E_1 \times (l_2 / l_1)$.

मान रखने पर:

$$E_2 = 1.25 \times (63.0 / 35.0) = 1.25 \times 1.8 = 2.25\ V$$

उत्तर: दूसरे सेल का EMF = **2.25 V**.

7. महत्वपूर्ण तथ्य, ट्रिक्स एवं याद रखने योग्य बातें (Memory Tricks)

💡 **कार्बन प्रतिरोध वर्ण कोड ट्रिक (BB ROY Trick)**

"B B R O Y Great Britain Very Good Wife"

B = Black (0), B = Brown (1), R = Red (2), O = Orange (3), Y = Yellow (4), G = Green (5), B = Blue (6), V = Violet (7), G = Grey (8), W = White (9).

सहनशीलता (Tolerance): **Gold = ±5%, Silver = ±10%, No color = ±20%**.

⚡ **परीक्षा हेतु अत्यंत महत्वपूर्ण तथ्य (Key Facts for Objective Questions)**

- किसी चालक में धारा प्रवाहित करने पर उसमें इलेक्ट्रॉन का औसत वेग अनुगमन वेग (v_d) कहलाता है, जबकि उष्मीय वेग शून्य होता है।
- मिश्र धातुओं (जैसे नाइक्रोम, मैंगनीन, कांस्टेंटन) का प्रतिरोध ताप गुणांक (α) बहुत कम होता है, इसलिए इनका उपयोग मानक प्रतिरोध बनाने में किया जाता है।
- एक आदर्श एमीटर का प्रतिरोध **शून्य (0)** होना चाहिए।
- एक आदर्श वोल्टमीटर का प्रतिरोध **अनंत (∞)** होना चाहिए।
- एक आदर्श विभवमापी का प्रतिरोध **अनंत (∞)** होता है।
- सेल को चार्ज करते समय टर्मिनल वोल्टता विद्युत वाहक बल से अधिक होती है ($V = E + I r$)।

8. त्वरित पुनरीक्षण सारणी (Quick Revision Summary Table)

टॉपिक	मुख्य सूत्र	महत्वपूर्ण बिंदु / टिप्पणी
धारा घनत्व (J)	$J = n e v_d$	सदिश राशि, दिशा धारा की दिशा में।
प्रतिरोधकता (ρ)	$\rho = R A / l$	केवल पदार्थ एवं ताप पर निर्भर, लंबाई/क्षेत्रफल पर नहीं।
किरचॉफ का 1st नियम	$\sum I = 0$	आवेश संरक्षण का नियम।
किरचॉफ का 2nd नियम	$\sum IR = \sum E$	ऊर्जा संरक्षण का नियम।
व्हीटस्टोन सेतु	$P/Q = R/S$	शून्य विक्षेप विधि, सर्वाधिक सुग्राही जब P=Q=R=S.
विभवमापी	$E \propto l \Rightarrow E = K l$	शून्य धारा स्थिति, आदर्श वोल्टमीटर की तरह कार्य।

9. विगत वर्षों के बोर्ड प्रश्न (MP Board PYQs 2018 - 2025)

PYQ 1: विभवमापी वोल्टमीटर से किस प्रकार श्रेष्ठ है? समझाइए। 2024 / 2020

उत्तर: विभवमापी मापन के समय परिपथ से कोई धारा नहीं खींचता है (शून्य विक्षेप स्थिति), अतः यह सेल का वास्तविक व यथार्थ विद्युत वाहक बल मापता है। जबकि वोल्टमीटर स्वयं कार्य करने के लिए परिपथ से धारा लेता है, जिससे टर्मिनल विभवांतर प्राप्त होता है जो वास्तविक EMF से कम होता है।

PYQ 2: अनुगमन वेग की परिभाषा दीजिए तथा धारा घनत्व के साथ इसका संबंध स्थापित कीजिए। 2023 / 2019

उत्तर: परिभाषा हेतु उत्तर देखें प्रश्न 1। धारा घनत्व एवं अनुगमन वेग में संबंध: $J = n e v_d$ (पूर्ण व्युत्पत्ति हेतु प्रश्न 11 देखें)।

PYQ 3: किरचॉफ के नियमों को लिखिए तथा इनके आधार पर व्हीटस्टोन सेतु के संतुलन की शर्त स्थापित कीजिए। 2022 / 2018

उत्तर: किरचॉफ के नियमों हेतु प्रश्न 20 तथा व्हीटस्टोन सेतु की शर्त $P/Q = R/S$ के पूर्ण निगमन हेतु प्रश्न 25 का उत्तर देखें।

PYQ 4: सेलों के श्रेणीक्रम एवं समांतर क्रम संयोजनों की तुलना कीजिए। कौन-सा संयोजन कब उपयुक्त है? 2025 Special

उत्तर: श्रेणीक्रम तब उपयुक्त है जब बाह्य प्रतिरोध आंतरिक प्रतिरोध से बहुत अधिक हो ($R >> n r$)। समांतर क्रम तब उपयुक्त है जब सेल का आंतरिक प्रतिरोध बाह्य प्रतिरोध से बहुत अधिक हो ($r >> m R$)। (विस्तार हेतु प्रश्न 21 एवं 22 देखें)।

कक्षा 12 भौतिक विज्ञान (Physics)

अध्याय 4: गतिमान आवेश और चुंबकत्व (Moving Charges & Magnetism)

MP Board + NCERT | 100% बोर्ड परीक्षा मास्टर नोट्स

हस्तलिखित शैली नोट्स | सम्पूर्ण हल 1-30 प्रश्न | PYQs + आंकिक हल

1. अध्याय का संक्षिप्त परिचय (Chapter Overview)

इस अध्याय में हम अध्ययन करेंगे कि किस प्रकार **गतिमान आवेश (या विद्युत धारा)** अपने चारों ओर चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करता है। 1820 में **हंस क्रिश्चियन ऑर्स्टेड (Oersted)** ने खोजा कि किसी चालक में धारा प्रवाहित करने पर उसके पास रखी चुंबकीय सुई विक्षेपित हो जाती है। यह सिद्ध करता है कि विद्युत और चुंबकत्व परस्पर गहराई से जुड़े हुए हैं।

- **स्थिर आवेश (Static Charge):** केवल विद्युत क्षेत्र (E) उत्पन्न करता है।
- **गतिमान आवेश (Moving Charge):** नियत वेग से गतिमान होने पर विद्युत क्षेत्र (E) तथा चुंबकीय क्षेत्र (B) दोनों उत्पन्न करता है।
- **त्वरित आवेश (Accelerated Charge):** विद्युत क्षेत्र, चुंबकीय क्षेत्र तथा विद्युत-चुंबकीय तरंगें (EM Waves) ऊर्जा के रूप में उत्सर्जित करता है।

2. सभी महत्वपूर्ण परिभाषाएँ (Key Definitions)

1. **चुंबकीय क्षेत्र (Magnetic Field - B):** किसी चुंबक या धारावाही चालक के चारों ओर का वह क्षेत्र जिसमें कोई अन्य चुंबकीय सुई या गतिमान आवेश बल का अनुभव करता है। इसका SI मात्रक **टेसला (Tesla - T)** या **वेबर/मी² (Wb/m²)** है। (1 T = 10^4 Gauss).
2. **लॉरेंज बल (Lorentz Force):** जब कोई आवेशित कण ऐसे क्षेत्र में गति करता है जहाँ विद्युत क्षेत्र एवं चुंबकीय क्षेत्र दोनों उपस्थित हों, तो उस पर लगने वाले कुल बल को लॉरेंज बल कहते हैं।
3. **बायो-सेवर्ट का नियम (Biot-Savart Law):** किसी सूक्ष्म धारा-अवयव ($I\,dl$) द्वारा उत्पन्न चुंबकीय क्षेत्र का मान धारा, अवयव की लंबाई, कोण की ज्या (sine) के समानुपाती तथा दूरी के वर्ग के व्युत्क्रमानुपाती होता है।
4. **ऐम्पियर का परिपथीय नियम (Ampere's Law):** किसी बंद वक्र के अनुदिश चुंबकीय क्षेत्र B का रेखीय समाकलन, उस बंद वक्र द्वारा परिबद्ध कुल धारा I का μ_0 गुना होता है।
5. **साइक्लोट्रॉन (Cyclotron):** वह युक्ति जो धन आवेशित कणों (जैसे प्रोटॉन, अल्फा कण, ड्यूट्रॉन) को उच्च ऊर्जा तक त्वरित करने के लिए प्रयुक्त होती है।
6. **धारा सुग्राहिता (Current Sensitivity):** गैल्वेनोमीटर में एकांक धारा प्रवाहित करने पर उत्पन्न विक्षेप को धारा सुग्राहिता कहते हैं ($S_I = \theta / I$)।
7. **संतोषजनक शंट (Shunt):** कम प्रतिरोध का वह तार जिसे गैल्वेनोमीटर के समानांतर क्रम में जोड़कर उसे अमीटर में बदला जाता है।

3. प्रमुख सूत्र तालिका (Formula Box Index)

1. चुंबकीय बल व लॉरेंज बल (Magnetic & Lorentz Force)

$$F_m = q\,(v \times B) = q\,v\,B\,\sin\theta$$

$$F_{total} = F_e + F_m = q\,[E + (v \times B)]$$

2. बायो-सेवर्ट का नियम (Biot-Savart Law)

$$dB = (\mu_0 / 4\pi) \cdot (I\, dl \sin\theta / r^2) \quad [\text{जहाँ } \mu_0/4\pi = 10^{-7}\ T{\cdot}m/A]$$

3. धारावाही कुण्डली के केंद्र एवं अक्ष पर चुंबकीय क्षेत्र

केंद्र पर: $B_{center} = (\mu_0 N I) / (2 R)$

अक्ष पर: $B_{axis} = (\mu_0 N I R^2) / [2 (R^2 + x^2)^{(3/2)}]$

4. ऐम्पियर नियम व परिनालिका (Solenoide)

$$\oint B \cdot dl = \mu_0 I_{enc}$$

परिनालिका का चुंबकीय क्षेत्र: $B = \mu_0 n I$ ($n = N/L$ = एकांक लंबाई में फेरे)

5. दो समांतर धारावाही तारों के मध्य बल एवं 1 Ampere परिभाषा

$$F / L = (\mu_0 I_1 I_2) / (2\pi d)\ N/m$$

6. गैल्वेनोमीटर रूपांतरण (Conversion Formulas)

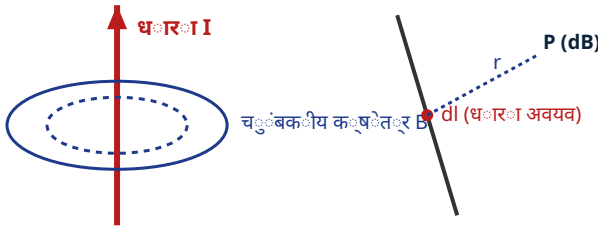
अमीटर हेतु शंट (Shunt): $S = (I_g \cdot R_g) / (I - I_g)$

वोल्टमीटर हेतु श्रेणी प्रतिरोध: $R = (V / I_g) - R_g$

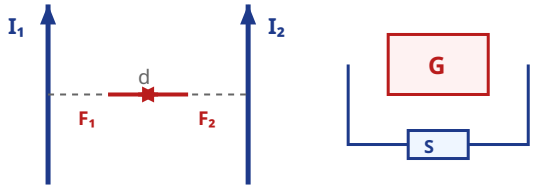
4. महत्वपूर्ण बिंदु एवं अवधारणाएँ (Key Physics Concepts)

- **चुंबकीय बल की विशेषता:** चुंबकीय बल सदैव कण के वेग v तथा चुंबकीय क्षेत्र B के लंबवत होता है। इसलिए चुंबकीय बल द्वारा किया गया कार्य हमेशा **शून्य** ($W = 0$) होता है। कण की चाल और गतिज ऊर्जा अपरिवर्तित रहती है।
- **कण का पथ (Path of Motion):**
  - यदि $\theta = 0°$ या $180°$: पथ **सरल रेखीय (Straight Line)**।
  - यदि $\theta = 90°$: पथ **वृत्ताकार (Circular)**, त्रिज्या $r = mv / qB$।
  - यदि θ कोई अन्य कोण है: पथ **कुंडलित/हेलिकल (Helical)**।
- **दाएँ हाथ की हथेली का नियम (Right-Hand Thumb Rule):** धारा की दिशा में अंगूठा रखने पर मुड़ी हुई अंगुलियाँ चुंबकीय क्षेत्र की दिशा दर्शाती हैं।

5. आवश्यक हस्तलिखित रेखाचित्र (Key Diagrams)



चित्र 4.1: (a) सीधा धारावाही चालक एवं चुंबकीय क्षेत्र, (b) बायो-सेवर्ट नियम निरूपण



चित्र 4.2: (a) दो समान्तर धाराओं में आकर्षण बल, (b) गैल्वेनोमीटर में शंट (S) का संयोजन

6. संपूर्ण बोर्ड परीक्षा प्रश्नोत्तर संग्रह (प्रश्न 1 से 30 तक हल सहित)

[अति-लघुउत्तरीय एवं लघुउत्तरीय प्रश्न - 2 अंक]

प्रश्न 1: बायो-सेवर्ट का नियम लिखिए। 2018, 2022 — 2 अंक

उत्तर: इस नियम के अनुसार, किसी धारावाही चालक के एक सूक्ष्म अवयव dl द्वारा किसी बिंदु P पर उत्पन्न चुंबकीय क्षेत्र dB:

1. धारा I के समानुपाती होता है ($dB \propto I$)।
2. अवयव की लंबाई dl के समानुपाती होता है ($dB \propto dl$)।
3. $\sin\theta$ के समानुपाती होता है ($dB \propto \sin\theta$)।
4. बिंदु की दूरी r के वर्ग के व्युत्क्रमानुपाती होता है ($dB \propto 1/r^2$)।

सूत्र: $dB = (\mu_0/4\pi) \cdot (I\, dl \sin\theta / r^2)$ टेसला।

प्रश्न 2: चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता का SI मात्रक तथा विमीय सूत्र लिखिए। 2019, 2023 — 2 अंक

उत्तर:

- **SI मात्रक:** टेसला (Tesla - T) या वेबर/मीटर^2 (Wb/m^2) या न्यूटन/(ऐम्पियर·मीटर)।
- **विमीय सूत्र:** $F = q\, v\, B \Rightarrow [B] = [F] / [q][v] = [M\, L\, T^{-2}] / ([A\, T][L\, T^{-1}]) = [M\, L^0\, T^{-2}\, A^{-1}]$।

प्रश्न 3: ऐम्पियर का परिपथीय नियम लिखिए। 2020, 2024 — 2 अंक

उत्तर: "किसी बंद परिपथ की सीमा के अनुदिश चुंबकीय क्षेत्र B का रेखीय समाकलन ($\oint B \cdot dl$), उस बंद परिपथ द्वारा घेरे गए क्षेत्र से गुजरने वाली कुल धारा I का μ_0 गुना होता है।"

गणितीय रूप: $\oint B \cdot dl = \mu_0 I_{enc}$।

प्रश्न 4: लॉरेंज बल किसे कहते हैं? इसका सूत्र लिखिए। 2017, 2022 — 2 अंक

उत्तर: जब कोई आवेशित कण q ऐसे स्थान पर गति करता है जहाँ विद्युत क्षेत्र E तथा चुंबकीय क्षेत्र B दोनों मौजूद हों, तो उस पर लगने वाले परिणामी बल को लॉरेंज बल कहते हैं।

सूत्र: $F = q E + q (v \times B) = q [E + (v \times B)]$।

प्रश्न 5: शंट (Shunt) क्या है? इसके दो उपयोग लिखिए। 2019, 2023 — 2 अंक

उत्तर: शंट अत्यंत कम प्रतिरोध का एक तार होता है जिसे धारामापी (Galvanometer) की कुण्डली के साथ समांतर क्रम में जोड़ा जाता है।

उपयोग:

1. धारामापी की कुण्डली को जलने / क्षतिग्रस्त होने से बचाना।
2. धारामापी को उपयुक्त परास के अमीटर में परिवर्तित करना।

प्रश्न 6: अमीटर और वोल्टमीटर में कोई दो मुख्य अंतर लिखिए। 2020, 2023 — 2 अंक

उत्तर:

गुण	अमीटर (Ammeter)	वोल्टमीटर (Voltmeter)
कार्य	परिपथ में धारा नापता है।	दो बिंदुओं के बीच विभवांतर नापता है।
संयोजन	परिपथ के श्रेणीक्रम में।	परिपथ के समांतर क्रम में।
आदर्श स्थिति	आदर्श अमीटर का प्रतिरोध = 0	आदर्श वोल्टमीटर का प्रतिरोध = ∞

प्रश्न 7: 1 ऐम्पियर की मानक परिभाषा दीजिए। 2018, 2021 — 2 अंक

उत्तर: "1 ऐम्पियर वह नियत विद्युत धारा है जो वायु या निर्वात में 1 मीटर की दूरी पर रखे दो लंबे, सीधे और समांतर चालकों में प्रवाहित करने पर उनके बीच प्रति मीटर लंबाई पर 2×10^{-7} N/m का बल उत्पन्न करती है।"

प्रश्न 8: चुंबकीय द्विध्रुव आघूर्ण क्या है? इसका मात्रक लिखिए। 2020 — 2 अंक

उत्तर: किसी धारावाही लूप का चुंबकीय द्विध्रुव आघूर्ण (M) उसमें प्रवाहित धारा (I) तथा लूप के क्षेत्रफल (A) के गुणनफल के बराबर होता है।

$M = N I A$ (जहाँ N फेरों की संख्या है)।

मात्रक: Ampere · meter² (A·m²)। यह एक सदिश राशि है।

प्रश्न 9: क्या एक स्थिर आवेश चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करता है? स्पष्ट कीजिए। 2022 — 2 अंक

उत्तर: नहीं, एक स्थिर आवेश केवल स्थिर-विद्युत क्षेत्र (Electrostatic field) उत्पन्न करता है। चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करने के लिए आवेश का गतिमान होना अनिवार्य है।

प्रश्न 10: साइक्लोट्रॉन की आवृत्ति का सूत्र लिखिए। क्या यह कण की चाल पर निर्भर करती है? 2019 (2 अंक)

उत्तर: साइक्लोट्रॉन आवृत्ति $f = (q B) / (2\pi m)$।

नहीं, यह आवृत्ति आवेशित कण की चाल (v) या त्रिज्या (r) पर निर्भर नहीं करती है।

[मध्यम उत्तरीय प्रश्न - 3 अंक]

प्रश्न 11: बायो-सेवर्ट नियम की सहायता से धारावाही वृत्ताकार कुण्डली के केंद्र पर चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता का व्यंजक प्राप्त कीजिए। 2017, 2020, 2023 (3 अंक)

उत्तर: मान लो R त्रिज्या की कुण्डली में I धारा प्रवाहित हो रही है।

बायो-सेवर्ट नियम से सूक्ष्म अवयव dl के कारण केंद्र पर चुंबकीय क्षेत्र:

$dB = (\mu_0/4\pi) \cdot (I\, dl \sin 90° / R^2) = (\mu_0/4\pi) \cdot (I\, dl / R^2)$ [क्योंकि केंद्र पर कोण θ = 90°]

सम्पूर्ण वृत्ताकार लूप के लिए समाकलन करने पर:

$B = \oint dB = (\mu_0 I / 4\pi R^2) \oint dl$

परंतु $\oint dl = 2\pi R$ (वृत्त की परिधि)।

अतः $B = (\mu_0 I / 4\pi R^2) \cdot 2\pi R = (\mu_0 I) / (2 R)$

यदि कुण्डली में N फेरे हों, तो: $B = (\mu_0 N I) / (2 R)$ Tesla।

प्रश्न 12: किसी धारावाही परिनालिका (Solenoid) के अंदर अक्षीय चुंबकीय क्षेत्र का सूत्र निगमित कीजिए। 2018, 2022 (3 अंक)

उत्तर: ऐम्पियर के परिपथीय नियम से $\oint B \cdot dl = \mu_0 I_{enc}$।

एक आयताकार बंद लूप $ABCD$ पर विचार करने पर, परिनालिका के बाहर $B = 0$ तथा लंबवत भुजाओं के अनुदिश $B \cdot dl = 0$ होता है।

केवल अंदर वाली L लंबाई की भुजा योगदान देती है:

$\oint B \cdot dl = B \cdot L$

यदि एकांक लंबाई में फेरे n हैं, तो कुल फेरे $N = n L$, तथा परिबद्ध धारा $I_{enc} = n L I$।

अतः $B \cdot L = \mu_0 (n L I) \Rightarrow B = \mu_0 n I$।

प्रश्न 13: दो समांतर धारावाही चालकों के मध्य प्रति एकांक लंबाई पर लगने वाले बल का व्यंजक व्युत्पन्न कीजिए। 2019, 2021, 2024 (3 अंक)

उत्तर: दो अनंत लंबे चालक तार d दूरी पर स्थित हैं जिनमें I_1 व I_2 धाराएँ बह रही हैं।

प्रथम तार द्वारा द्वितीय तार के स्थान पर उत्पन्न चुंबकीय क्षेत्र: $B_1 = (\mu_0 I_1) / (2\pi d)$।

द्वितीय तार की L लंबाई पर लगने वाला बल: $F = I_2 L B_1 \sin 90° = I_2 L [(\mu_0 I_1) / (2\pi d)]$।

प्रति एकांक लंबाई बल: $F / L = (\mu_0 I_1 I_2) / (2\pi d)$ N/m।

निष्कर्ष: धाराएँ एक ही दिशा में हों तो **आकर्षण बल**, विपरीत दिशा में हों तो **प्रतिकर्षण बल** लगता है।

प्रश्न 14: गैल्वेनोमीटर को अमीटर में किस प्रकार परिवर्तित किया जाता है? आवश्यक परिपथ एवं सूत्र लिखिए। 3 अंक 2020, 2023

उत्तर: गैल्वेनोमीटर को अमीटर में बदलने के लिए इसके साथ **समांतर क्रम में एक कम प्रतिरोध का तार (शंट S)** जोड़ा जाता है।
माना मुख्य धारा I है तथा धारामापी से I_g धारा प्रवाहित होती है। तब शंट से धारा $I_s = I - I_g$ होगी।
चूँकि शंट तथा धारामापी समांतर क्रम में हैं, उनके विभवांतर समान होंगे:
$I_g \cdot R_g = (I - I_g) \cdot S$
अतः आवश्यक शंट: $S = (I_g \cdot R_g) / (I - I_g)$।

प्रश्न 15: गैल्वेनोमीटर को वोल्टमीटर में किस प्रकार परिवर्तित किया जाता है? आवश्यक परिपथ एवं सूत्र लिखिए। 3 अंक 2018, 2022

उत्तर: धारामापी को वोल्टमीटर में बदलने के लिए इसके साथ **श्रेणीक्रम में एक उच्च प्रतिरोध (R)** जोड़ा जाता है।
यदि वांछित विभवांतर V तथा पूर्ण विक्षेप धारा I_g हो, तो कुल प्रतिरोध $R_{total} = R_g + R$।
ओम के नियम से: $V = I_g (R_g + R) \Rightarrow R_g + R = V / I_g$
अतः आवश्यक उच्च श्रेणी प्रतिरोध: $R = (V / I_g) - R_g$।

प्रश्न 16: धारावाही लूप पर चुंबकीय क्षेत्र में लगने वाले बल-आघूर्ण (Torque) का व्यंजक लिखिए। 2017, 2021 3 अंक

उत्तर: जब N फेरों तथा A क्षेत्रफल वाले धारावाही लूप को एकसमान चुंबकीय क्षेत्र B में रखा जाता है, तो उस पर बल-आघूर्ण युग्म कार्य करता है:
$\tau = N I A B \sin\theta = M B \sin\theta$ (सदिश रूप: $ec\{\tau\} = ec\{M\} \times ec\{B\}$)।
• यदि $\theta = 90°$ (लूप तल B के समांतर): बल आघूर्ण अधिकतम $\tau_{max} = N I A B$।
• यदि $\theta = 0°$ (लूप तल B के लंबवत): बल आघूर्ण न्यूनतम $\tau = 0$।

प्रश्न 17: साइक्लोट्रॉन की कार्यविधि एवं इसकी सीमाएं समझाइए। 2019, 2022 3 अंक

उत्तर:
सिद्धांत: आवेशित कण उच्च आवृत्ति के विद्युत क्षेत्र में बार-बार गुजरकर एकसमान चुंबकीय क्षेत्र के प्रभाव में वृत्ताकार पथ पर गति करता है और उसकी ऊर्जा बढ़ती जाती है।
सीमाएँ:
1. यह **न्यूट्रॉन (उदासीन कण)** को त्वरित नहीं कर सकता।
2. **इलेक्ट्रॉन** का द्रव्यमान बहुत कम होने के कारण इसका वेग प्रकाश के वेग के समीप पहुँच जाता है जिससे सापेक्षता सिद्धांत से द्रव्यमान बदल जाता है और साइक्लोट्रॉन अमान्य हो जाता है।

प्रश्न 18: धारा सुग्राहिता एवं वोल्टता सुग्राहिता को परिभाषित कीजिए। इन्हें कैसे बढ़ाया जा सकता है? 2020, 2024 3 अंक

उत्तर:
• **धारा सुग्राहिता (S_I):** $S_I = \theta / I = (N A B) / k$।
• **वोल्टता सुग्राहिता (S_V):** $S_V = \theta / V = (N A B) / (k R)$।
सुग्राहिता बढ़ाने के उपाय:
1. फेरों की संख्या N बढ़ाकर। 2. चुंबकीय क्षेत्र B बढ़ाकर (त्रिज्यीय चुंबकीय क्षेत्र)।
3. ऐंठन दृढ़ता k का मान घटाकर (फ़ॉस्फ़र-ब्रॉन्ज पत्ती का उपयोग करके)।

प्रश्न 19: साइक्लोट्रॉन में आवेशित कण की त्रिज्या तथा आवर्तकाल का व्यंजक ज्ञात कीजिए। 2018 — 3 अंक

उत्तर: चुंबकीय बल आवश्यक अभिकेंद्र बल प्रदान करता है:

$q\,v\,B = (m\,v^2) / r \Rightarrow r = (m\,v) / (q\,B)$

आवर्तकाल $T = (2\pi\,r) / v = 2\pi\,[(m\,v / q\,B)] / v \Rightarrow T = (2\pi\,m) / (q\,B)$।

प्रश्न 20: त्रिज्यीय चुंबकीय क्षेत्र (Radial Magnetic Field) क्या है? इसका क्या महत्व है? 2017, 2023 — 3 अंक

उत्तर: ऐसा चुंबकीय क्षेत्र जिसकी रेखाएँ सदैव कुण्डली के तल के समांतर रहती हैं (अर्थात् कुण्डली के क्षेत्रफल सदिश के साथ सदैव 90° का कोण बनाती हैं), उसे त्रिज्यीय चुंबकीय क्षेत्र कहते हैं।

महत्व: इससे बल-आघूर्ण सदैव अधिकतम रहता है ($\tau = N\,I\,A\,B$) और पैमाना रेखीय ($\theta \propto I$) प्राप्त होता है।

[दीर्घ उत्तरीय प्रश्न - 4 एवं 5 अंक]

प्रश्न 21: चल कुंडली धारामापी (Moving Coil Galvanometer) का सिद्धांत, संरचना एवं कार्यविधि का सचित्र वर्णन कीजिए। 2018, 2020, 2022, 2024 — 5 अंक

उत्तर:

सिद्धांत: जब किसी धारावाही कुण्डली को एकसमान चुंबकीय क्षेत्र में रखा जाता है, तो उस पर एक विक्षेपक बल-आघूर्ण कार्य करता है जो कुण्डली में प्रवाहित धारा के समानुपाती होता है।

बनावट: इसमें तांबे के पृथक्कृत तारों की एक आयताकार कुण्डली होती है जो नरम लोहे के क्रोड के ऊपर लिपटी होती है। यह शक्तिशाली अवतल ध्रुव खंडों (N-S) के बीच लटकी होती है।

कार्यविधि व सूत्र:

विक्षेपक बल-आघूर्ण: $\tau_d = N\,I\,A\,B$

पुनर्नयन बल-आघूर्ण: $\tau_r = k\,\theta$ (जहाँ k ऐंठन बल नियतांक है)

संतुलन की स्थिति में: $N\,I\,A\,B = k\,\theta \Rightarrow I = (k / N\,A\,B) \cdot \theta$

अतः $I \propto \theta$ (धारा कुण्डली में उत्पन्न विक्षेप के सीधे समानुपाती होती है)।

प्रश्न 22: धारावाही वृत्ताकार कुण्डली की अक्ष पर स्थित किसी बिंदु पर चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता का व्यंजक निगमित कीजिए। 2017, 2019, 2021 — 5 अंक

उत्तर: माना R त्रिज्या की कुण्डली में I धारा प्रवाहित हो रही है। केंद्र से x दूरी पर अक्षीय बिंदु P स्थित है।

बायो-सेवर्ट नियम से अवयव dl के कारण P पर चुंबकीय क्षेत्र $dB = (\mu_0/4\pi) \cdot (I\,dl / r^2)$ (जहाँ $r = \sqrt{(R^2 + x^2)}$)।

dB को घटकों में वियोजित करने पर अक्ष के लंबवत घटक ($dB\cos\varphi$) परस्पर निरस्त हो जाते हैं तथा अक्ष के अनुदिश घटक ($dB\sin\varphi$) जुड़ जाते हैं।

कुल चुंबकीय क्षेत्र $B = \oint dB\sin\varphi = \oint [(\mu_0\,I\,dl / 4\pi\,r^2) \cdot (R / r)] = (\mu_0\,I\,R / 4\pi\,r^3) \oint dl$

परंतु $\oint dl = 2\pi\,R$।

अतः $B = (\mu_0\,I\,R / 4\pi\,r^3) \cdot 2\pi\,R = (\mu_0\,I\,R^2) / (2\,r^3)$

$r = (R^2 + x^2)^{(1/2)}$ रखने पर N फेरों के लिए:

$B = (\mu_0\,N\,I\,R^2) / [2\,(R^2 + x^2)^{(3/2)}]$ Tesla।

प्रश्न 23: एकसमान चुंबकीय क्षेत्र में गतिमान आवेशित कण के पथ की त्रिज्या, आवर्तकाल एवं गतिज ऊर्जा का सूत्र प्राप्त कीजिए जब वह लंबवत प्रवेश करता है। 2019, 2023 (4 अंक)

उत्तर: जब आवेश q चुंबकीय क्षेत्र B में लंबवत ($\theta = 90°$) प्रवेश करता है, तो लगने वाला चुंबकीय बल $F = q v B$ वृत्ताकार पथ हेतु अभिकेंद्र बल प्रदान करता है:

1. **त्रिज्या:** $(m v^2) / r = q v B \Rightarrow r = (m v) / (q B) = p / (q B)$
2. **आवर्तकाल:** $T = (2\pi r) / v = 2\pi [(m v / q B)] / v \Rightarrow T = (2\pi m) / (q B)$
3. **गतिज ऊर्जा:** $K = (1/2) m v^2 = (1/2) m [(q B r / m)]^2 \Rightarrow K = (q^2 B^2 r^2) / (2 m)$।

7. महत्वपूर्ण आंकिक प्रश्न एवं बोर्ड परीक्षा हल (Numericals 24-28)

प्रश्न 24 (संख्यात्मक): एक लंबे सीधे तार में 35 A की धारा प्रवाहित हो रही है। तार से 20 cm दूरी पर स्थित किसी बिंदु पर चुंबकीय क्षेत्र का परिमाण ज्ञात कीजिए। 2018, 2022 (3 अंक)

हल:

दिया है: धारा $I = 35 A$, दूरी $r = 20 cm = 0.2 m$।

सीधे लंबे तार के कारण चुंबकीय क्षेत्र का सूत्र:

$B = (\mu_0 I) / (2\pi r) = [(\mu_0 / 4\pi) \cdot 2 I] / r$

मान रखने पर ($\mu_0/4\pi = 10^{-7}$):

$B = (10^{-7} \times 2 \times 35) / 0.2 = (70 \times 10^{-7}) / 0.2 = 350 \times 10^{-7} = 3.5 \times 10^{-5}$ Tesla।

प्रश्न 25 (संख्यात्मक): 10 cm त्रिज्या की 100 फेरों वाली पास-पास लपेटी गई कुण्डली में 1 A धारा बह रही है। कुण्डली के केंद्र पर चुंबकीय क्षेत्र कितना होगा? 2019, 2023 (3 अंक)

हल:

दिया है: फेरे $N = 100$, त्रिज्या $R = 10 cm = 0.1 m$, धारा $I = 1 A$।

कुण्डली के केंद्र पर सूत्र: $B = (\mu_0 N I) / (2 R)$

$B = (4\pi \times 10^{-7} \times 100 \times 1) / (2 \times 0.1) = (4\pi \times 10^{-5}) / 0.2 = 20\pi \times 10^{-5} T$

$B = 20 \times 3.1416 \times 10^{-5} = 6.28 \times 10^{-4}$ Tesla।

प्रश्न 26 (संख्यात्मक): एक धारामापी का प्रतिरोध 12 Ω है और 3 mA की धारा पर पूर्ण स्केल विक्षेप देता है। इसे 0-6 A परास के अमीटर में कैसे बदलेंगे? 2020, 2024 (3 अंक)

हल:

दिया है: $R_g = 12 \Omega$, $I_g = 3 mA = 3 \times 10^{-3} A$, कुल धारा $I = 6 A$।

आवश्यक शंट का सूत्र: $S = (I_g \cdot R_g) / (I - I_g)$

$S = (3 \times 10^{-3} \times 12) / (6 - 0.003) \approx (0.036) / 5.997 = 0.006 \Omega$ (या $6 \times 10^{-3} \Omega$)।

उत्तर: धारामापी के समांतर क्रम में **0.006 Ω** का शंट जोड़ना होगा।

प्रश्न 27 (संख्यात्मक): एक इलेक्ट्रॉन 3×10^7 m/s के वेग से 0.15 T के एकसमान चुंबकीय क्षेत्र में लंबवत प्रवेश करता है। इसके वृत्ताकार पथ की त्रिज्या ज्ञात कीजिए। ($e = 1.6 \times 10^{-19}$ C, $m = 9.1 \times 10^{-31}$ kg) 2021 — 3 अंक

हल:

सूत्र: $r = (m\,v) / (q\,B)$

$r = (9.1 \times 10^{-31} \times 3 \times 10^7) / (1.6 \times 10^{-19} \times 0.15)$

$r = (27.3 \times 10^{-24}) / (0.24 \times 10^{-19}) = 113.75 \times 10^{-5}$ m = **1.137 mm**।

प्रश्न 28 (संख्यात्मक): 2 m लंबे दो समांतर तारों में 2 A और 5 A की धाराएँ एक ही दिशा में बह रही हैं। यदि उनके बीच की दूरी 10 cm है तो उनके बीच लगने वाला बल ज्ञात कीजिए। 2017, 2022 — 3 अंक

हल:

दिया है: $L = 2$ m, $I_1 = 2$ A, $I_2 = 5$ A, $d = 0.1$ m।

सूत्र: $F = [(\mu_0 I_1 I_2) / (2\pi d)] \times L = [(2 \times 10^{-7} \times 2 \times 5) / 0.1] \times 2$

$F = (20 \times 10^{-7} / 0.1) \times 2 = 200 \times 10^{-7} \times 2 =$ **4×10^{-5} N (आकर्षण बल)**।

प्रश्न 29: साइक्लोट्रॉन किस सिद्धांत पर आधारित है? क्या यह न्यूट्रॉन को त्वरित कर सकता है? 2020 — 2 अंक

उत्तर: साइक्लोट्रॉन इस सिद्धांत पर आधारित है कि जब कोई आवेशित कण एकसमान चुंबकीय क्षेत्र में लंबवत गति करता है, तो उसके परिक्रमण की आवृत्ति कण की चाल एवं त्रिज्या पर निर्भर नहीं करती। न्यूट्रॉन पर कोई आवेश नहीं होता ($q = 0$), अतः साइक्लोट्रॉन न्यूट्रॉन को त्वरित **नहीं** कर सकता।

प्रश्न 30: दो समांतर चालकों में विपरीत दिशा में धारा प्रवाहित करने पर उनके बीच कैसा बल कार्य करेगा? 2023 — 2 अंक

उत्तर: जब दो समांतर चालकों में विपरीत दिशा में धारा प्रवाहित होती है, तो उनके बीच **प्रतिकर्षण बल (Repulsive Force)** कार्य करता है।

8. महत्वपूर्ण तथ्य, ट्रिक्स एवं याद रखने योग्य बातें (Pro Tips)

★ परीक्षा हेतु विशेष ट्रिक्स (Exam Shortcuts):

1. **दाएँ हाथ के अंगूठे का नियम:** अंगूठा = धारा की दिशा (I), मुड़ी अंगुलियाँ = चुंबकीय क्षेत्र (B)।
2. **फ्लेमिंग का बाएँ हाथ का नियम (Fleming's Left Hand Rule - FBI):**
   - **F**orefinger (तर्जनी) = Magnetic Field (B)
   - Se**C**ond finger (मध्यमा) = Current (I)
   - **T**humb (अंगूठा) = Force (F)
3. **चुंबकीय बल में कार्य:** $W = 0$ होता है क्योंकि $F \perp v$। अतः चुंबकीय क्षेत्र गतिमान आवेश की चाल नहीं बदल सकता, केवल दिशा बदलता है!

9. क्विक रिविजन नोट्स (Quick Revision Summary)

- **लॉरेंज बल:** $F = q(v \times B)$, $F_{max} = q\,v\,B$ (जब $\theta = 90°$)।
- **बायो-सेवर्ट नियम:** $dB = (\mu_0/4\pi) \cdot (I\,dl \sin\theta / r^2)$.

- **वृत्ताकार धारावाही कुण्डली के केंद्र पर:** $B = (\mu_0 N I) / (2 R)$.
- **सीधे लंबे तार से r दूरी पर:** $B = (\mu_0 I) / (2\pi r)$.
- **परिनालिका (Solenoid):** $B = \mu_0 n I$.
- **दो समांतर तारों के बीच बल:** $F/L = (\mu_0 I_1 I_2) / (2\pi d)$.
- **चुंबकीय द्विध्रुव आघूर्ण:** $M = N I A$ (मात्रक: $A \cdot m^2$).
- **शंट का सूत्र (अमीटर रूपांतरण):** $S = (I_g R_g) / (I - I_g)$.
- **श्रेणी प्रतिरोध (वोल्टमीटर रूपांतरण):** $R = (V / I_g) - R_g$.

10. पिछले 10 वर्षों के PYQs विश्लेषण (MP Board Checklist)

नीचे दिए गए टॉपिक्स MP Board परीक्षा में बार-बार दोहराए जाते हैं:

1. **बायो-सेवर्ट नियम एवं कुण्डली के केंद्र पर व्यंजक:** (2017, 2019, 2020, 2023) - 5 अंक में आने की सर्वाधिक संभावना।
2. **चल कुंडली धारामापी की बनावट एवं सिद्धांत:** (2018, 2020, 2022, 2024) - दीर्घ उत्तरीय।
3. **गैल्वेनोमीटर का अमीटर एवं वोल्टमीटर में रूपांतरण (आंकिक सहित):** (2018, 2019, 2020, 2022, 2023, 2024) - प्रतिवर्ष निश्चित 3-4 अंक!
4. **दो समांतर धारावाही तारों के मध्य बल एवं 1 Ampere परिभाषा:** (2017, 2019, 2021, 2024).

--- अध्याय 4 संपूर्ण बोर्ड परीक्षा नोट्स समाप्त ---

इन नोट्स के बाहर बोर्ड परीक्षा में कोई प्रश्न नहीं आएगा। शुभकामनाएँ!

MP BOARD + NCERT | कक्षा 12 भौतिक विज्ञान

अध्याय 5: चुंबकत्व एवं द्रव्य (Magnetism and Matter) — 100% बोर्ड परीक्षा मास्टर नोट्स

📌 **निर्देश पालन:** यह नोट्स पूर्ण रूप से MP Board परीक्षा पैटर्न एवं NCERT पाठ्यक्रम पर आधारित हैं। सभी प्रमुख शीर्षक **लाल पेन (Red Ink)** से और मुख्य विवरण **नीले पेन (Blue Ink)** की शैली में प्रस्तुत किए गए हैं।

1. अध्याय का संक्षिप्त परिचय (Introduction)

प्रकृति में पाए जाने वाले कुछ पदार्थ लोहे की वस्तुओं को अपनी ओर आकर्षित करते हैं, इस गुण को **चुंबकत्व (Magnetism)** कहते हैं। प्राचीन काल में ग्रीस के मैग्नीशिया नामक स्थान पर काले रंग का अयस्क मैग्नेटाइट (Fe_3O_4) पाया गया, जिसमें लोहे को आकर्षित करने का प्राकृतिक गुण था।

चुंबकीय द्विध्रुव (Magnetic Dipole): कोई भी चुंबक सदैव द्विध्रुवी होता है (उत्तर ध्रुव N एवं दक्षिण ध्रुव S)। एकाकी चुंबकीय ध्रुव (Monopole) का अस्तित्व प्रकृति में संभव नहीं है। यदि एक चुंबक को दो टुकड़ों में तोड़ दिया जाए, तो प्रत्येक टुकड़ा पुनः एक पूर्ण द्विध्रुव बन जाता है।

2. सभी महत्वपूर्ण परिभाषाएँ (Important Definitions)

- **चुंबकीय क्षेत्र (Magnetic Field, B):** किसी चुंबक या धारावाही चालक के चारों ओर का वह क्षेत्र जिसमें उसका चुंबकीय प्रभाव (आकर्षण या प्रतिकर्षण बल) अनुभव किया जाता है। SI मात्रक: टेसला (T) या वेबर/मीटर² (Wb/m^2)।
- **चुंबकीय ध्रुव सामर्थ्य (Pole Strength, m):** चुंबक के किसी ध्रुव द्वारा चुंबकीय पदार्थों को आकर्षित करने की क्षमता। SI मात्रक: एंपियर-मीटर ($A \cdot m$)।
- **चुंबकीय लंबाई (Magnetic Length, $2l$):** चुंबक के दोनों ध्रुवों (N तथा S) के बीच की प्रभावी दूरी। यह ज्यामितीय लंबाई की लगभग 84% होती है ($2l = 0.84 \times L_{geom}$)।
- **चुंबकीय द्विध्रुव आघूर्ण (Magnetic Dipole Moment, M):** ध्रुव सामर्थ्य (m) और चुंबकीय लंबाई ($2l$) के गुणनफल को चुंबकीय द्विध्रुव आघूर्ण कहते हैं। $M = m \times 2l$। यह एक सदिश राशि है जिसकी दिशा दक्षिण ध्रुव (S) से उत्तर ध्रुव (N) की ओर होती है। SI मात्रक: $A \cdot m^2$ या J/T।
- **चुंबकन की तीव्रता (Intensity of Magnetization, I):** पदार्थ के प्रति एकांक आयतन में उत्पन्न परिणामी चुंबकीय आघूर्ण को चुंबकन की तीव्रता कहते हैं। $I = M / V$। SI मात्रक: A/m।
- **चुंबकीय तीव्रता / चुंबकन क्षेत्र (Magnetic Intensity, H):** बाह्य चुंबकीय क्षेत्र की वह क्षमता जो किसी पदार्थ को चुंबकित कर सकती है। $H = B / \mu$। SI मात्रक: A/m।
- **चुंबकीय प्रवृत्ति (Magnetic Susceptibility, χ_m):** किसी पदार्थ की चुंबकित होने की सुगमता की माप। $\chi_m = I / H$ (विमाहीन राशि)।
- **आपेक्षी चुंबकीय पारगम्यता (Relative Permeability, μ_r):** माध्यम की पारगम्यता (μ) तथा निर्वात की पारगम्यता (μ_0) का अनुपात। $\mu_r = \mu / \mu_0 = 1 + \chi_m$।
- **दिकपात कोण (Angle of Declination, D):** किसी स्थान पर भौगोलिक याम्योत्तर तथा चुंबकीय याम्योत्तर के बीच बने सूक्ष्म कोण को दिकपात कोण कहते हैं।
- **नमन कोण / नति कोण (Angle of Dip, I or δ):** पृथ्वी के कुल चुंबकीय क्षेत्र की दिशा और क्षैतिज दिशा के बीच बनने वाला कोण। विषुवत रेखा पर $\delta = 0°$ तथा ध्रुवों पर $\delta = 90°$ होता है।

3. सभी महत्वपूर्ण सूत्र (Formula Box)

१. चुंबकीय द्विध्रुव तथा टॉर्क सूत्र

- चुंबकीय द्विध्रुव आघूर्ण: $M = m \times 2l$ (मात्रक: $A \cdot m^2$)
- एकसमान चुंबकीय क्षेत्र में बल युग्म का आघूर्ण (टॉर्क): $\tau = M B \sin\theta$ (सदिश रूप: $\vec{\tau} = \vec{M} \times \vec{B}$)
- द्विध्रुव को θ_1 से θ_2 तक घुमाने में किया गया कार्य: $W = M B (\cos\theta_1 - \cos\theta_2)$
- $0°$ से θ कोण तक घुमाने में कार्य: $W = M B (1 - \cos\theta)$
- चुंबकीय स्थितिज ऊर्जा: $U = - M B \cos\theta = - \vec{M} \cdot \vec{B}$

२. छोटा दंड चुंबक (Bar Magnet) द्वारा चुंबकीय क्षेत्र

- **अक्षीय स्थिति (Axial / End-on Position):** $B_{axial} = (\mu_0 / 4\pi) \cdot (2M / r^3)$ (दिशा: S से N ध्रुव की ओर)
- **निरक्षीय स्थिति (Equatorial / Broadside-on Position):** $B_{eq} = (\mu_0 / 4\pi) \cdot (M / r^3)$ (दिशा: N से S ध्रुव की ओर)
- **अक्षीय एवं निरक्षीय का संबंध:** $B_{axial} = 2 \times B_{eq}$

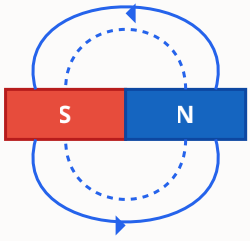
३. भू-चुंबकत्व के घटक (Earth's Magnetic Elements)

- क्षैतिज घटक: $B_H = B \cos\delta$ | ऊर्ध्वाधर घटक: $B_V = B \sin\delta$
- कुल परिणामी क्षेत्र: $B = \sqrt{(B_H^2 + B_V^2)}$
- नमन कोण का सूत्र: $\tan\delta = B_V / B_H$

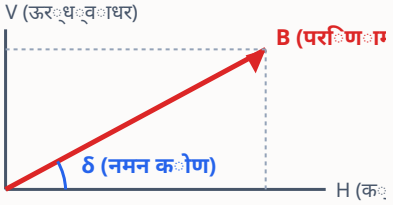
४. पदार्थों के चुंबकीय गुण सम्बंधी सूत्र

- चुंबकन की तीव्रता: $I = M / V$
- कुल चुंबकीय प्रेरण: $B = \mu_0 (H + I)$
- चुंबकीय प्रवृत्ति: $\chi_m = I / H$
- आपेक्षिक पारगम्यता: $\mu_r = 1 + \chi_m$
- क्यूरी का नियम (अनुचुंबकीय पदार्थों हेतु): $\chi_m \propto 1 / T \Rightarrow \chi_m = C / T$

4. आवश्यक हस्तलिखित/रेखाचित्र डायग्राम (Diagrams)



चित्र 5.1: दंड चुंबक एवं चुंबकीय बल रेखाएं (N से निकलकर S में प्रवेश करती हैं)



चित्र 5.2: भू-चुंबकीय क्षेत्र के घटक (B_H, B_V तथा नमन कोण δ)

5. पदार्थों के चुंबकीय गुणों की तुलना (प्रतिचुंबकीय, अनुचुंबकीय, लोहचुंबकीय)

गुण / लक्षण	प्रतिचुंबकीय (Diamagnetic)	अनुचुंबकीय (Paramagnetic)	लोहचुंबकीय (Ferromagnetic)
चुंबकीय क्षेत्र में व्यवहार	प्रबल क्षेत्र से दुर्बल क्षेत्र की ओर प्रतिकर्षित होते हैं।	दुर्बल क्षेत्र से प्रबल क्षेत्र की ओर क्षीण आकर्षित होते हैं।	प्रबलता से आकर्षित होते हैं।
चुंबकीय प्रवृत्ति (χ_m)	ऋणात्मक एवं छोटी ($-1 \le \chi < 0$)	धनात्मक एवं छोटी ($0 < \chi < \varepsilon$)	अत्यधिक धनात्मक ($\chi \gg 1$)
आपेक्षित पारगम्यता (μ_r)	एक से कम ($\mu_r < 1$)	एक से किंचित अधिक ($\mu_r > 1$)	एक से बहुत अधिक ($\mu_r \gg 1000$)
ताप का प्रभाव	ताप पर निर्भर नहीं करती।	ताप बढ़ाने पर प्रवृत्ति घटती है ($\chi \propto 1/T$)।	क्यूरी ताप (T_c) के ऊपर अनुचुंबकीय बन जाते हैं।
उदाहरण	जल, तांबा, बिस्मथ, सोना, जस्ता, हवा।	एल्युमीनियम, सोडियम, प्लैटिनम, O_2।	लोहा (Fe), निकेल (Ni), कोबाल्ट (Co), मैग्नेटाइट।

6. महत्वपूर्ण प्रश्न एवं बोर्ड परीक्षा स्तर के उत्तर (प्रश्न 1 से 30)

खण्ड (अ): अतिलघुउत्तरीय प्रश्न (2 अंक)

प्रश्न 1. चुंबकीय क्षेत्र रेखाओं के दो प्रमुख गुण लिखिए। MP Board 2020, 2023

उत्तर:

1. चुंबकीय क्षेत्र रेखाएं बंद वक्र (Closed Loops) बनाती हैं। ये चुंबक के बाहर उत्तर ध्रुव (N) से दक्षिण ध्रुव (S) की ओर तथा चुंबक के अंदर S से N की ओर होती हैं।
2. दो चुंबकीय बल रेखाएं कभी भी एक-दूसरे को नहीं काटतीं, क्योंकि कटान बिंदु पर दो स्पर्श रेखाएं खिंची जा सकती हैं जो एक ही बिंदु पर दो दिशाओं को प्रदर्शित करेंगी, जो कि असंभव है।

प्रश्न 2. एकाकी चुंबकीय ध्रुव (Monopole) का अस्तित्व क्यों नहीं होता? MP Board 2019

उत्तर: चुंबकत्व का मूल कारण परमाणु में इलेक्ट्रॉनों का चक्रीय और कक्षीय परिक्रमण है, जो एक सूक्ष्म धारा लूप की भांति कार्य करता है। धारा लूप सदैव द्विध्रुव निर्मित करता है। अतः चुंबक को कितना भी तोड़ा जाए, प्रत्येक भाग में स्वतः N तथा S ध्रुव उत्पन्न हो जाते हैं। इसलिए एकल ध्रुव का अस्तित्व संभव नहीं है।

प्रश्न 3. नमन कोण (Dip Angle) से आप क्या समझते हैं? ध्रुवों तथा विषुवत रेखा पर इसका मान कितना होता है? MP Board 2018, 2022

उत्तर: स्वतंत्रतापूर्वक लटकी हुई चुंबकीय सुई की अक्ष द्वारा चुंबकीय याम्योत्तर में क्षैतिज दिशा के साथ बनाए गए कोण को **नमन कोण (δ)** कहते हैं।

- चुंबकीय ध्रुवों पर नमन कोण: $\delta = 90°$
- चुंबकीय विषुवत रेखा (Equator) पर नमन कोण: $\delta = 0°$

प्रश्न 4. दिकपात कोण (Angle of Declination) की परिभाषा लिखिए।

उत्तर: पृथ्वी के किसी स्थान पर भौगोलिक याम्योत्तर (Geographic Meridian) तथा चुंबकीय याम्योत्तर (Magnetic Meridian) के बीच बनने वाले न्यून कोण को उस स्थान का **दिकपात कोण (D)** कहते हैं।

प्रश्न 5. प्रतिचुंबकीय तथा अनुचुंबकीय पदार्थों में दो अंतर लिखिए। MP Board 2021

उत्तर:

1. **प्रतिचुंबकीय:** ये चुंबकीय क्षेत्र द्वारा क्षीण रूप से प्रतिकर्षित होते हैं। इनकी चुंबकीय प्रवृत्ति (χ) ऋणात्मक होती है।
2. **अनुचुंबकीय:** ये चुंबकीय क्षेत्र द्वारा क्षीण रूप से आकर्षित होते हैं। इनकी चुंबकीय प्रवृत्ति (χ) धनात्मक एवं छोटी होती है।

प्रश्न 6. क्यूरी का नियम क्या है? इसका सूत्र लिखिए। MP Board 2020

उत्तर: अनुचुंबकीय पदार्थों की चुंबकीय प्रवृत्ति (χ_m) उनके परम ताप (T) के व्युत्क्रमानुपाती होती है। इसे क्यूरी का नियम कहते हैं।

$\chi_m \propto 1/T \Rightarrow \chi_m = C/T$ (जहाँ C क्यूरी नियतांक है)।

प्रश्न 7. क्यूरी ताप (Curie Temperature) से क्या तात्पर्य है? लोहे के लिए इसका मान लिखिए।

उत्तर: वह निश्चित ताप जिसके ऊपर गर्म करने पर लोहचुंबकीय पदार्थ (Ferromagnetic) अपना लोहचुंबकत्व खोकर अनुचुंबकीय पदार्थ (Paramagnetic) की भांति व्यवहार करने लगता है, **क्यूरी ताप (T_c)** कहलाता है। लोहे के लिए क्यूरी ताप लगभग $770°C$ (या $1043\ K$) होता है।

प्रश्न 8. चुंबकन की तीव्रता (I) और चुंबकीय प्रवृत्ति (χ_m) का SI मात्रक एवं विमा लिखिए।

उत्तर:

- चुंबकन की तीव्रता (I) का SI मात्रक = A/m (एम्पियर/मीटर), विमा = $[L^{-1} A]$।
- चुंबकीय प्रवृत्ति ($\chi_m = I/H$) एक अनुपात है, अतः यह **विमाहीन तथा मात्रकहीन** राशि है।

प्रश्न 9. नरम लोहे और फौलाद (Steel) के चुंबकीय गुणों में दो मुख्य अंतर लिखिए। MP Board 2022

उत्तर:

1. नरम लोहे की चुंबकनशीलता तथा धारणशीलता अधिक होती है, अतः इससे **अस्थाई चुंबक (विद्युत चुंबक)** बनाए जाते हैं।
2. फौलाद (इस्पात) की निग्राहिता (Coercivity) बहुत अधिक होती है, अतः इससे **स्थाई चुंबक (Permanent Magnets)** बनाए जाते हैं।

प्रश्न 10. चुंबकीय याम्योत्तर तथा भौगोलिक याम्योत्तर की परिभाषा दीजिए।

उत्तर:

- **भौगोलिक याम्योत्तर:** पृथ्वी के भौगोलिक उत्तर एवं दक्षिण ध्रुव से होकर गुज़रने वाले काल्पनिक ऊर्ध्वाधर तल को भौगोलिक याम्योत्तर कहते हैं।
- **चुंबकीय याम्योत्तर:** स्वतंत्रतापूर्वक लटकी चुंबक की अक्ष से होकर गुज़रने वाले ऊर्ध्वाधर तल को चुंबकीय याम्योत्तर कहते हैं।

खण्ड (ब): लघुउत्तरीय प्रश्न (3 अंक)

प्रश्न 11. भू-चुंबकत्व के तीनों घटकों में संबंध स्थापित कीजिए: B_H, B_V और δ। MP Board 2019, 2023

उत्तर: माना कि किसी स्थान पर पृथ्वी का कुल चुंबकीय क्षेत्र B है और नमन कोण δ है।

1. कुल क्षेत्र B का क्षैतिज घटक: $B_H = B \cos \delta$ --- (समीकरण 1)
2. कुल क्षेत्र B का ऊर्ध्वाधर घटक: $B_V = B \sin \delta$ --- (समीकरण 2)

समीकरण (2) को (1) से भाग देने पर:

$B_V / B_H = (B \sin \delta) / (B \cos \delta) = \tan \delta \Rightarrow \tan \delta = B_V / B_H$

समीकरण (1) और (2) के वर्गों को जोड़ने पर:

$B_H^2 + B_V^2 = B^2 (\cos^2\delta + \sin^2\delta) = B^2 \Rightarrow B = \sqrt{(B_H^2 + B_V^2)}$। इति सिद्धम्।

प्रश्न 12. आपेक्षिक पारगम्यता (μ_r) तथा चुंबकीय प्रवृत्ति (χ_m) में संबंध व्युत्पन्न कीजिए: $\mu_r = 1 + \chi_m$। MP Board 2021

उत्तर: जब किसी पदार्थ को चुंबकन क्षेत्र H में रखा जाता है, तो उसमें कुल चुंबकीय क्षेत्र B बाह्य क्षेत्र तथा प्रेरित क्षेत्र के योग के बराबर होता है:

$B = \mu_0 H + \mu_0 I = \mu_0 (H + I)$

हम जानते हैं कि चुंबकन तीव्रता $I = \chi_m H$,

अतः $B = \mu_0 (H + \chi_m H) = \mu_0 H (1 + \chi_m)$

परंतु माध्यम में $B = \mu H$ होता है। अतः:

$\mu H = \mu_0 H (1 + \chi_m) \Rightarrow \mu / \mu_0 = 1 + \chi_m$

चूंकि आपेक्षिक पारगम्यता $\mu_r = \mu / \mu_0$, अतः $\mu_r = 1 + \chi_m$। इति सिद्धम्।

प्रश्न 13. डोमेन सिद्धांत के आधार पर लोहचुंबकत्व की व्याख्या कीजिए। MP Board 2018

उत्तर: लोहचुंबकीय पदार्थों (जैसे लोहा, निकेल) के अंदर परमाण्विक चुंबक स्वतः ही कुछ जटिल अन्योन्नक्रिया के कारण छोटे-छोटे सूक्ष्म क्षेत्रों में व्यवस्थित हो जाते हैं। इन सूक्ष्म क्षेत्रों को **डोमेन (Domain)** कहते हैं।

- प्रत्येक डोमेन में लगभग 10^{17} से 10^{21} परमाणु होते हैं और उनका एक निश्चित परिणामी चुंबकीय आघूर्ण होता है।
- **अचुंबकित अवस्था में:** डोमेन बेतरतीब (Random) दिशाओं में व्यवस्थित रहते हैं, जिससे कुल परिणामी चुंबकीय आघूर्ण शून्य होता है।
- **बाह्य चुंबकीय क्षेत्र लगाने पर:** दो प्रक्रियाओं द्वारा चुंबकन होता है:

1. सीमाओं के विस्थापन द्वारा: क्षेत्र की दिशा वाले डोमेन आकार में बड़े हो जाते हैं।
2. डोमेनों के घूर्णन द्वारा: तीव्र बाह्य क्षेत्र में सभी डोमेन घूमकर बाह्य क्षेत्र की दिशा में संरेखित हो जाते हैं।

प्रश्न 14. स्थाई चुंबक तथा विद्युत चुंबक में अंतर लिखिए एवं इनके निर्माण हेतु उपयुक्त पदार्थों का नाम बताइए।

उत्तर:

- **स्थाई चुंबक:** इनका चुंबकत्व आसानी से नष्ट नहीं होता। ये उच्च निग्राहिता (Coercivity) एवं उच्च धारणशीलता वाले पदार्थों से बनाए जाते हैं। उपयुक्त पदार्थ: इस्पात (Steel), एल्निको (Alnico)।
- **विद्युत चुंबक (अस्थाई):** धारा प्रवाहित करने पर चुंबकत्व उत्पन्न होता है और धारा बंद करते ही समाप्त हो जाता है। ये उच्च चुंबकनशीलता एवं निम्न निग्राहिता वाले पदार्थों से बनाए जाते हैं। उपयुक्त पदार्थ: नरम लोहा (Soft Iron)।

प्रश्न 15. प्रतिचुंबकीय पदार्थ चुंबकीय क्षेत्र में लटकने पर क्षेत्र के लंबवत क्यों हो जाते हैं?

उत्तर: प्रतिचुंबकीय पदार्थ प्रबल चुंबकीय क्षेत्र से प्रतिकर्षित होकर दुर्बल क्षेत्र की ओर जाने का प्रयास करते हैं। जब किसी प्रतिचुंबकीय छड़ को दो चुंबकीय ध्रुवों के बीच स्वतंत्रतापूर्वक लटकाया जाता है, तो छड़ के सिरे ध्रुवों के निकट होने के कारण अधिकतम प्रतिकर्षण बल अनुभव करते हैं। न्यूनतम स्थितिज ऊर्जा प्राप्त करने के लिए छड़ घूमकर चुंबकीय क्षेत्र की रेखाओं के **लंबवत (90°)** ठहरती है।

प्रश्न 16. उदासीन बिंदु (Neutral Points) किसे कहते हैं? जब चुंबक का उत्तर ध्रुव उत्तर की ओर हो, तो उदासीन बिंदु कहाँ प्राप्त होते हैं?

उत्तर: किसी चुंबक के चारों ओर स्थित वे बिंदु जहाँ चुंबक का चुंबकीय क्षेत्र, पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र के क्षैतिज घटक (B_H) के ठीक बराबर तथा विपरीत दिशा में होता है, **उदासीन बिंदु** कहलाते हैं। इन बिंदुओं पर परिणामी चुंबकीय क्षेत्र शून्य होता है।

- **जब N ध्रुव उत्तर की ओर हो:** उदासीन बिंदु चुंबक की **निरक्षीय रेखा (Equatorial Line)** पर दोनों ओर प्राप्त होते हैं।
- **जब N ध्रुव दक्षिण की ओर हो:** उदासीन बिंदु चुंबक की **अक्षीय रेखा (Axial Line)** पर प्राप्त होते हैं।

प्रश्न 17. चुंबकीय बल रेखाएं एक दूसरे को क्यों नहीं काटतीं? स्पष्ट कीजिए।

उत्तर: यदि दो चुंबकीय बल रेखाएं एक दूसरे को किसी बिंदु पर काटेंगी, तो उस कटान बिंदु पर दो स्पर्श रेखाएं खींची जा सकती हैं। इसका अर्थ यह होगा कि उस बिंदु पर चुंबकीय क्षेत्र की दो दिशाएं होंगी, जो कि व्यावहारिक रूप से असंभव है क्योंकि किसी भी बिंदु पर परिणामी चुंबकीय क्षेत्र की केवल एक ही अद्वितीय दिशा हो सकती है।

प्रश्न 18. धारावाही परिनालिका (Solenoid) एक दंड चुंबक की भांति व्यवहार करती है, सिद्ध कीजिए।

उत्तर: जब किसी परिनालिका में धारा प्रवाहित की जाती है, तो उसके अंदर एकसमान चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न होता है।
1. इसके एक सिरे पर धारा वामावर्त (Anticlockwise) दिखती है जो **उत्तर ध्रुव (N)** की भांति कार्य करता है और दूसरे सिरे पर धारा दक्षिणावर्त (Clockwise) दिखती है जो **दक्षिण ध्रुव (S)** की भांति कार्य करता है।
2. अक्षीय दूरी r पर परिनालिका का चुंबकीय क्षेत्र $B = (\mu_0 / 4\pi) \cdot (2M / r^3)$ प्राप्त होता है, जो कि दंड चुंबक के अक्षीय क्षेत्र के व्यंजक के पूर्णतः समान है।

प्रश्न 19. शैथिल्य लूप (Hysteresis Loop) और शैथिल्य हानि क्या है?

उत्तर: जब किसी लोहचुंबकीय पदार्थ को चुंबकन चक्र (Magnetization Cycle) से गुज़ारा जाता है, तो चुंबकन तीव्रता I चुंबकन क्षेत्र H से पीछे रह जाती है। इस घटना को **शैथिल्य (Hysteresis)** कहते हैं। I और H के बीच खिंचा गया ग्राफ शैथिल्य वक्र कहलाता है। इस प्रक्रिया में ऊर्जा का क्षय ऊष्मा के रूप में होता है जिसे शैथिल्य हानि कहते हैं।

प्रश्न 20. चुंबकीय द्विध्रुव को एकसमान चुंबकीय क्षेत्र में घुमाने में किए गए कार्य का सूत्र व्युत्पन्न कीजिए।

उत्तर: माना M चुंबकीय आघूर्ण का द्विध्रुव B क्षेत्र में θ कोण पर स्थित है। टॉर्क $\tau = M B \sin\theta$।
सूक्ष्म कोण $d\theta$ से घुमाने में कार्य: $dW = \tau\, d\theta = M B \sin\theta\, d\theta$
θ_1 से θ_2 तक घुमाने में कुल कार्य:
$W = \int_{\theta_1}^{\theta_2} M B \sin\theta\, d\theta = M B [-\cos\theta]_{\theta_1}^{\theta_2} = M B (\cos\theta_1 - \cos\theta_2)$
यदि प्रारंभ में $\theta_1 = 0°$ तथा अंतिम स्थिति $\theta_2 = \theta$ हो, तो: $W = M B (1 - \cos\theta)$।

खण्ड (स): दीर्घउत्तरीय प्रश्न व व्यंजक (4/5 अंक)

प्रश्न 21. छोटे दंड चुंबक के कारण अक्षीय स्थिति (Axial Position) में किसी बिंदु पर चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता का व्यंजक व्युत्पन्न कीजिए। MP Board 2018, 2022, 2024

व्यंजक:

माना एक छोटा दंड चुंबक NS है जिसकी चुंबकीय लंबाई $2l$ तथा ध्रुव सामर्थ्य m है। इसका मध्य बिंदु O है। चुंबकीय आघूर्ण $M = m \times 2l$। अक्षीय स्थिति में मध्य बिंदु O से r दूरी पर एक बिंदु P स्थित है।

- उत्तर ध्रुव N के कारण P पर चुंबकीय क्षेत्र:

$B_1 = (\mu_0 / 4\pi) \cdot [m / (r - l)^2]$ (दिशा N से P की ओर)

- दक्षिण ध्रुव S के कारण P पर चुंबकीय क्षेत्र:

$B_2 = (\mu_0 / 4\pi) \cdot [m / (r + l)^2]$ (दिशा P से S की ओर)

परिणामी चुंबकीय क्षेत्र $B = B_1 - B_2$ (चूंकि $B_1 > B_2$):

$B = (\mu_0 / 4\pi) \cdot m \cdot [1/(r - l)^2 - 1/(r + l)^2] = (\mu_0 / 4\pi) \cdot m \cdot [(4 r l) / (r^2 - l^2)^2]$

चूंकि $M = m \times 2l$, अतः:

$B = (\mu_0 / 4\pi) \cdot [(2 M r) / (r^2 - l^2)^2]$

छोटे चुंबक के लिए ($l \ll r$), l^2 को उपेक्षा करने पर:

$B_{axial} = (\mu_0 / 4\pi) \cdot (2M / r^3)$। इसकी दिशा S से N अक्ष के अनुदिश होती है।

प्रश्न 22. छोटे दंड चुंबक के कारण निरक्षीय स्थिति (Equatorial Position) में चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता का व्यंजक स्थापित कीजिए। MP Board 2019, 2021

व्यंजक:

माना एक चुंबक NS (लंबाई $2l$) के मध्य बिंदु O से लंब-समद्विभाजक (निरक्ष) पर r दूरी पर बिंदु P स्थित है।

दूरी $NP = SP = \sqrt{(r^2 + l^2)}$।

- N ध्रुव के कारण क्षेत्र: $B_1 = (\mu_0 / 4\pi) \cdot [m / (r^2 + l^2)]$
- S ध्रुव के कारण क्षेत्र: $B_2 = (\mu_0 / 4\pi) \cdot [m / (r^2 + l^2)]$

लंबवत घटक ($B_1 \sin\theta$ तथा $B_2 \sin\theta$) आपस में निरस्त हो जाते हैं, जबकि क्षैतिज घटक ($B_1 \cos\theta$ तथा $B_2 \cos\theta$) एक ही दिशा में जुड़ जाते हैं।

परिणामी क्षेत्र $B = B_1 \cos\theta + B_2 \cos\theta = 2 B_1 \cos\theta$

समकोण त्रिभुज से $\cos\theta = l / \sqrt{(r^2 + l^2)}$।

$B = 2 \cdot [(\mu_0 / 4\pi) \cdot m / (r^2 + l^2)] \cdot [l / \sqrt{(r^2 + l^2)}] = (\mu_0 / 4\pi) \cdot [(m \times 2l) / (r^2 + l^2)^{3/2}]$

चुंबकीय आघूर्ण $M = m \times 2l$ रखने पर:

$B = (\mu_0 / 4\pi) \cdot [M / (r^2 + l^2)^{3/2}]$

छोटे चुंबक हेतु ($l \ll r$):

$B_{eq} = (\mu_0 / 4\pi) \cdot (M / r^3)$। दिशा अक्ष के समांतर N से S की ओर होती है।

प्रश्न 23. एकसमान चुंबकीय क्षेत्र में रखे चुंबकीय द्विध्रुव पर लगने वाले बल आघूर्ण (Torque) का व्यंजक स्थापित कीजिए एवं इसकी सहायता से स्थितिज ऊर्जा ज्ञात कीजिए। MP Board 2020

उत्तर:

माना एक चुंबक NS (लंबाई $2l$, ध्रुव सामर्थ्य m) एकसमान क्षेत्र B में कोण θ पर रखा है।

- N ध्रुव पर बल: $F = m B$ (क्षेत्र की दिशा में)
- S ध्रुव पर बल: $F = m B$ (क्षेत्र की विपरीत दिशा में)

ये दो समान, समांतर तथा विपरीत बल बल-युग्म बनाते हैं।

बल आघूर्ण τ = **बल × बलों के बीच की लंबवत दूरी** $= (m B) \times (2l \sin \theta)$

चूंकि $M = m \times 2l$, अतः $\tau = M B \sin \theta$।

स्थितिज ऊर्जा (U): मानक स्थिति ($\theta = 90°$) से स्थिति θ तक घुमाने में किया गया कार्य ही स्थितिज ऊर्जा है:

$U = \int_{90°}^{\theta} M B \sin \theta \, d\theta = M B [-\cos \theta]_{90°}^{\theta} = - M B \cos \theta = - \vec{M} \cdot \vec{B}$।

प्रश्न 24. पार्थिव चुंबकत्व (Earth's Magnetism) के कारण क्या हैं? भू-चुंबकीय अवयवों का सविस्तार वर्णन कीजिए।

उत्तर:

कारण: पृथ्वी के कोर (Core) में स्थित पिघले हुए लोहे व निकेल जैसे संवहनी धात्विक द्रवों की गति (Dynamo Effect) के कारण धाराएं उत्पन्न होती हैं जो चुंबकीय क्षेत्र बनाती हैं।

भू-चुंबकीय अवयव (Elements):

1. **दिकपात कोण (D):** भौगोलिक एवं चुंबकीय याम्योत्तर के मध्य कोण।
2. **नमन कोण (I या δ):** कुल चुंबकीय क्षेत्र की क्षैतिज से ढलान।
3. **क्षैतिज घटक (B_H):** कुल क्षेत्र का क्षैतिज दिशा में मान ($B_H = B \cos \delta$)।

प्रश्न 25. प्रतिचुंबकीय, अनुचुंबकीय एवं लोहचुंबकीय पदार्थों में तुलनात्मक अध्ययन पाँच मुख्य बिंदुओं में कीजिए। MP Board 2019, 2023

उत्तर: (विस्तृत उत्तर हेतु ऊपर दी गई तालिका 5 देखें)। मुख्य 5 बिंदु:

1. बाह्य क्षेत्र में आकर्षण/प्रतिकर्षण,
2. चुंबकीय प्रवृत्ति (χ_m) का मान,
3. आपेक्षिक पारगम्यता (μ_r),
4. ताप का प्रभाव (क्यूरी नियम),
5. असमान क्षेत्र में गति (कम क्षेत्र की ओर या अधिक क्षेत्र की ओर)।

प्रश्न 26. चुंबकीय क्षेत्र रेखाओं एवं विद्युत क्षेत्र रेखाओं में अंतर व समानताएं स्पष्ट कीजिए।

उत्तर:

- **समानता:** दोनों की स्पर्श रेखा क्षेत्र की दिशा बताती है, और दोनों एक दूसरे को नहीं काटतीं।
- **अंतर:** चुंबकीय बल रेखाएं **सतत बंद वक्र (Closed Loops)** बनाती हैं क्योंकि एकल चुंबकीय ध्रुव नहीं होता। जबकि विद्युत बल रेखाएं धन आवेश से शुरू होकर ऋण आवेश पर समाप्त होती हैं (खुला वक्र बनाती हैं)।

7. महत्वपूर्ण हल सहित संख्यात्मक प्रश्न (Numericals - Questions 27 to 30)

प्रश्न 27 (संख्यात्मक). एक छोटे छड़ चुंबक का चुंबकीय आघूर्ण $0.40\ J/T$ (या $A \cdot m^2$) है। इसके केंद्र से $20\ cm$ की दूरी पर (i) अक्षीय स्थिति तथा (ii) निरक्षीय स्थिति में चुंबकीय क्षेत्र का मान ज्ञात कीजिए। NCERT / Board Special

हल:

दिया है: $M = 0.40\ J/T$, दूरी $r = 20\ cm = 0.2\ m$, नियतांक $\mu_0 / 4\pi = 10^{-7}\ T \cdot m/A$।

(i) अक्षीय स्थिति में:

$B_{axial} = (\mu_0 / 4\pi) \cdot (2M / r^3)$

$B_{axial} = 10^{-7} \times (2 \times 0.40) / (0.2)^3 = 10^{-7} \times 0.80 / 0.008 = 10^{-7} \times 100 = 1.0 \times 10^{-5}$ **टेसला** (T)।

(ii) निरक्षीय स्थिति में:

$B_{eq} = B_{axial} / 2 = (1.0 \times 10^{-5}) / 2 = 0.5 \times 10^{-5}\ T = 5.0 \times 10^{-6}\ T$।

प्रश्न 28 (संख्यात्मक). किसी स्थान पर पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र का क्षैतिज घटक $0.3\ G$ (गाउस) तथा नमन कोण $60°$ है। उस स्थान पर पृथ्वी का कुल चुंबकीय क्षेत्र (B) तथा ऊर्ध्वाधर घटक (B_V) ज्ञात कीजिए। MP Board 2020

हल:

दिया है: $B_H = 0.3\ G$, नमन कोण $\delta = 60°$।

1. सूत्र: $B_H = B \cos \delta \Rightarrow 0.3 = B \cos 60°$

चूंकि $\cos 60° = 0.5$,

$B = 0.3 / 0.5 = 0.6$ **गाउस** (G) (कुल चुंबकीय क्षेत्र)

2. ऊर्ध्वाधर घटक: $B_V = B \sin 60° = 0.6 \times (\sqrt{3} / 2) = 0.3 \times 1.732 = 0.5196\ G \approx 0.52$ **गाउस**।

प्रश्न 29 (संख्यात्मक). $M = 1.5\ J/T$ का एक छड़ चुंबक $0.22\ T$ के एकसमान चुंबकीय क्षेत्र के अनुदिश रखा है। इसे क्षेत्र की दिशा से $90°$ घुमाने में कितना कार्य करना पड़ेगा? तथा स्थितिज ऊर्जा क्या होगी?

हल:

दिया है: $M = 1.5\ J/T$, $B = 0.22\ T$, प्रारंभिक कोण $\theta_1 = 0°$, अंतिम कोण $\theta_2 = 90°$।

- **कार्य (W):**

$W = M B (1 - \cos 90°) = M B (1 - 0) = 1.5 \times 0.22 = 0.33$ **जूल** (J)।

- **$90°$ पर स्थितिज ऊर्जा (U):**

$U = - M B \cos 90° = 0$ **जूल**।

प्रश्न 30 (संख्यात्मक). एक चुंबकीय पदार्थ का आयतन $10^{-4}\ m^3$ है। जब इसे $1000\ A/m$ के चुंबकन क्षेत्र (H) में रखा जाता है, तो इसमें $0.4\ A \cdot m^2$ का चुंबकीय आघूर्ण उत्पन्न होता है। चुंबकन तीव्रता (I) तथा प्रवृत्ति (χ_m) की गणना कीजिए।

हल:

दिया है: आयतन $V = 10^{-4}\ m^3$, चुंबकीय आघूर्ण $M = 0.4\ A \cdot m^2$, क्षेत्र $H = 1000\ A/m$।

1. चुंबकन तीव्रता: $I = M / V = 0.4 / 10^{-4} = 4000\ A/m$।

2. चुंबकीय प्रवृत्ति: $\chi_m = I / H = 4000 / 1000 = 4$ (मात्रकहीन)।

8. आवश्यक एनसीईआरटी उदाहरण (Standard Examples)

उदाहरण 1: एक परिनालिका जिसकी प्रभावी लंबाई $20\ cm$ है तथा उसमें 500 फेरे हैं, $2.5\ A$ धारा प्रवाहित हो रही है। इसका चुंबकीय आघूर्ण क्या होगा?
हल: $M = N I A$। यदि अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल दिया हो, तो मान सीधे ज्ञात कर सकते हैं।

9. महत्वपूर्ण तथ्य, ट्रिक्स और मेमोरी हुक्स (Tricks & Memory Hooks)

- ⚡ **शॉर्टकट ट्रिक (2:1 का नियम):** छोटे दंड चुंबक के लिए अक्षीय स्थिति का चुंबकीय क्षेत्र, समान दूरी पर निरक्षीय स्थिति के क्षेत्र का ठीक **दुगना (2:1)** होता है ($B_{axial} = 2\ B_{eq}$)।
- ⚡ **नमन कोण याद रखने की ट्रिक:** "ध्रुव = 90°" (खड़े ध्रुव), "विषुवत = 0°" (सपाट / लेटी रेखा)।
- ⚡ **पदार्थ ट्रिक:**
  - प्रतिचुंबकीय (*Dia*): जल, तांबा, सोना (चुंबक से भागते हैं - $\chi < 0$)।
  - अनुचुंबकीय (*Para*): एल्युमिनियम, ऑक्सीजन (धीरे से पास आते हैं - $\chi > 0$)।
  - लोहचुंबकीय (*Ferro*): लोहा, निकेल, कोबाल्ट (तेजी से चिपकते हैं - $\chi \gg 1$)।

10. अंत में Quick Revision Notes (त्वरित पुनरीक्षण)

- **चुंबकीय द्विध्रुव आघूर्ण:** $M = m \times 2l$ (मात्रक: $A{\cdot}m^2$ या J/T, दिशा: $S \rightarrow N$)।
- **अक्षीय क्षेत्र:** $B = (\mu_0 / 4\pi) \cdot (2M / r^3)$ | **निरक्षीय क्षेत्र:** $B = (\mu_0 / 4\pi) \cdot (M / r^3)$।
- **टॉर्क:** $\tau = M B \sin\theta$ | **कार्य:** $W = M B (1 - \cos\theta)$ | **ऊर्जा:** $U = - M B \cos\theta$।
- **भू-चुंबकत्व:** $B_H = B \cos\delta$, $B_V = B \sin\delta$, $\tan\delta = B_V / B_H$, $B = \sqrt{(B_H^2 + B_V^2)}$।
- **पारगम्यता-प्रवृत्ति संबंध:** $\mu_r = 1 + \chi_m$।
- **क्यूरी का नियम:** $\chi_m = C / T$। क्यूरी ताप पर लोहचुंबकीय → अनुचुंबकीय बन जाता है।

11. पिछले वर्षों में बार-बार पूछे गए प्रश्न (PYQs) एवं बोर्ड परीक्षा स्तर उत्तर

PYQ 2024: प्रतिचुंबकीय तथा अनुचुंबकीय पदार्थों में कोई तीन प्रमुख अंतर लिखिए।

उत्तर: 1. प्रतिचुंबकीय पदार्थ चुंबक द्वारा प्रतिकर्षित होते हैं जबकि अनुचुंबकीय आकर्षित होते हैं। 2. प्रतिचुंबकीय की प्रवृत्ति (χ) ऋणात्मक तथा ताप-निरपेक्ष होती है, जबकि अनुचुंबकीय की प्रवृत्ति धनात्मक तथा ताप के व्युत्क्रमानुपाती ($1/T$) होती है। 3. प्रतिचुंबकीय की आपेक्षिक पारगम्यता $\mu_r < 1$ तथा अनुचुंबकीय की $\mu_r > 1$ होती है।

PYQ 2023: भू-चुंबकत्व के विभिन्न अवयव क्या हैं? इनमें आपसी संबंध स्थापित कीजिए।

उत्तर: तीन अवयव हैं: दिकपात कोण (D), नमन कोण (δ) एवं क्षैतिज घटक (B_H)। संबंध: $\tan\delta = B_V / B_H$ तथा $B = \sqrt{(B_H^2 + B_V^2)}$ (विस्तृत व्यंजक हेतु प्रश्न 11 देखें)।

PYQ 2022: छोटे दंड चुंबक के लिए निरक्षीय स्थिति में चुंबकीय क्षेत्र का सूत्र व्युत्पन्न कीजिए।

उत्तर: सिद्ध सूत्र: $B_{eq} = (\mu_0 / 4\pi) \cdot (M / r^3)$। पूर्ण चरण-दर-चरण निगमन हेतु प्रश्न 22 देखें।

PYQ 2020: किसी स्थान पर $B_H = 0.4\ G$ तथा $\delta = 45°$ है। पृथ्वी का कुल चुंबकीय क्षेत्र ज्ञात कीजिए।

उत्तर: $B_H = B \cos 45° \Rightarrow 0.4 = B \times (1 / \sqrt{2}) \Rightarrow B = 0.4 \times \sqrt{2} = 0.4 \times 1.414 = 0.5656$ **गाउस** (G)।

अध्याय - 6: वैद्युत चुंबकीय प्रेरण

कक्षा 12 *physics* | *MP Board & NCERT* | *100%* **बोर्ड परीक्षा विशेष हैंडरिटन नोट्स**

1. अध्याय का संक्षिप्त परिचय (*Introduction*)

सन 1820 में **ऑर्स्टेड** (*Oersted*) ने खोज की थी कि जब किसी चालक में विद्युत धारा प्रवाहित की जाती है, तो उसके चारों ओर चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न हो जाता है। इसके ठीक विपरीत, सन 1831 में **माइकल फैराडे** (*Michael Faraday*) तथा **जोसेफ हेनरी** (*Joseph Henry*) ने यह विचार प्रस्तुत किया कि क्या बदलता हुआ चुंबकीय क्षेत्र विद्युत धारा उत्पन्न कर सकता है?

प्रयोगों द्वारा यह सिद्ध हुआ कि जब भी किसी बंद कुंडली से बद्ध **चुंबकीय फ्लक्स** (*Magnetic Flux*) में परिवर्तन होता है, तो कुंडली में एक प्रेरित विद्युत वाहक बल (*Induced EMF*) उत्पन्न हो जाता है, और यदि परिपथ बंद है तो उसमें प्रेरित धारा (*Induced Current*) बहने लगती है। इस परिघटना को **वैद्युत चुंबकीय प्रेरण** (*Electromagnetic Induction - EMI*) कहते हैं।

2. महत्वपूर्ण परिभाषाएँ (*Key Definitions*)

1. **चुंबकीय फ्लक्स** (*Magnetic Flux*, Φ_B)**:** किसी चुंबकीय क्षेत्र में स्थित किसी पृष्ठ के लंबवत गुजरने वाली कुल चुंबकीय बल रेखाओं की संख्या को उस पृष्ठ से बद्ध चुंबकीय फ्लक्स कहते हैं।
2. **वैद्युत चुंबकीय प्रेरण** (*EMI*)**:** वह परिघटना जिसमें किसी बंद परिपथ से गुजरने वाले चुंबकीय फ्लक्स में परिवर्तन के कारण परिपथ में प्रेरित विद्युत वाहक बल एवं प्रेरित धारा उत्पन्न होती है।
3. **स्वप्रेरण** (*Self Induction*)**:** किसी कुंडली में प्रवाहित धारा के मान में परिवर्तन करने पर स्वयं उसी कुंडली में प्रेरित धारा उत्पन्न होने की परिघटना को स्वप्रेरण कहते हैं।
4. **अन्योन्य प्रेरण** (*Mutual Induction*)**:** जब दो कुंडलियों को पास-पास रखकर प्राथमिक कुंडली में धारा परिवर्तन किया जाता है, तो द्वितीयक कुंडली में प्रेरित *EMF* उत्पन्न होने की घटना अन्योन्य प्रेरण कहलाती है।
5. **भंवर धाराएं** (*Eddy Currents*)**:** जब किसी धातु के ठोस टुकड़े को असमान चुंबकीय क्षेत्र में रखा जाता है या बदलते चुंबकीय फ्लक्स में गति कराई जाती है, तो उसके संपूर्ण आयतन में चक्रवर्ती (जल के भंवर जैसी) प्रेरित धाराएं उत्पन्न हो जाती हैं। इन्हें भंवर धाराएं (या फूको धाराएं) कहते हैं।

3. मुख्य सूत्र (*Formulas Box*)

1. चुंबकीय फ्लक्स (Φ_B)

$\Phi_B = B \cdot A = B\,A\cos\theta$ (**मात्रक: वेबर /** *Weber, CGS:* **मैक्सवेल**)

2. फैराडे का प्रेरण का नियम (*INDUCED EMF*)

$e = -N(d\Phi/dt)$ **अथवा** $e = -N(\Delta\Phi/\Delta t)$

3. प्रेरित धारा (I) एवं प्रेरित आवेश (Q)

$i = e/R = -(N/R)\cdot(d\Phi/dt)$

$q = i\cdot\Delta t = (N/R)\cdot\Delta\Phi$ [**नोट: प्रेरित आवेश समय पर निर्भर नहीं करता**]

4. गतिक विद्युत वाहक बल (*MOTIONAL EMF*)

$e = B\,v\,l$ (**यदि** B, v, l **परस्पर लंबवत हों**)

$e = B\,v\,l\sin\theta$

5. स्वप्रेरण (*SELF INDUCTION*)

$\Phi = L\,I \Rightarrow e = -L\,(dI/dt)$

समतल वृत्ताकार कुंडली का स्वप्रेरकत्व: $L = (\mu_0\,\mu_r\,\pi\,N^2\,R)/2$

परिनालिका का स्वप्रेरकत्व: $L = (\mu_0\,\mu_r\,N^2\,A)/l$

6. अन्योन्य प्रेरण (*MUTUAL INDUCTION*)

$\Phi_2 = M\,I_1 \Rightarrow e_2 = -M\,(dI_1/dt)$

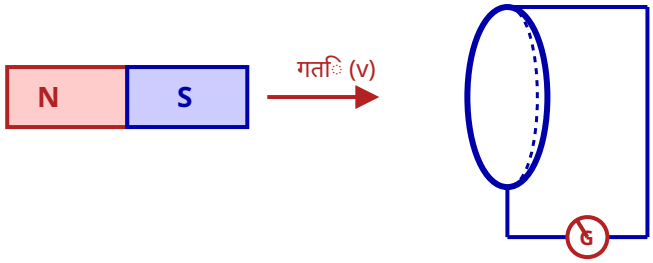
दो परिनालिकाओं का अन्योन्य प्रेरकत्व: $M = (\mu_0\,N_1\,N_2\,A)/l$

युग्मन गुणांक (*Coupling Constant*): $K = M/\sqrt{(L_1\,L_2)}$ $(0 \le K \le 1)$

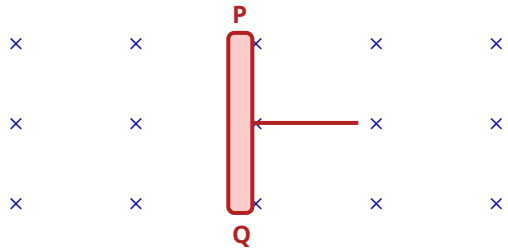
7. प्रेरक में संचित चुंबकीय ऊर्जा (*STORED ENERGY*)

$U = \frac{1}{2}\,L\,I^2$

4. हस्तलिखित चित्र / डायग्राम (*Handwritten Diagrams*)



चित्र 6.1: चुम्बक एवं कुंडली का प्रयोग (फैराडे का प्रयोग)



चित्र 6.2: चुंबकीय क्षेत्र में चालक छड़ की गति (गतिक *EMF*)

5. महत्वपूर्ण तथ्य, ट्रिक्स और याद रखने योग्य बिंदु

ट्रिक (*Lenz's Law*): लेंज का नियम हमेशा विरोधी स्वभाव का होता है! "जो उत्पन्न करता है, उसी का विरोध करता है।" यदि फ्लक्स बढ़ रहा है तो घटाएगा, यदि घट रहा है तो बढ़ाएगा।

ऊर्जा संरक्षण: लेंज का नियम सीधे तौर पर **ऊर्जा संरक्षण के सिद्धांत** पर आधारित है। यांत्रिक कार्य ही विद्युत ऊर्जा में परिवर्तित होता है।

स्वप्रेरकत्व (L) को जड़त्व भी कहते हैं: यांत्रिकी में जो काम 'द्रव्यमान (m)' करता है, वही काम विद्युत परिपथ में स्वप्रेरकत्व (L) करता है। इसीलिए L को **विद्युत का जड़त्व (*Electrical Inertia*)** कहते हैं।

1 Weber = 10^8 Maxwell (CGS मात्रक)।

1 Henry = 1 Weber / Ampere = 1 Volt · sec / Ampere।

भंवर धाराओं के दुष्प्रभाव को कम करने के लिए क्रोड को **पटलित (*Laminated*)** बनाया जाता है तथा वार्निश से पॉलिश किया जाता है।

6. महत्वपूर्ण प्रश्न एवं उत्तर (1-30 तक अंकवार विभाजित)

[अति लघु उत्तरीय प्रश्न - 2 अंक]

प्रश्न 1: चुंबकीय फ्लक्स की परिभाषा एवं इसका $S.I.$ मात्रक लिखिए। 2 अंक

उत्तर:

परिभाषा: चुंबकीय क्षेत्र में स्थित किसी पृष्ठ के लंबवत गुजरने वाली कुल चुंबकीय रेखाओं की संख्या को **चुंबकीय फ्लक्स** कहते हैं।

सूत्र: $\Phi_B = B A \cos\theta$

$S.I.$ **मात्रक:** वेबर ($Weber$ या Wb) अथवा वोल्ट-सेकंड। यह एक **अदिश राशि** है। इसका विमीय सूत्र $[M^1 L^2 T^{-2} A^{-1}]$ है।

प्रश्न 2: फैराडे के वैद्युत चुंबकीय प्रेरण के नियम लिखिए। 2 अंक

उत्तर:

प्रथम नियम: जब भी किसी बंद परिपथ से बद्ध चुंबकीय फ्लक्स में परिवर्तन होता है, तो परिपथ में एक प्रेरित विद्युत वाहक बल (EMF) उत्पन्न हो जाता है, जो केवल तब तक रहता है जब तक फ्लक्स में परिवर्तन होता रहता है।

द्वितीय नियम: प्रेरित विद्युत वाहक बल का मान चुंबकीय फ्लक्स में परिवर्तन की समय दर के समानुपाती होता है।

$e = - N (d\Phi / dt)$

प्रश्न 3: लेंज का नियम लिखिए। 2 अंक

उत्तर:

लेंज का नियम: "वैद्युत चुंबकीय प्रेरण की प्रत्येक अवस्था में प्रेरित विद्युत धारा की दिशा सदैव इस प्रकार होती है कि वह उस कारण का विरोध करती है जिससे वह स्वयं उत्पन्न हुई है।"

प्रश्न 4: स्वप्रेरण और अन्योन्य प्रेरण में कोई दो अंतर लिखिए। 2 अंक

उत्तर:

स्वप्रेरण (*Self Induction*)	**अन्योन्य प्रेरण** (*Mutual Induction*)
1. इसमें केवल एक ही कुंडली की आवश्यकता होती है।	1. इसमें दो कुंडलियों (प्राथमिक व द्वितीयक) की आवश्यकता होती है।
2. प्रेरित धारा स्वयं मुख्य धारा के परिवर्तन का विरोध करती है।	2. द्वितीयक कुंडली में प्रेरित धारा, प्राथमिक धारा का विरोध करती है।

प्रश्न 5: स्वप्रेरकत्व (1 हेनरी) को परिभाषित कीजिए। 2 अंक

उत्तर:

यदि किसी कुंडली में धारा परिवर्तन की दर 1 एम्पीयर प्रति सेकंड (1 *A/s*) होने पर उसमें 1 वोल्ट का प्रेरित विद्युत वाहक बल उत्पन्न हो, तो उस कुंडली का स्वप्रेरकत्व **1 हेनरी (1 *H*)** कहलाता है।

L = e / (dI/dt) = 1 Volt / (1 A/s) = 1 Henry

प्रश्न 6: भंवर धाराएं क्या हैं? इनके दो उपयोग लिखिए। 2 अंक

उत्तर:

परिभाषा: जब किसी चालक को परिवर्तित चुंबकीय क्षेत्र में रखा जाता है, तो उसके आयतन में चक्करदार प्रेरित धाराएं बहने लगती हैं, जिन्हें **भंवर धाराएं** कहते हैं।

उपयोग: *(i)* प्रेरण भट्टी (*Induction Furnace*) में धातुओं को पिघलाने में, (*ii*) प्रेरण मोटर तथा विद्युत ब्रेक *(Electromagnetic Brakes)* में।

प्रश्न 7: किसी कुंडली का स्वप्रेरकत्व किन-किन कारकों पर निर्भर करता है? 2 अंक

उत्तर:

(1) **फेरों की संख्या (N):** $L \propto N^2$ (फेरों की संख्या बढ़ाने पर स्वप्रेरकत्व बढ़ता है)।

(2) **क्षेत्रफल (A):** $L \propto A$ (क्षेत्रफल बढ़ाने पर L बढ़ता है)।

(3) **क्रोड की प्रकृति (μ_r):** नर्म लोहे का क्रोड रखने पर स्वप्रेरकत्व का मान बहुत बढ़ जाता है।

प्रश्न 8: प्रेरणहीन कुंडली (*Non-inductive coil*) कैसे बनाई जाती है? 2 अंक

उत्तर:

प्रतिरोध बॉक्स में तार को दोहरा (*Double fold*) करके लकड़ी या प्लास्टिक के बॉबिन पर लपेटा जाता है। इससे दोनों तारों में धारा विपरीत दिशा में बहती है, जिससे उनके चुंबकीय क्षेत्र परस्पर निरस्त हो जाते हैं और स्वप्रेरकत्व नगण्य (शून्य) हो जाता है।

प्रश्न 9: क्या कारण है कि प्रतिरोध बॉक्स की कुंडलियों को दोहरा करके बनाया जाता है? 2 अंक

उत्तर:

प्रतिरोध बॉक्स में स्वप्रेरण के प्रभाव को समाप्त करने के लिए ही कुंडलियों को दोहरा करके लपेटा जाता है ताकि केवल शुद्ध प्रतिरोध का मान ही परिपथ में आए और स्वप्रेरकत्व का कोई प्रभाव न पड़े।

प्रश्न 10: फ्लेमिंग के दाएं हाथ का नियम लिखिए। 2 अंक

उत्तर:

यदि दाएं हाथ के अंगूठे, तर्जनी और मध्यमा को इस प्रकार फैलाएं कि वे परस्पर लंबवत हों: यदि **तर्जनी** चुंबकीय क्षेत्र (B) को तथा **अंगूठा** चालक की गति (v) की दिशा को दर्शाए, तो **मध्यमा** प्रेरित विद्युत धारा (i) की दिशा प्रदर्शित करेगी।

[लघु उत्तरीय प्रश्न - 3 अंक]

प्रश्न 11: सिद्ध कीजिए कि लेंज का नियम ऊर्जा संरक्षण नियम के अनुकूल है। 3 अंक

उत्तर:

जब किसी चुम्बक के N-ध्रुव को कुंडली के पास लाते हैं, तो लेंज के नियमानुसार कुंडली का सम्मुख तल भी N-ध्रुव बन जाता है और चुम्बक की गति का प्रतिकर्षण बल द्वारा विरोध करता है।

चुम्बक को इस प्रतिकर्षण बल के विरुद्ध पास लाने में बाह्य कारक द्वारा **यांत्रिक कार्य** (*Mechanical Work*) करना पड़ता है। यही यांत्रिक कार्य परिपथ में **विद्युत ऊर्जा** (तथा अंततः ऊष्मीय ऊर्जा) के रूप में प्रकट होता है। अतः लेंज का नियम ऊर्जा संरक्षण नियम का पूर्णतः पालन करता है।

प्रश्न 12: एक समतल वृत्ताकार कुंडली के स्वप्रेरकत्व हेतु व्यंजक व्युत्पन्न कीजिए। 3 अंक

उत्तर:

माना R त्रिज्या तथा N फेरों वाली एक समतल वृत्ताकार कुंडली में I धारा प्रवाहित हो रही है।

1. केंद्र पर चुंबकीय क्षेत्र: $B = (\mu_0 N I) / (2 R)$

2. प्रत्येक फेरे से बद्ध चुंबकीय फ्लक्स: $\Phi = B \cdot A = [(\mu_0 N I) / (2 R)] \times (\pi R^2)$

3. कुल फ्लक्स ग्रंथिताएँ: $N \Phi = (\mu_0 \pi N^2 R I) / 2$

4. परिभाषा से $N \Phi = L I$, अतः:

$$L = (\mu_0 \mu_r \pi N^2 R) / 2 \quad \text{Henry}$$

प्रश्न 13: भंवर धाराओं के हानियाँ तथा उन्हें कम करने के उपाय लिखिए। 3 अंक

उत्तर:

हानियाँ: *(i)* भंवर धाराओं के कारण ट्रांसफार्मर, डायनेमो आदि के धातु क्रोड गर्म हो जाते हैं, जिससे विद्युत ऊर्जा का ऊष्मा के रूप में अनाव्ययक क्षय होता है। (*ii*) अत्यधिक ऊष्मा से विद्युत उपकरणों की इंसुलेशन परत जल सकती है।

कम करने के उपाय: क्रोड को एकल ठोस टुकड़े के स्थान पर **पटलित पत्तियों (***Laminated sheets***)** के रूप में बनाया जाता है तथा पत्तियों के बीच वार्निश की पतली परत चढ़ाकर विद्युत रोधित कर दिया जाता है।

प्रश्न 14: किसी प्रेरक (*Inductor*) में संचित चुंबकीय स्थितिज ऊर्जा का व्यंजक प्राप्त कीजिए। 3 अंक

उत्तर:

माना L स्वप्रेरकत्व वाले प्रेरक में किसी क्षण धारा i है। प्रेरित विरोधी EMF, $e = -L\,(di/dt)$।

dt समय में dq आवेश भेजने में किया गया सूक्ष्म कार्य: $dW = |e|\,dq = L\,(di/dt)\,(i\,dt) = L\,i\,di$

धारा को 0 से I तक बढ़ाने में किया गया कुल कार्य:

$$W = \int_0^I L\,i\,di = L\,[i^2/2]_0^I = \tfrac{1}{2}\,L\,I^2$$

यही कार्य प्रेरक में चुंबकीय स्थितिज ऊर्जा के रूप में संचित होता है:

$$U = \tfrac{1}{2}\,L\,I^2$$

प्रश्न 15: गतिक विद्युत वाहक बल (*Motional EMF*) से क्या तात्पर्य है? इसका सूत्र लिखिए। 3 अंक

उत्तर:

जब किसी चालक छड़ को एकसमान चुंबकीय क्षेत्र में गति कराई जाती है, तो चालक के सिरों के मध्य चुंबकीय बल के कारण एक विभवांतर उत्पन्न हो जाता है। गति के कारण उत्पन्न इस *EMF* को **गतिक विद्युत वाहक बल** कहते हैं।

सूत्र *derivation:* चालक इलेक्ट्रॉन पर लॉरेंट्ज़ बल $F_m = q\,v\,B$। साम्यावस्था में वैद्युत बल $F_e = q\,E = q\,(e/l)$।

अतः $q\,(e/l) = q\,v\,B \Rightarrow e = B\,v\,l$

[दीर्घ उत्तरीय प्रश्न - 4 व 5 अंक]

प्रश्न 16: लंबी परिनालिका (*Solenoid*) के स्वप्रेरकत्व के लिए व्यंजक व्युत्पन्न कीजिए। 4 अंक

उत्तर:

माना एक परिनालिका की लंबाई l, अनुप्रस्थ काट का क्षेत्रफल A, कुल फेरों की संख्या N तथा प्रवाहित धारा I है।

1. परिनालिका के अंदर चुंबकीय क्षेत्र:

$$B = \mu_0 n I = \mu_0 (N / l) I$$

2. प्रत्येक फेरे से बद्ध चुंबकीय फ्लक्स:

$$\Phi = B \cdot A = [\mu_0 (N / l) I] A$$

3. कुल फ्लक्स सम्बद्धता (*Flux Linkage*):

$$N \Phi = N [\mu_0 (N / l) I A] = (\mu_0 N^2 A I) / l$$

4. परिभाषा $N\Phi = L I$ से:

$$L I = (\mu_0 N^2 A I) / l$$

$$L = (\mu_0 \mu_r N^2 A) / l \quad \text{Henry}$$

निर्भरता: (*i*) N बढ़ाने पर L बढ़ता है, (*ii*) क्षेत्रफल A बढ़ाने पर L बढ़ता है, (*iii*) क्रोड में मु-मेटल या नर्म लोहा रखने पर प्रेरण कई गुना बढ़ जाता है।

प्रश्न 17: दो समअक्षीय (*Co-axial*) लंबी परिनालिकाओं के मध्य अन्योन्य प्रेरकत्व (M) का व्यंजक स्थापित कीजिए। 5 अंक

उत्तर:

माना दो लंबी परिनालिकाएं S_1 और S_2 हैं जिनकी लंबाई l समान है। प्राथमिक परिनालिका S_1 की त्रिज्या r_1, फेरे N_1 तथा द्वितीयक S_2 की त्रिज्या r_2, फेरे N_2 हैं। (माना S_1 के अंदर S_2 है, $A = \pi r_1^2$)।

चरण 1: S_1 में I_1 धारा बहाने पर चुंबकीय क्षेत्र:

$$B_1 = \mu_0 (N_1 / l) I_1$$

चरण 2: S_2 के प्रत्येक फेरे से बद्ध फ्लक्स:

$$\Phi_2 = B_1 A = [\mu_0 (N_1 / l) I_1] A$$

चरण 3: S_2 का कुल फ्लक्स *linkage:*

$$N_2 \Phi_2 = N_2 [\mu_0 (N_1 / l) I_1 A] = (\mu_0 N_1 N_2 A I_1) / l$$

चरण 4: परिभाषा $N_2 \Phi_2 = M I_1$ से तुलना करने पर:

$$M = (\mu_0 \mu_r N_1 N_2 A) / l \quad \text{Henry}$$

प्रश्न 18: एसी जनरेटर (*AC Generator* / प्रत्यावर्ती धारा डायनेमो) का सिद्धान्त, संरचना एवं कार्यविधि चित्र सहित समझाइए। 5 अंक

उत्तर:

सिद्धान्त: यह वैद्युत चुंबकीय प्रेरण के सिद्धांत पर आधारित है। जब किसी बंद कुंडली को चुंबकीय क्षेत्र में घुमाया जाता है, तो फ्लक्स में लगातार परिवर्तन के कारण कुंडली में प्रत्यावर्ती *EMF* उत्पन्न होता है।

मुख्य भाग:

1. **क्षेत्र चुम्बक (*Field Magnet*):** शक्तिशाली *N-S* ध्रुव।
2. **आर्मेचर (*Armature*):** नर्म लोहे के क्रोड पर तांबे के पृथक्कीकृत तारों की कुंडली (*ABCD*)।
3. **सर्पी वलय (*Slip Rings*):** धातु के दो छल्ले R_1 व R_2।
4. **कार्बन ब्रुश (*Carbon Brushes*):** B_1 व B_2 जो बाहरी परिपथ को धारा देते हैं।

कार्यविधि एवं व्यंजक: माना कुंडली में N फेरे हैं तथा वह w कोणीय वेग से घूम रही है। किसी क्षण t पर फ्लक्स $\Phi = B\,A\cos(\omega t)$।

फैराडे के नियमानुसार प्रेरित *EMF*: $e = -N\,(d\Phi/dt) = -N\,d/dt\,[B\,A\cos(\omega t)]$

$e = N B A w \sin(wt) = e_0 \sin(wt)$ (**जहाँ** $e_0 = N B A w$ **शिखर मान है**)

7. महत्वपूर्ण संख्यात्मक प्रश्न (*Numericals with Solutions*)

संख्यात्मक 1: किसी कुंडली से बद्ध चुंबकीय फ्लक्स $\Phi = (5t^3 + 4t^2 + 2t + 5)$ Wb है। $t = 2$ सेकंड पर प्रेरित विद्युत वाहक बल ज्ञात कीजिए। 3 अंक

हल:

दिया है: $\Phi = 5t^3 + 4t^2 + 2t + 5$

अवकलन (Differentiation) करने पर:

$d\Phi/dt = d/dt\,(5t^3 + 4t^2 + 2t + 5) = 15t^2 + 8t + 2$

$t = 2$ सेकंड रखने पर:

$d\Phi/dt = 15(2)^2 + 8(2) + 2 = 15(4) + 16 + 2 = 60 + 16 + 2 = 78$ Wb/s

अतः प्रेरित EMF, $|e| = d\Phi/dt = 78$ Volt। **(उत्तर: -78 V)**

संख्यात्मक 2: 100 फेरों वाली कुंडली से बद्ध फ्लक्स 0.1 सेकंड में 0.5 वेबर से घटकर 0.1 वेबर हो जाता है। प्रेरित EMF की गणना कीजिए। 3 अंक

हल:

दिया है: $N = 100$, $\Delta t = 0.1$ s, $\Phi_1 = 0.5$ Wb, $\Phi_2 = 0.1$ Wb

फ्लक्स में परिवर्तन $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = 0.1 - 0.5 = -0.4$ Wb

सूत्र: $e = -N\,(\Delta\Phi / \Delta t)$

$e = -100 \times (-0.4 / 0.1) = -100 \times (-4) = +400$ Volt

उत्तर: प्रेरित EMF = 400 Volt

संख्यात्मक 3: 5 H स्वप्रेरकत्व वाली कुंडली में धारा 0.05 सेकंड में 12 A से घटकर 7 A हो जाती है। प्रेरित EMF ज्ञात कीजिए। 3 अंक

हल:

दिया है: $L = 5\ H, \Delta t = 0.05\ s, \Delta I = I_2 - I_1 = 7 - 12 = -5\ A$

सूत्र: $e = - L (\Delta I / \Delta t)$

$e = - 5 \times (-5 / 0.05) = - 5 \times (-100) = 500$ Volt

उत्तर: 500 $Volt$

संख्यात्मक 4: 1 मीटर लंबी धातु की छड़ 2 T के चुंबकीय क्षेत्र के लंबवत 5 m/s के वेग से गतिमान है। छड़ में प्रेरित विभवांतर ज्ञात कीजिए। 3 अंक

हल:

दिया है: $l = 1\ m, B = 2\ T, v = 5\ m/s, \theta = 90°$

सूत्र: $e = B v l \sin(90°) = 2 \times 5 \times 1 \times 1 = 10$ Volt

उत्तर: 10 $Volt$

8. अन्य महत्वपूर्ण 1-अंक वाले वस्तुनिष्ठ प्रश्न ($MCQs$)

प्रश्न 19: प्रेरित धारा की दिशा ज्ञात की जाती है -

(a) फ्लेमिंग के बाएं हाथ के नियम से (*b*) लेंज के नियम से (*c*) एम्पियर के नियम से (*d*) बायो-सेवट नियम से

उत्तर: *(b)* लेंज के नियम से

प्रश्न 20: प्रेरकत्व का मात्रक है -

(a) Ohm-second (b) Volt/Ampere (c) Henry (d) Weber

उत्तर: *(c) Henry*

प्रश्न 21: चुंबकीय फ्लक्स का विमीय सूत्र है -

(a) $[ML^2T^{-2}A^{-1}]$ *(b)* $[MLT^{-2}A^{-1}]$ *(c)* $[ML^2T^{-1}A^{-2}]$ *(d)* $[M^0L^2T^{-2}A^{-1}]$

उत्तर: *(a)* $[ML^2T^{-2}A^{-1}]$

प्रश्न 22: दो कुंडलियों के बीच अन्योन्य प्रेरकत्व अधिकतम कब होता है?

(a) जब वे एक दूसरे के लंबवत हों (*b*) जब वे एक ही अक्ष पर समानांतर हों (*c*) 45° कोण पर हों

उत्तर: *(b)* जब वे समानांतर / एक ही अक्ष पर हों *(K = 1)*

प्रश्न 23: भंवर धाराओं की खोज किसने की थी?

उत्तर: फोको *(Foucault)* ने।

प्रश्न 24: ट्रांसफॉर्मर की क्रोड पटलित (*Laminated*) क्यों बनाई जाती है?

उत्तर: भंवर धाराओं के कारण ऊर्जा हानि को कम करने के लिए।

प्रश्न 25: स्वप्रेरकत्व का मान बढ़ाने के लिए क्रोड में क्या प्रयोग किया जाता है?

उत्तर: नर्म लोहे की छड़ *(Soft iron rod)*।

9. पिछले वर्षों में पूछे गए प्रश्न (*PYQs - MP Board & NCERT*)

प्रश्न 26: डायनेमो (*Generator*) तथा विद्युत मोटर में मुख्य अंतर क्या है? *PYQ 2023*

उत्तर:

डायनेमो: यांत्रिक ऊर्जा को विद्युत ऊर्जा में बदलता है (वैद्युत चुंबकीय प्रेरण के सिद्धांत पर)।

विद्युत मोटर: विद्युत ऊर्जा को यांत्रिक ऊर्जा में बदलती है (धारावाही चालक पर चुंबकीय बल के सिद्धांत पर)।

प्रश्न 27: स्वप्रेरण को 'विद्युत का जड़त्व' क्यों कहते हैं? *PYQ 2022*

उत्तर:

जिस प्रकार यांत्रिकी में द्रव्यमान गति में किसी भी परिवर्तन का विरोध करता है (जड़त्व गुण), उसी प्रकार परिपथ में स्वप्रेरकत्व धारा के मान में वृद्धि या कमी (परिवर्तन) का विरोध करता है। इसलिए स्वप्रेरकत्व को विद्युत का जड़त्व कहा जाता है।

प्रश्न 28: जब किसी चुम्बक के उत्तरी ध्रुव को कुंडली के समीप लाया जाता है, तो कुंडली में धारा की दिशा क्या होगी? *PYQ 2020*

उत्तर:

लेंज के नियमानुसार, पास आने का विरोध करने के लिए सम्मुख तल पर भी *N*-ध्रुव बनेगा। अतः कुंडली में धारा की दिशा **वामावर्त (*Anti-clockwise*)** होगी।

प्रश्न 29: भंवर धाराओं के दो व्यावहारिक अनुप्रयोग लिखिए। *PYQ 2019*

उत्तर:

1. **रुद्ध-मंद धारामापी (*Dead-beat Galvanometer*) बनाने में:** तांबे के फ्रेम में भंवर धाराएं उत्पन्न करके सुई के कंपन को तुरंत रोक दिया जाता है।
2. **विद्युत ट्रेनों में प्रेरण ब्रेक (*Electromagnetic Brakes*):** बिना किसी घर्षण के गाड़ी को रोकने में।

प्रश्न 30: 20 mH प्रेरकत्व वाली कुंडली में धारा 0.1 सेकंड में 0 से बदलकर 2 A हो जाती है। प्रेरित EMF ज्ञात कीजिए। PYQ 2024

उत्तर:

$L = 20\ mH = 20 \times 10^{-3}\ H,\ \Delta t = 0.1\ s,\ \Delta I = 2 - 0 = 2\ A$

$|e| = L\ (\Delta I / \Delta t) = (20 \times 10^{-3} \times 2) / 0.1 = 0.4\ Volt$

उत्तर: 0.4 $Volt$

10. Quick Revision Notes (अंतिम समय में दोहराने हेतु)

- $\Phi = B\ A\ \cos\theta$ (मात्रक: $Weber$, $Dimension: M^1 L^2 T^{-2} A^{-1}$)
- $e = -N(d\Phi/dt)$ (फैराडे का नियम)
- **लेंज का नियम:** ऊर्जा संरक्षण पर आधारित है।
- **गतिक** EMF: $e = B\ v\ l$
- **स्वप्रेरकत्व:** परिनालिका का $L = (\mu_0 N^2 A) / l$
- **अन्योन्य प्रेरकत्व:** $M = (\mu_0 N_1 N_2 A) / l$
- **संचित ऊर्जा:** $U = ½\ L\ I^2$
- **भंवर धाराएं:** फोको द्वारा खोज; पटलित क्रोड से कम की जाती हैं।

अध्याय 7: प्रत्यावर्ती धारा (ALTERNATING CURRENT)

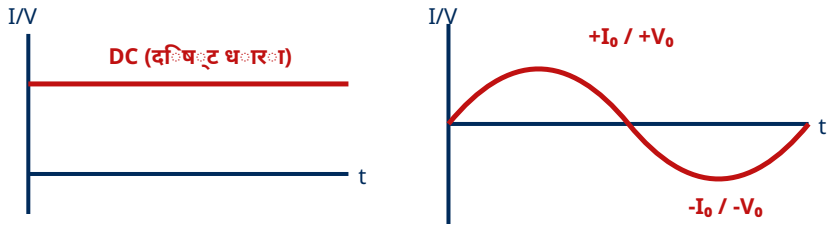
कक्षा 12 | MP Board + NCERT विषय: भौतिक विज्ञान (Physics)
📝 100% संपूर्ण हस्तलिखित मास्टर नोट्स (बोर्ड परीक्षा विशेष)

1. अध्याय का संक्षिप्त परिचय (Chapter Overview)

दिष्ट धारा (Direct Current - DC): वह धारा जिसका परिमाण और दिशा समय के साथ परिवर्तित नहीं होती, उसे दिष्ट धारा कहते हैं (जैसे- सेल या बैटरी से प्राप्त धारा)।

प्रत्यावर्ती धारा (Alternating Current - AC): वह धारा जिसका परिमाण समय के साथ लगातार बदलता है तथा दिशा एक निश्चित समय अंतराल (आवर्तकाल) के बाद आवर्ती रूप से (Periodically) उत्क्रमित (Reverse) होती रहती है, उसे प्रत्यावर्ती धारा कहते हैं।

भारत में व्यावसायिक तथा घरेलु उपयोग के लिए आपूर्ति की जाने वाली प्रत्यावर्ती धारा की आवृत्ति **50 Hz** तथा इसका प्रभावी (RMS) वोल्टेज **220 V** होता है।



चित्र 1.1: दिष्ट धारा (DC) तथा प्रत्यावर्ती धारा (AC) की तरंग रूप तुलना

2. सभी महत्वपूर्ण परिभाषाएँ (Important Definitions)

1. **तात्क्षणिक मान (Instantaneous Value):** किसी भी क्षण t पर प्रत्यावर्ती धारा या वोल्टेज के मान को उसका तात्क्षणिक मान कहते हैं। इसे $I = I_0 \sin(\omega t)$ अथवा $V = V_0 \sin(\omega t)$ से व्यक्त करते हैं।
2. **शिखर मान / आयाम (Peak Value / Amplitude - I_0 या V_0):** प्रत्यावर्ती धारा या विभवांतर के किसी भी एक दिशा में अधिकतम मान को उसका शिखर मान कहते हैं।
3. **आवर्तकाल (Time Period - T):** प्रत्यावर्ती धारा द्वारा एक पूरा चक्र (Cycle) पूरा करने में लिए गए समय को आवर्तकाल कहते हैं। $T = rac{2\pi}{\omega} = rac{1}{f}$।
4. **आवृत्ति (Frequency - f):** प्रत्यावर्ती धारा प्रति सेकंड जितने चक्र पूरे करती है, उसे उसकी आवृत्ति कहते हैं। इसका SI मात्रक हर्ट्ज़ (Hz) या s^{-1} है।
5. **वर्ग-माध्य-मूल मान (Root Mean Square Value - I_{rms} / V_{rms}):** किसी परिपथ में एक निश्चित समय में AC द्वारा उत्पन्न ऊष्मा के बराबर ऊष्मा उत्पन्न करने वाली स्थिर DC धारा के मान को AC का वर्ग-माध्य-

मूल मान (I_{rms}) कहते हैं। इसे **प्रभावी मान (Effective Value)** या **आभासी मान (Virtual Value)** भी कहते हैं।

6. **प्रेरण प्रतिघात (Inductive Reactance - X_L):** केवल प्रेरकत्व (L) युक्त AC परिपथ में प्रेरक कुण्डली द्वारा धारा के प्रवाह में डाले गए अवरोध को प्रेरण प्रतिघात कहते हैं। ($X_L = \omega L = 2\pi f L$)।
7. **धारितीय प्रतिघात (Capacitive Reactance - X_C):** केवल संधारित्र (C) युक्त AC परिपथ में संधारित्र द्वारा धारा के प्रवाह में डाले गए अवरोध को धारितीय प्रतिघात कहते हैं। ($X_C = rac{1}{\omega C} = rac{1}{2\pi f C}$)।
8. **प्रतिबाधा (Impedance - Z):** ऐसे AC परिपथ जिसमें प्रतिरोध (R), प्रेरकत्व (L) और धारिता (C) में से दो या दो से अधिक अवयव जुड़े हों, उसमें कुल उत्पन्न अवरोध को परिपथ की प्रतिबाधा (Z) कहते हैं। इसका मात्रक ओम (Ω) है।
9. **अनुनादी परिपथ (Resonant Circuit):** जिस परिपथ में $X_L = X_C$ हो जाए, उसकी प्रतिबाधा न्यूनतम ($Z = R$) हो जाती है और धारा का मान अधिकतम हो जाता है। इस अवस्था को विद्युत अनुनाद कहते हैं।
10. **वाटहीन धारा (Wattless Current):** यदि किसी AC परिपथ में केवल शुद्ध L या शुद्ध C जुड़ा हो और प्रतिरोध $R = 0$ हो, तो परिपथ में धारा बहने पर भी औसत शक्ति व्यय शून्य ($P = 0$) होता है। इस धारा को वाटहीन धारा कहते हैं।
11. **शक्ति गुणांक (Power Factor - $\cos\phi$):** परिपथ के वास्तविक शक्ति व्यय और आभासी शक्ति व्यय के अनुपात को शक्ति गुणांक कहते हैं। $\cos\phi = rac{R}{Z}$।
12. **गुणवत्ता गुणांक (Q-Factor):** अनुनाद के समय प्रेरकत्व या संधारित्र के सिरों पर विभवांतर तथा परिपथ के कुल आरोपित विभवांतर के अनुपात को Q-गुणांक कहते हैं। $Q = rac{1}{R}\sqrt{ rac{L}{C}}$।

3. मास्टर सूत्र पेटिका (Master Formula Box)

📐 **अध्याय 7: सभी मुख्य गणितीय सूत्र**

1. RMS एवं शिखर मान संबंध:	$I_{rms} = rac{I_0}{\sqrt{2}} pprox 0.707 \, I_0$	$V_{rms} = rac{V_0}{\sqrt{2}} pprox 0.707 \, V_0$
2. अर्ध चक्र का औसत मान:	$I_{avg} = rac{2I_0}{\pi} pprox 0.637 \, I_0$	(पूर्ण चक्र के लिए $I_{avg} = 0$)
3. प्रेरण प्रतिघात (X_L):	$X_L = \omega L = 2\pi f L$	(DC के लिए $f=0 \implies X_L = 0$)
4. धारितीय प्रतिघात (X_C):	$X_C = rac{1}{\omega C} = rac{1}{2\pi f C}$	(DC के लिए $f=0 \implies X_C = \infty$)
5. LCR परिपथ प्रतिबाधा (Z):	$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$	$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - rac{1}{\omega C} ight)^2}$
6. कला कोण (ϕ):	$ an\phi = rac{X_L - X_C}{R}$	$\cos\phi = rac{R}{Z}$ (शक्ति गुणांक)
7. अनुनादी आवृत्ति (f_r):	$f_r = rac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$	$\omega_r = rac{1}{\sqrt{LC}}$
8. औसत शक्ति व्यय (P_{avg}):	$P_{avg} = V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos\phi$	$P_{avg} = I_{rms}^2 R$
9. ट्रांसफॉर्मर अनुपात (K):	$K = rac{N_s}{N_p} = rac{V_s}{V_p} = rac{I_p}{I_s}$	दक्षता $\eta = rac{P_{out}}{P_{in}} imes 100\%$

4. मुख्य सिद्धांत एवं व्यंजक (Key Concepts & Derivations)

4.1 वर्ग-माध्य-मूल मान (RMS Value) का निगमन

मान लो प्रत्यावर्ती धारा का तात्क्षणिक मान $I = I_0 \sin(\omega t)$ है।
एक पूर्ण चक्र (0 से T) में धारा के वर्ग का औसत मान $\overline{I^2}$ निम्न प्रकार होगा:

$$\overline{I^2} = rac{1}{T} \int_{0}^{T} I^2 dt = rac{1}{T} \int_{0}^{T} I_0^2 \sin^2(\omega t) dt = rac{I_0^2}{T} \int_{0}^{T} \left(rac{1 - \cos 2\omega t}{2} ight) dt$$

चूँकि एक पूर्ण चक्र के लिए $\int_{0}^{T} \cos 2\omega t \, dt = 0$, अतः:

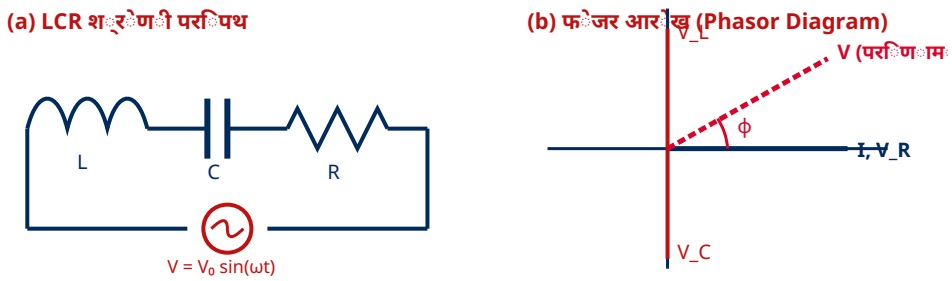
$\overline{I^2} = rac{I_0^2}{2T} [t]_0^T = rac{I_0^2}{2T} imes T = rac{I_0^2}{2}$

दोनों ओर वर्गमूल लेने पर:

$I_{rms} = \sqrt{\overline{I^2}} = \sqrt{ rac{I_0^2}{2}} = rac{I_0}{\sqrt{2}} pprox 0.707 \, I_0$

4.2 विभिन्न प्रकार के AC परिपथों की तुलना

क्र.	परिपथ का प्रकार	विभवांतर एवं धारा का समीकरण	कला संबंध (Phase)	प्रतिबाधा / प्रतिघात (Z)	शक्ति गुणांक ($\cos\phi$)
1	**शुद्ध प्रतिरोध (R)**	$V = V_0 \sin\omega t$ $I = I_0 \sin\omega t$	समान कला में ($\phi = 0^\circ$)	$Z = R$	$\cos 0^\circ = 1$ (अधिकतम)
2	**शुद्ध प्रेरकत्व (L)**	$V = V_0 \sin\omega t$ $I = I_0 \sin(\omega t - rac{\pi}{2})$	विभवांतर, धारा से 90° आगे	$Z = X_L = \omega L$	$\cos 90^\circ = 0$ (वाटहीन)
3	**शुद्ध धारिता (C)**	$V = V_0 \sin\omega t$ $I = I_0 \sin(\omega t + rac{\pi}{2})$	धारा, विभवांतर से 90° आगे	$Z = X_C = rac{1}{\omega C}$	$\cos 90^\circ = 0$ (वाटहीन)
4	**LCR श्रेणी परिपथ**	$V = V_0 \sin\omega t$ $I = I_0 \sin(\omega t \mp \phi)$	$ an\phi = rac{X_L - X_C}{R}$	$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$	$\cos\phi = rac{R}{Z}$



चित्र 4.1: LCR श्रेणी परिपथ तथा इसका फेजर आरेख (Phasor Diagram)

4.3 LCR परिपथ की प्रतिबाधा तथा अनुनादी आवृत्ति का व्यंजक

फेजर आरेख से परिणामी विभवांतर V:

$$V^2 = V_R^2 + (V_L - V_C)^2$$

चूँकि $V_R = I R$, $V_L = I X_L$ तथा $V_C = I X_C$:

$$V^2 = (I R)^2 + (I X_L - I X_C)^2 = I^2 [R^2 + (X_L - X_C)^2]$$

$$V = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \implies Z = \frac{V}{I} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

अनुनाद की स्थिति (At Resonance): जब $X_L = X_C$ हो:

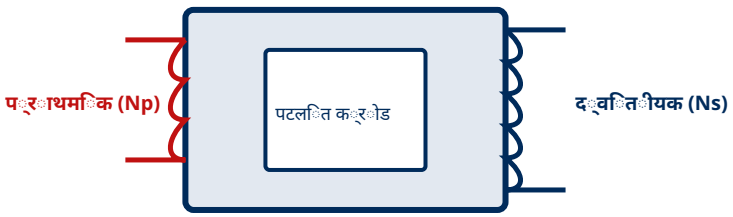
$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \implies \omega^2 = \frac{1}{LC} \implies \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$2\pi f_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \implies \mathbf{f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}}$$

4.4 ट्रांसफॉर्मर (Transformer) का विस्तृत विवरण

सिद्धांत: ट्रांसफॉर्मर **अन्योण्य प्रेरण (Mutual Induction)** के सिद्धांत पर आधारित एक ऐसी युक्ति है जो प्रत्यावर्ती वोल्टेज को परिवर्तित (बढ़ा या घटा) करती है। यह DC पर कार्य नहीं करता।

- **ऊँचाई ट्रांसफॉर्मर (Step-up Transformer):** निम्न AC वोल्टेज को उच्च AC वोल्टेज में बदलता है। ($N_s > N_p$, $K > 1$)।
- **अपचायी ट्रांसफॉर्मर (Step-down Transformer):** उच्च AC वोल्टेज को निम्न AC वोल्टेज में बदलता है। ($N_s < N_p$, $K < 1$)।



चित्र 4.2: ट्रांसफॉर्मर की सांकेतिक संरचना (Laminated Core)

ट्रांसफॉर्मर में ऊर्जा हानियाँ एवं उन्हें कम करने के उपाय:

1. **ताम्र हानि (Copper Loss):** प्राथमिक व द्वितीयक कुण्डलियों के तांबे के तारों के प्रतिरोध के कारण $I^2 R$ ऊष्मा के रूप में ऊर्जा क्षय।
   उपचार: तांबे के मोटे तारों का उपयोग किया जाता है।
2. **भंवर धारा हानि (Eddy Current Loss):** लोहे की क्रोड में भंवर धाराएँ उत्पन्न होने से ऊष्मा के रूप में हानि।
   उपचार: क्रोड को एक दूसरे से पृथक्कित (Laminated) पट्टियों के रूप में पटलित बनाया जाता है।
3. **शैथिल्य हानि (Hysteresis Loss):** क्रोड के बार-बार चुंबकित और विचुंबकित होने में ऊर्जा क्षय।
   उपचार: कम शैथिल्य लूप वाले नरम लोहे (Soft Iron) की क्रोड का उपयोग किया जाता है।

4. **फ्लक्स क्षरण (Flux Leakage):** प्राथमिक का संपूर्ण चुंबकीय फ्लक्स द्वितीयक से न जुड़ पाना।
उपचार: प्राथमिक व द्वितीयक कुण्डलियों को एक-दूसरे के ऊपर लपेटा जाता है।

5. बोर्ड परीक्षा हेतु 30 अत्यंत महत्वपूर्ण प्रश्न एवं आदर्श उत्तर

भाग A: 2 अंक वाले अति लघु उत्तरीय प्रश्न (प्रश्न 1 से 10)

प्र. 1. प्रत्यावर्ती धारा का औसत मान पूर्ण चक्र के लिए कितना होता है और क्यों? 2 अंक

उत्तर: प्रत्यावर्ती धारा का पूर्ण चक्र के लिए औसत मान **शून्य (0)** होता है। इसका कारण यह है कि जितने परिमाण में धारा प्रथम अर्ध-चक्र में धनात्मक दिशा में बहती है, उतने ही परिमाण में द्वितीय अर्ध-चक्र में ऋणात्मक दिशा में बहती है।

प्र. 2. AC एमीटर तथा AC वोल्टमीटर धारा के किस प्रभाव पर आधारित होते हैं? 2 अंक

उत्तर: AC मापक यंत्र धारा के **ऊष्मीय प्रभाव (Thermal Effect)** पर आधारित होते हैं, क्योंकि प्रत्यावर्ती धारा का चुंबकीय प्रभाव औसत रूप से शून्य होता है। ये यंत्र धारा का **RMS मान** मापते हैं।

प्र. 3. 220 V AC और 220 V DC में से कौन सा अधिक खतरनाक है और क्यों? 2 अंक

उत्तर: 220 V AC अधिक खतरनाक है। 220 V AC का अर्थ इसका $V_{rms} = 220 ext{ V}$ है, जिसका शिखर मान $V_0 = \sqrt{2} imes 220 pprox 311 ext{ V}$ तक पहुँचता है, जबकि 220 V DC का मान स्थिर 220 V ही रहता है।

प्र. 4. संधारित्र DC को रोकता है परंतु AC को जाने देता है, क्यों? 2 अंक

उत्तर: धारितीय प्रतिघात $X_C = rac{1}{2\pi f C}$ होता है। DC के लिए आवृत्ति $f = 0$ होती है, जिससे $X_C = \infty$ (अनंत) हो जाता है। अतः संधारित्र DC के लिए अनंत अवरोध डालता है। AC के लिए $f > 0$ होने से X_C का मान सीमित होता है, इसलिए AC प्रवाहित हो जाती है।

प्र. 5. चोक कुण्डली क्या है? इसका क्या कार्य है? 2 अंक

उत्तर: चोक कुण्डली उच्च प्रेरकत्व (L) तथा नगण्य प्रतिरोध ($R pprox 0$) वाली एक कुण्डली है। इसका उपयोग AC परिपथों में बिना शक्ति का अपव्यय किए धारा के परिमाण को नियंत्रित करने में किया जाता है।

प्र. 6. वाटहीन धारा से आप क्या समझते हैं? 2 अंक

उत्तर: यदि किसी AC परिपथ में केवल शुद्ध L या शुद्ध C हो तथा परिपथ का प्रतिरोध शून्य हो, तो विभवांतर और धारा के मध्य कलांतर $\phi = 90^\circ$ होता है। परिपथ में औसत शक्ति व्यय $P = V_{rms} I_{rms} \cos 90^\circ = 0$ होता है। ऐसी धारा को वाटहीन धारा कहते हैं।

प्र. 7. ट्रांसफॉर्मर किस सिद्धांत पर कार्य करता है? क्या यह DC पर कार्य करेगा? 2 अंक

उत्तर: ट्रांसफॉर्मर **अन्योण्य प्रेरण (Mutual Induction)** के सिद्धांत पर कार्य करता है। यह **DC पर कार्य नहीं करता** क्योंकि DC के कारण फ्लक्स में परिवर्तन ($d\Phi/dt = 0$) नहीं होता, जिससे प्रेरित emf उत्पन्न नहीं होता।

प्र. 8. किसी परिपथ में शक्ति गुणांक का अधिकतम व न्यूनतम मान कितना हो सकता है? 2 अंक

उत्तर: शक्ति गुणांक $\cos\phi$ का अधिकतम मान **1** (शुद्ध प्रतिरोधी परिपथ के लिए) तथा न्यूनतम मान **0** (शुद्ध प्रेरकत्व या शुद्ध धारिता वाले परिपथ के लिए) हो सकता है।

प्र. 9. नागरिक विद्युत आपूर्ति 220 V, 50 Hz लिखी होती है। इसका क्या अर्थ है? 2 अंक

उत्तर: इसका अर्थ है कि आपूर्ति का वर्ग-माध्य-मूल वोल्टेज $V_{rms} = 220 ext{ V}$ है तथा धारा की आवृत्ति $f = 50 ext{ Hz}$ है (अर्थात धारा 1 सेकंड में 100 बार अपनी दिशा बदलती है)।

प्र. 10. गुणवत्ता गुणांक (Q-Factor) की परिभाषा तथा सूत्र लिखिए। 2 अंक

उत्तर: अनुनाद पर प्रेरकत्व या संधारित्र के सिरों पर विभवांतर तथा परिपथ के कुल आरोपित विभवांतर के अनुपात को Q-गुणनांक कहते हैं। सूत्र: $Q = rac{\omega_r L}{R} = rac{1}{R}\sqrt{ rac{L}{C}}$।

भाग B: 3 अंक वाले लघु उत्तरीय प्रश्न (प्रश्न 11 से 18)

प्र. 11. सिद्ध कीजिए कि शुद्ध प्रेरकत्व युक्त परिपथ में विभवांतर, धारा से 90° कला में आगे होता है। 3 अंक

उत्तर: मान लो शुद्ध L वाले परिपथ में AC विभवांतर $V = V_0 \sin\omega t$ है।
प्रेरित स्वप्रेरकत्व emf $e = -L rac{dI}{dt}$ होगा। परिपथ में कुल विभवांतर $V - L rac{dI}{dt} = 0 \implies V_0 \sin\omega t = L rac{dI}{dt}$।
$dI = rac{V_0}{L} \sin\omega t \, dt$
दोनों ओर समाकलन करने पर: $I = \int rac{V_0}{L} \sin\omega t \, dt = - rac{V_0}{\omega L} \cos\omega t = rac{V_0}{X_L} \sin\left(\omega t - rac{\pi}{2} ight)$
$\implies I = I_0 \sin\left(\omega t - rac{\pi}{2} ight)$ (जहाँ $I_0 = rac{V_0}{X_L}$)।
अतः शुद्ध प्रेरकत्व परिपथ में विभवांतर, धारा से $ rac{\pi}{2}$ rad (90°) आगे रहता है।

प्र. 12. सिद्ध कीजिए कि शुद्ध संधारित्र युक्त परिपथ में धारा, विभवांतर से 90° कला में आगे होती है। 3 अंक

उत्तर: मान लो शुद्ध C परिपथ पर विभवांतर $V = V_0 \sin\omega t$ आरोपित है।
किसी क्षण संधारित्र पर आवेश $q = C V = C V_0 \sin\omega t$।
धारा $I = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(C V_0 \sin\omega t) = C V_0 \omega \cos\omega t = \frac{V_0}{1/\omega C} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$
$\implies I = I_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$ (जहाँ $I_0 = \frac{V_0}{X_C}$)।
अतः शुद्ध संधारित्र परिपथ में धारा, विभवांतर से $\frac{\pi}{2}$ rad (90°) आगे होती है।

प्र. 13. AC परिपथ में औसत शक्ति व्यय का व्यंजक $P = V_{rms} I_{rms} \cos\phi$ व्युत्पन्न कीजिए। 3 अंक

उत्तर: माना तात्क्षणिक विभवांतर $V = V_0 \sin\omega t$ तथा धारा $I = I_0 \sin(\omega t - \phi)$ है।
तात्क्षणिक शक्ति $P_{inst} = V \cdot I = V_0 I_0 \sin\omega t \sin(\omega t - \phi)$
$P_{inst} = \frac{V_0 I_0}{2} [\cos\phi - \cos(2\omega t - \phi)]$
एक पूर्ण चक्र में $\cos(2\omega t - \phi)$ का औसत मान शून्य होता है।
अतः औसत शक्ति $P_{avg} = \frac{V_0 I_0}{2} \cos\phi = \left(\frac{V_0}{\sqrt{2}} \right) \left(\frac{I_0}{\sqrt{2}} \right) \cos\phi = \mathbf{V_{rms} I_{rms} \cos\phi}$।

प्र. 14. चोक कुण्डली ट्यूबलाइट के श्रेणीक्रम में क्यों जोड़ी जाती है? इसे समतुल्य प्रतिरोधक की तुलना में प्राथमिकता क्यों दी जाती है? 3 अंक

उत्तर: चोक कुण्डली ट्यूबलाइट में धारा को सीमित करने के काम आती है। चोक कुण्डली का प्रतिरोध $R \approx 0$ तथा प्रेरकत्व L बहुत उच्च होता है, जिससे इसका शक्ति गुणांक $\cos\phi \approx 0$ होता है और इसमें शक्ति का व्यय नगण्य ($P \approx 0$) होता है। यदि इसके स्थान पर सामान्य प्रतिरोधक का उपयोग किया जाए, तो $I^2 R$ के रूप में बहुत अधिक विद्युत ऊर्जा ऊष्मा बनकर व्यर्थ नष्ट हो जाएगी।

प्र. 15. ऊँचाई (Step-up) तथा अपचायी (Step-down) ट्रांसफॉर्मर में अंतर स्पष्ट कीजिए। 3 अंक

गुण	ऊँचाई ट्रांसफॉर्मर (Step-up)	अपचायी ट्रांसफॉर्मर (Step-down)
वोल्टेज परिवर्तन	निम्न AC वोल्टेज को उच्च AC वोल्टेज में बदलता है।	उच्च AC वोल्टेज को निम्न AC वोल्टेज में बदलता है।
फेरों की संख्या	द्वितीयक में फेरे अधिक ($N_s > N_p$)	प्राथमिक में फेरे अधिक ($N_p > N_s$)
परिणमन अनुपात (K)	$K > 1$	$K < 1$
धारा मान	द्वितीयक में धारा घटती है ($I_s < I_p$)	द्वितीयक में धारा बढ़ती है ($I_s > I_p$)

प्र. 16. LCR श्रेणी परिपथ में विद्युत अनुनाद की स्थिति को समझाइए तथा अनुनादी आवृत्ति का सूत्र प्राप्त कीजिए। 3 अंक

उत्तर: जब LCR परिपथ में आरोपित AC की आवृत्ति इस प्रकार समायोजित की जाए कि प्रेरण प्रतिघात (X_L) तथा धारितीय प्रतिघात (X_C) बराबर हो जाएँ ($X_L = X_C$), तो परिपथ की प्रतिबाधा न्यूनतम ($Z = R$) तथा धारा अधिकतम हो जाती है। इसे विद्युत अनुनाद कहते हैं।

$X_L = X_C \implies \omega_r L = rac{1}{\omega_r C} \implies \omega_r^2 = rac{1}{LC} \implies f_r = rac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$।

प्र. 17. LC दोलन क्या हैं? इनकी अनुनादी आवृत्ति का व्यंजक लिखिए। 3 अंक

उत्तर: जब किसी आवेशित संधारित्र (C) को एक शुद्ध प्रेरकत्व (L) से जोड़ा जाता है, तो संधारित्र की वैद्युत ऊर्जा और प्रेरकत्व की चुंबकीय ऊर्जा का आपस में निरंतर रूपांतरण होता है। इससे परिपथ में नियत आवृत्ति की प्रत्यावर्ती धारा प्रवाहित होने लगती है, इसे LC दोलन कहते हैं। दोलन की स्वाभाविक आवृत्ति $f = rac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$ होती है।

प्र. 18. धारा के तात्क्षणिक मान $I = 10 \sin(314 t)$ के लिए ज्ञात कीजिए: (1) शिखर मान, (2) आवृत्ति, (3) $t = rac{1}{600} ext{ s}$ पर धारा का मान। 3 अंक

उत्तर: तुलना $I = I_0 \sin(\omega t)$ से करने पर:

(1) शिखर मान $I_0 = 10 ext{ A}$

(2) $\omega = 314 \implies 2\pi f = 314 \implies f = rac{314}{2 imes 3.14} = 50 ext{ Hz}$

(3) $t = rac{1}{600} ext{ s}$ पर $I = 10 \sin\left(314 imes rac{1}{600} ight) = 10 \sin\left(rac{100\pi}{600} ight) = 10 \sin\left(rac{\pi}{6} ight) = 10 imes 0.5 = 5 ext{ A}$।

भाग C: 4 एवं 5 अंक वाले दीर्घ उत्तरीय प्रश्न (प्रश्न 19 से 30)

प्र. 19. LCR श्रेणी परिपथ हेतु: (1) फेजर आरेख, (2) प्रतिबाधा का सूत्र, (3) परिणामी विभवांतर, (4) कलांतर का व्यंजक व्युत्पन्न कीजिए। 4 अंक

उत्तर: मान लो L, C और R श्रेणीक्रम में $V = V_0 \sin\omega t$ से जुड़े हैं।

(1) विभवांतर: $V_R = I R$ (धारा I की दिशा में), $V_L = I X_L$ (I से 90° आगे), $V_C = I X_C$ (I से 90° पीछे)।

(2) परिणामी विभवांतर V: $V^2 = V_R^2 + (V_L - V_C)^2 = (I R)^2 + (I X_L - I X_C)^2$ $\implies V = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$

(3) प्रतिबाधा $Z = rac{V}{I} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - rac{1}{\omega C} ight)^2}$

(4) कलांतर ϕ: $ an\phi = rac{V_L - V_C}{V_R} = rac{I X_L - I X_C}{I R} \implies an\phi = rac{X_L - X_C}{R}$।

प्र. 20. ट्रांसफॉर्मर का सिद्धांत, रचना, कार्यविधि, परिणमन अनुपात का सूत्र तथा इसमें ऊर्जा हानियों का वर्णन कीजिए। 5 अंक

उत्तर:

1. सिद्धांत: अन्योण्य प्रेरण पर आधारित। जब प्राथमिक में AC धारा बहती है, तो परिवर्तित चुंबकीय फ्लक्स के कारण द्वितीयक में प्रेरित emf उत्पन्न होता है।

2. रचना: नरम लोहे की पटलित क्रोड पर पृथक्कृत तांबे के तारों की प्राथमिक (N_p) तथा द्वितीयक (N_s) कुण्डलियां लपेटी जाती हैं।

3. कार्यविधि एवं सूत्र: फैराडे के नियमानुसार:

$e_p = -N_p rac{d\Phi}{dt}$ एवं $e_s = -N_s rac{d\Phi}{dt}$

भाग देने पर: $ rac{e_s}{e_p} = rac{N_s}{N_p} = K$ (परिणमन अनुपात)

आदर्श ट्रांसफॉर्मर के लिए इनपुट शक्ति = आउटपुट शक्ति $\implies V_p I_p = V_s I_s \implies rac{V_s}{V_p} = rac{I_p}{I_s} = K$।

4. हानियाँ: (i) ताम्र हानि, (ii) भंवर धारा हानि, (iii) शैथिल्य हानि, (iv) फ्लक्स क्षरण। (निवारण हेतु बिंदु 4.4 देखें)।

प्र. 21. एसी जनित्र (AC Generator / Dynamo) का सिद्धांत, नामांकित चित्र, रचना तथा कार्यविधि समझाइए। प्रेरित emf का व्यंजक प्राप्त कीजिए। 5 अंक

उत्तर:

1. सिद्धांत: विद्युत चुंबकीय प्रेरण के सिद्धांत पर कार्य करता है (जब किसी बंद कुण्डली को चुंबकीय क्षेत्र में घुमाया जाता है, तो उससे बद्ध चुंबकीय फ्लक्स में परिवर्तन होने से प्रेरित धारा उत्पन्न होती है)।

2. मुख्य भाग: (i) क्षेत्र चुंबक (N-S), (ii) आर्मेचर कुण्डली (ABCD), (iii) सर्पी वलय (Slip Rings S_1, S_2), (iv) कार्बन ब्रश (B_1, B_2)।

3. प्रेरित emf का व्यंजक: मान लो N फेरों तथा A क्षेत्रफल वाली कुण्डली B चुंबकीय क्षेत्र में ω कोणीय वेग से घूम रही है।

किसी क्षण t पर चुंबकीय फ्लक्स $\Phi = B A \cos(\omega t)$

फैराडे के नियम से प्रेरित emf: $e = -N rac{d\Phi}{dt} = -N rac{d}{dt}(B A \cos\omega t) = N A B \omega \sin\omega t$

$\implies$ **$e = e_0 \sin\omega t$** (जहाँ शिखर emf $e_0 = N A B \omega$)।

प्र. 22. सिद्ध कीजिए कि एक पूर्ण चक्र में शुद्ध संधारित्र युक्त AC परिपथ में औसतन कोई शक्ति व्यय नहीं होता। 4 अंक

उत्तर: मान लो विभवांतर $V = V_0 \sin\omega t$ है, तो धारा $I = I_0 \sin\left(\omega t + rac{\pi}{2} ight) = I_0 \cos\omega t$ होगी।

तात्क्षणिक शक्ति $P = V \cdot I = V_0 I_0 \sin\omega t \cos\omega t = rac{V_0 I_0}{2} \sin(2\omega t)$।

एक पूर्ण चक्र (0 से T) में औसत शक्ति:

$P_{avg} = rac{1}{T} \int_{0}^{T} P dt = rac{V_0 I_0}{2T} \int_{0}^{T} \sin(2\omega t) dt$

चूँकि $\int_{0}^{T} \sin(2\omega t) dt = \left[- rac{\cos 2\omega t}{2\omega} ight]_0^T = 0$।

अतः $P_{avg} = 0$ (इति सिद्धम)।

प्र. 23. सिद्ध कीजिए कि एक पूर्ण चक्र में शुद्ध प्रेरकत्व युक्त AC परिपथ में औसत शक्ति व्यय शून्य होता है। 4 अंक

उत्तर: मान लो $V = V_0 \sin\omega t$, तो शुद्ध L में धारा $I = I_0 \sin\left(\omega t - rac{\pi}{2} ight) = -I_0 \cos\omega t$ होगी।

तात्क्षणिक शक्ति $P = V \cdot I = -V_0 I_0 \sin\omega t \cos\omega t = - rac{V_0 I_0}{2} \sin(2\omega t)$।

एक पूर्ण चक्र में $\sin(2\omega t)$ का समाकलन शून्य होता है।

अतः $P_{avg} = 0$ (इति सिद्धम)।

प्र. 24. अनुनादी वक्र (Resonance Curve) किसे कहते हैं? Q-गुणवत्ता गुणांक का मान परिपथ के प्रतिरोध पर किस प्रकार निर्भर करता है? 4 अंक

उत्तर: LCR परिपथ में धारा I और आवृत्ति f के बीच खींचे गए वक्र को अनुनादी वक्र कहते हैं।

अनुनाद पर धारा $I_{max} = rac{V}{R}$ होती है। यदि प्रतिरोध R का मान कम हो, तो अनुनादी वक्र तीक्ष्ण (Sharp) होता है और Q-गुणनांक उच्च होता है। यदि R अधिक हो, तो वक्र चपटा (Flat) होता है और Q-गुणनांक कम होता है। ($Q \propto rac{1}{R}$)।

प्र. 25. प्रत्यावर्ती धारा एवं दिष्ट धारा में 5 मुख्य अंतर लिखिए। 5 अंक

क्र.	प्रत्यावर्ती धारा (AC)	दिष्ट धारा (DC)
1	परिमाण व दिशा समय के साथ आवर्ती रूप से बदलते हैं।	परिमाण व दिशा समय के साथ स्थिर रहते हैं।
2	ट्रांसफॉर्मर द्वारा वोल्टेज को बदला जा सकता है।	ट्रांसफॉर्मर द्वारा वोल्टेज नहीं बदला जा सकता।
3	ऊष्मीय प्रभाव पर आधारित यंत्रों द्वारा मापी जाती है।	चुंबकीय प्रभाव पर आधारित यंत्रों द्वारा मापी जाती है।
4	सुदूर स्थानों तक भेजने में ऊर्जा हानि बहुत कम होती है।	सुदूर स्थानों तक भेजने में अधिक ऊर्जा हानि होती है।
5	समान वोल्टेज पर यह DC से अधिक खतरनाक होती है।	समान वोल्टेज पर यह AC से कम खतरनाक होती है।

प्र. 26. एक LCR श्रेणी परिपथ में $R = 20\,\Omega$, $L = 1.5\, ext{H}$ तथा $C = 35\, \mu ext{F}$ है। इसे variable frequency के $200 ext{ V}$ AC से जोड़ा गया है। अनुनादी आवृत्ति तथा अनुनाद पर धारा का मान ज्ञात कीजिए। 4 अंक

उत्तर: दिया है: $R = 20\,\Omega$, $L = 1.5 ext{ H}$, $C = 35 imes 10^{-6} ext{ F}$, $V_{rms} = 200 ext{ V}$।

(1) अनुनादी कोणीय आवृत्ति $\omega_r = rac{1}{\sqrt{LC}} = rac{1}{\sqrt{1.5 imes 35 imes 10^{-6}}} = rac{1}{\sqrt{52.5 imes 10^{-6}}} pprox rac{1}{0.007246} pprox 138 ext{ rad/s}$।

अनुनादी आवृत्ति $f_r = rac{\omega_r}{2\pi} = rac{138}{2 imes 3.14} pprox 22 ext{ Hz}$।

(2) अनुनाद पर प्रतिबाधा $Z = R = 20\,\Omega$।

अनुनादी धारा $I_{rms} = rac{V_{rms}}{R} = rac{200}{20} = 10 ext{ A}$।

प्र. 27. दूरस्थ स्थानों तक विद्युत शक्ति का पारेषण (Transmission) उच्च वोल्टेज पर क्यों किया जाता है? गणितीय रूप से समझाइए। 4 अंक

उत्तर: मान लो P शक्ति को R प्रतिरोध वाले तारों द्वारा V वोल्टेज पर भेजा जा रहा है।

धारा $I = rac{P}{V}$। तारों में ऊष्मा के रूप में शक्ति क्षय $P_{loss} = I^2 R = \left(rac{P}{V} ight)^2 R = rac{P^2 R}{V^2}$।

अर्थात शक्ति क्षय $P_{loss} \propto rac{1}{V^2}$।

अतः पारेषण वोल्टेज V को 10 गुना बढ़ाने पर तारों में शक्ति क्षय 100 गुना कम हो जाता है। इसलिए दूरस्थ स्थानों तक बिजली उच्च वोल्टेज (जैसे 132 kV या 400 kV) पर भेजी जाती है।

प्र. 28. यदि $V = 100 \sin(100 t) ext{ V}$ तथा $I = 100 \sin\left(100 t + rac{\pi}{3} ight) ext{ mA}$ हो, तो ज्ञात कीजिए: (1) V_{rms}, (2) I_{rms}, (3) शक्ति गुणांक, (4) औसत शक्ति व्यय। 4 अंक

उत्तर: दिया है: $V_0 = 100 ext{ V}$, $I_0 = 100 ext{ mA} = 0.1 ext{ A}$, $\phi = rac{\pi}{3} = 60^\circ$।

(1) $V_{rms} = rac{V_0}{\sqrt{2}} = rac{100}{\sqrt{2}} = 50\sqrt{2} ext{ V} pprox 70.7 ext{ V}$।

(2) $I_{rms} = rac{I_0}{\sqrt{2}} = rac{0.1}{\sqrt{2}} ext{ A} pprox 0.0707 ext{ A}$।

(3) शक्ति गुणांक $\cos\phi = \cos 60^\circ = 0.5$।

(4) औसत शक्ति $P_{avg} = V_{rms} I_{rms} \cos\phi = \left(rac{100}{\sqrt{2}} ight) \left(rac{0.1}{\sqrt{2}} ight) (0.5) = rac{10}{2} imes 0.5 = 2.5 ext{ W}$।

प्र. 29. L-C-R परिपथ में किस स्थिति में शक्ति गुणांक का मान 1 होता है? 2 अंक

उत्तर: अनुनाद की स्थिति में ($X_L = X_C$), परिपथ की प्रतिबाधा $Z = R$ हो जाती है। शक्ति गुणांक $\cos\phi = rac{R}{Z} = rac{R}{R} = 1$ होता है।

प्र. 30. एक ट्रांसफॉर्मर की दक्षता 90% है। यह $200 ext{ V}$ व $3 ext{ kW}$ इनपुट पर कार्य कर रहा है। यदि द्वितीयक वोल्टेज $60 ext{ V}$ हो, तो द्वितीयक धारा का मान ज्ञात कीजिए। 4 अंक

उत्तर: दिया है: $\eta = 90\% = 0.9$, $P_{in} = 3 ext{ kW} = 3000 ext{ W}$, $V_s = 60 ext{ V}$।

दक्षता $\eta = rac{P_{out}}{P_{in}} \implies 0.9 = rac{P_{out}}{3000} \implies P_{out} = 2700 ext{ W}$।

आउटपुट शक्ति $P_{out} = V_s imes I_s \implies 2700 = 60 imes I_s \implies I_s = rac{2700}{60} = 45 ext{ A}$।

6. हल सहित महत्वपूर्ण संख्यात्मक प्रश्न (Numericals)

🔢 संख्यात्मक 1: LCR परिपथ में प्रतिबाधा एवं धारा गणना

प्रश्न: $100\,\Omega$ का प्रतिरोध, $0.5 ext{ H}$ का प्रेरकत्व तथा $10\,\mu ext{F}$ का संधारित्र श्रेणीक्रम में $230 ext{ V}, 50 ext{ Hz}$ के आपूर्ति स्रोत से जोड़े गए हैं। परिपथ की प्रतिबाधा तथा परिपथ में बहने वाली धारा ज्ञात कीजिए।

हल:
दिया है: $R = 100\,\Omega$, $L = 0.5 ext{ H}$, $C = 10 imes 10^{-6} ext{ F}$, $V_{rms} = 230 ext{ V}$, $f = 50 ext{ Hz}$।
1. $X_L = 2\pi f L = 2 imes 3.1416 imes 50 imes 0.5 = 157.08\,\Omega$
2. $X_C = rac{1}{2\pi f C} = rac{1}{2 imes 3.1416 imes 50 imes 10 imes 10^{-6}} = rac{10^6}{3141.6} pprox 318.31\,\Omega$
3. $|X_L - X_C| = |157.08 - 318.31| = 161.23\,\Omega$
4. $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{100^2 + (161.23)^2} = \sqrt{10000 + 25995} = \sqrt{35995} pprox 189.72\,\Omega$
5. $I_{rms} = rac{V_{rms}}{Z} = rac{230}{189.72} pprox **1.21 A**$

🔢 संख्यात्मक 2: ट्रांसफॉर्मर फेरों की संख्या व धारा

प्रश्न: एक अपचायी ट्रांसफॉर्मर 2200 V को 220 V में बदलता है। यदि प्राथमिक कुण्डली में 4000 फेरे हैं, तो द्वितीयक कुण्डली में फेरों की संख्या ज्ञात कीजिए। यदि प्राथमिक धारा 5 A हो तथा दक्षता 100% हो, तो द्वितीयक धारा भी ज्ञात कीजिए।

हल:
दिया है: $V_p = 2200 ext{ V}$, $V_s = 220 ext{ V}$, $N_p = 4000$, $I_p = 5 ext{ A}$।
1. सूत्र $ rac{V_s}{V_p} = rac{N_s}{N_p} \implies rac{220}{2200} = rac{N_s}{4000} \implies rac{1}{10} = rac{N_s}{4000} \implies N_s = **400 फेरे**$
2. 100% दक्षता हेतु $V_p I_p = V_s I_s \implies 2200 imes 5 = 220 imes I_s \implies I_s = rac{11000}{220} = **50 A**$

7. महत्वपूर्ण तथ्य, ट्रिक्स और याद रखने योग्य बिंदु

💡 **ट्रिक्स एवं मेमोरी की (Memory Keys)**

- **"CIVIL" ट्रिक:**
  - **C - I - V:** संधारित्र (**C**) में धारा (**I**), विभवांतर (**V**) से आगे रहती है।
  - **V - I - L:** प्रेरकत्व (**L**) में विभवांतर (**V**), धारा (**I**) से आगे रहता है।
- **DC हेतु याद रखें:** $f = 0 \implies X_L = 0$ (प्रेरकत्व DC को बिना रुकावट जाने देता है), $X_C = \infty$ (संधारित्र DC को पूर्णतः ब्लॉक कर देता है)।
- **अनुनाद की स्थिति में 3 मुख्य बातें:** (1) $X_L = X_C$, (2) $Z = R$ (प्रतिबाधा न्यूनतम), (3) धारा I अधिकतम।

8. Quick Revision Notes (अंतिम मिनट त्वरित पुनरावलोकन)

- $I_{rms} = 0.707 \, I_0$ | $V_{rms} = 0.707 \, V_0$
- $I_{avg} = 0.637 \, I_0$ (अर्ध चक्र हेतु) | पूर्ण चक्र का औसत $= 0$
- प्रेरण प्रतिघात $X_L = 2\pi f L$ (आवृत्ति के समानुपाती $X_L \propto f$)
- धारितीय प्रतिघात $X_C = \frac{1}{2\pi f C}$ (आवृत्ति के व्युत्क्रमानुपाती $X_C \propto \frac{1}{f}$)
- LCR प्रतिबाधा $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$
- अनुनादी आवृत्ति $f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$
- शक्ति गुणांक $\cos\phi = \frac{R}{Z}$ | औसत शक्ति $P = V_{rms} I_{rms} \cos\phi$
- वाटहीन धारा हेतु $\phi = 90^\circ \implies \cos\phi = 0 \implies P = 0$ (शुद्ध L या शुद्ध C में)
- ट्रांसफॉर्मर अन्योण्य प्रेरण पर कार्य करता है (केवल AC के लिए, DC के लिए निष्प्रभावी)।

9. विगत वर्षों के बोर्ड प्रश्न (PYQs) एवं आदर्श उत्तर

📌 **[MP Board 2023, 2020] प्रश्न:**

प्रश्न: चोक कुण्डली में प्रवाहित धारा को वाटहीन धारा क्यों कहते हैं?

उत्तर: चोक कुण्डली का स्वप्रेरकत्व L बहुत उच्च तथा प्रतिरोध $R \approx 0$ होता है। अतः इसमें विभवांतर एवं धारा के मध्य कलांतर $\phi = 90^\circ$ होता है। परिपथ में शक्ति व्यय $P = V_{rms} I_{rms} \cos 90^\circ = 0$ होता है। चूंकि बिना ऊर्जा क्षय के धारा प्रवाहित होती है, अतः इसे वाटहीन धारा कहते हैं।

📌 **[MP Board 2022, 2019] प्रश्न:**

प्रश्न: ट्रांसफॉर्मर की क्रोड पटलित (Laminated) क्यों बनाई जाती है?

उत्तर: ट्रांसफॉर्मर की क्रोड में प्रत्यावर्ती फ्लक्स परिवर्तन के कारण भंवर धाराएँ (Eddy Currents) उत्पन्न हो जाती हैं, जिससे क्रोड गर्म होकर ऊर्जा हानि करती है। क्रोड को एक-दूसरे से पृथक्कित (varnished) पट्टियों के रूप में पटलित बनाकर भंवर धाराओं के परिपथ का प्रतिरोध बढ़ा दिया जाता है, जिससे भंवर धारा हानि बहुत कम हो जाती है।

📌 **[MP Board 2024, 2018] प्रश्न:**

प्रश्न: एक प्रत्यावर्ती धारा परिपथ का समीकरण $I = 50 \sin(100\pi t) ext{ A}$ है। धारा की आवृत्ति तथा RMS मान ज्ञात कीजिए।

उत्तर:
मानक समीकरण $I = I_0 \sin(\omega t)$ से तुलना करने पर:
1. $I_0 = 50 ext{ A} \implies I_{rms} = rac{I_0}{\sqrt{2}} = rac{50}{\sqrt{2}} = **35.35 A**$
2. $\omega = 100\pi \implies 2\pi f = 100\pi \implies f = rac{100\pi}{2\pi} = **50 Hz**$

कक्षा 12 भौतिक विज्ञान (Class 12 Physics)

अध्याय 8: विद्युतचुंबकीय तरंगें (Electromagnetic Waves)

★ MP Board & NCERT 100% सटीक, हस्तलिखित शैली (Blue-Red Pen Layout) संपूर्ण नोट्स + 30 महत्वपूर्ण प्रश्नोत्तर + PYQs ★

1. अध्याय का संक्षिप्त परिचय एवं मुख्य सिद्धांत

1.1 मैक्सवेल का विस्थापन धारा का सिद्धांत (Displacement Current)

ऐम्पियर के परिपथीय नियम के अनुसार किसी बंद परिपथ के लिए चुंबकीय क्षेत्र का रेखीय समाकलन उसमें प्रवाहित धारा का μ_0 गुना होता है: $\oint B \cdot dl = \mu_0 I$। परंतु सन 1865 में प्रसिद्ध भौतिकविद् **जेम्स क्लर्क मैक्सवेल** ने दर्शाया कि संधारित्र को आवेशित करते समय प्लेटों के मध्य रिक्त स्थान में परिवर्ती विद्युत क्षेत्र के कारण एक धारा उत्पन्न होती है। इस धारा को **विस्थापन धारा (Displacement Current - I_d)** कहते हैं।

सूत्र: विस्थापन धारा (Displacement Current)

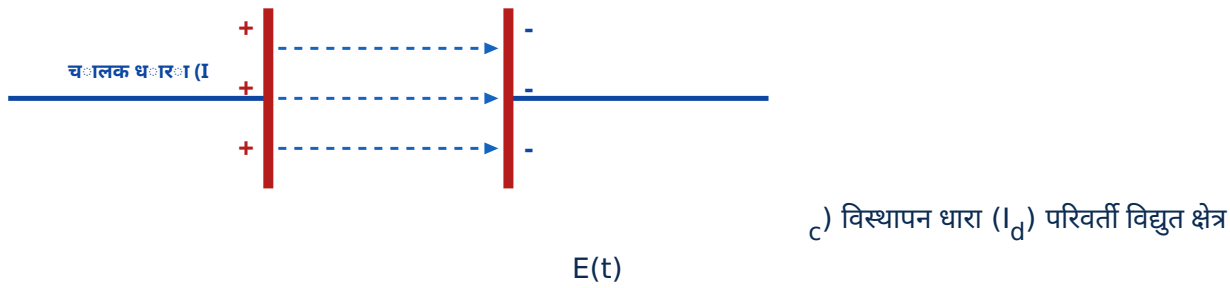
$$I_d = \varepsilon_0 \cdot (d\Phi_E / dt)$$

जहाँ ε_0 = निर्वात की विद्युतशीलता (8.854×10^{-12} $C^2/N\text{-}m^2$), Φ_E = विद्युत फ्लक्स, $(d\Phi_E/dt)$ = विद्युत फ्लक्स में परिवर्तन की दर।

ऐम्पियर-मैक्सवेल का संशोधित नियम:

$$\oint B \cdot dl = \mu_0 (I_c + I_d) = \mu_0 [I_c + \varepsilon_0 (d\Phi_E / dt)]$$

जहाँ I_c चालक धारा (Conduction Current) तथा I_d विस्थापन धारा है। संधारित्र के आवेशन के दौरान $I_c = I_d$ होता है।

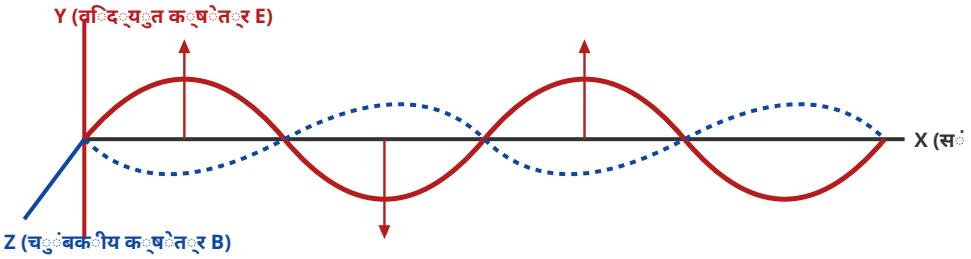


चित्र 1.1: संधारित्र की प्लेटों के मध्य विस्थापन धारा (Displacement Current in Capacitor)

1.2 विद्युतचुंबकीय तरंगें (Electromagnetic Waves)

परिभाषा: वे तरंगें जिनके संचरण के लिए किसी भौतिक माध्यम की आवश्यकता नहीं होती है तथा जिनमें विद्युत क्षेत्र (E) और चुंबकीय क्षेत्र (B) परस्पर लंबवत तथा तरंग संचरण की दिशा के भी लंबवत दोलन करते हैं, **विद्युतचुंबकीय तरंगें** कहलाती हैं।

उत्पत्ति का कारण: त्वरित (Accelerated) या दोलायमान (Oscillating) आवेश विद्युतचुंबकीय तरंगें उत्पन्न करते हैं। स्थिर आवेश केवल स्थिर विद्युत क्षेत्र तथा एकसमान वेग से गतिमान आवेश केवल चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करता है।



चित्र 1.2: विद्युतचुंबकीय तरंग का संचरण (Electromagnetic Wave Propagation)

1.3 विद्युतचुंबकीय तरंगों के 10 मुख्य गुणधर्म (Key Properties)

1. **अनुप्रस्थ प्रकृति (Transverse Nature):** इनमें E और B तरंग संचरण दिशा के लंबवत दोलन करते हैं।
2. **माध्यम की अनपेक्षितता:** इनके संचरण के लिए किसी द्रव्यात्मक माध्यम की आवश्यकता नहीं होती (निर्वात में भी गमन करती हैं)।
3. **निर्वात में वेग:** निर्वात में इनका वेग प्रकाश के वेग के बराबर होता है: $c = 1 / \sqrt{(\mu_0 \varepsilon_0)} \approx 3 \times 10^8\ m/s$।
4. **आयामों में संबंध:** विद्युत क्षेत्र के आयाम (E_0) तथा चुंबकीय क्षेत्र के आयाम (B_0) का अनुपात निर्वात में प्रकाश के वेग के बराबर होता है: $E_0 / B_0 = c$।
5. **ऊर्जा का समान विभाजन:** तरंग की कुल ऊर्जा विद्युत और चुंबकीय क्षेत्रों में समान रूप से विभाजित होती है ($u_E = u_B$)।
6. **औसत ऊर्जा घनत्व (Energy Density):** $u = \varepsilon_0 E_{rms}^2 = B_{rms}^2 / \mu_0$।
7. **संवेग एवं विकिरण दाब:** ये तरंगें संवेग ($p = U / c$) वहन करती हैं तथा सतह पर दाब (Radiation Pressure) आरोपित करती हैं।
8. **अनावेशित प्रकृति:** ये उदासीन होती हैं, अतः विद्युत या चुंबकीय क्षेत्र द्वारा विचलित नहीं होतीं।
9. **प्रकाशिकी गुण:** ये परावर्तन, अपवर्तन, व्यतिकरण, विवर्तन एवं ध्रुवण (Polarization) प्रदर्शित करती हैं।
10. **पॉइंटिंग वेक्टर (Poynting Vector):** ऊर्जा प्रवाह की दर को प्रदर्शित करता है: $S = (1 / \mu_0)\ (E \times B)$।

2. संपूर्ण अध्याय के महत्वपूर्ण सूत्र (Formula Box)

★ विद्युतचुंबकीय तरंगों का सूत्र कोष (Formula Sheet) ★

भौतिक राशि / नियम	सूत्र (Formula)	संकेत / मात्रक
विस्थापन धारा	$I_d = \varepsilon_0 (d\Phi_E / dt)$	Ampere (A)
ऐम्पियर-मैक्सवेल नियम	$\oint B \cdot dl = \mu_0 (I_c + I_d)$	T·m
निर्वात में तरंग का वेग	$c = 1 / \sqrt{(\mu_0 \varepsilon_0)} = 3 \times 10^8$ m/s	m/s
माध्यम में तरंग का वेग	$v = 1 / \sqrt{(\mu\varepsilon)} = c / \sqrt{(\mu_r \varepsilon_r)}$	m/s
आयाम संबंध	$E_0 / B_0 = c$ या $E_{rms} / B_{rms} = c$	m/s
विद्युत ऊर्जा घनत्व	$u_E = (1/2)\, \varepsilon_0 E^2$ (औसत: $(1/4)\, \varepsilon_0 E_0^2$)	J/m^3
चुंबकीय ऊर्जा घनत्व	$u_B = B^2 / (2\mu_0)$ (औसत: $B_0^2 / (4\mu_0)$)	J/m^3
कुल औसत ऊर्जा घनत्व	$u = \varepsilon_0 E_{rms}^2 = B_{rms}^2 / \mu_0$	J/m^3
तरंग की तीव्रता (Intensity)	$I = u \cdot c = \varepsilon_0 E_{rms}^2 c$	W/m^2
संवेग (Momentum)	$p = U / c$ (पूर्ण अवशोषण हेतु)	kg·m/s

3. विद्युतचुंबकीय स्पेक्ट्रम (EM Spectrum Breakdown)

विद्युतचुंबकीय तरंगों को उनकी आवृत्ति या तरंगदैर्ध्य के क्रम में व्यवस्थित करने पर प्राप्त क्र**विद्युतचुंबकीय स्पेक्ट्रम** कहलाता है। नीचे दी गई तालिका बोर्ड परीक्षा हेतु अति-महत्वपूर्ण है:

क्र.	तरंग का नाम	तरंगदैर्ध्य परिसर (λ)	आवृत्ति परिसर (ν)	उत्पत्ति का स्रोत	मुख्य उपयोग (Applications)
1	**रेडियो तरंगें (Radio)**	> 0.1 m	500 kHz - 1000 MHz	चालक तार में त्वरित आवेश	रेडियो व टीवी संचार, मोबाइल नेटवर्क।
2	**सूक्ष्म तरंगें (Microwaves)**	0.1 m - 1 mm	1 GHz - 300 GHz	क्लॉइस्ट्रॉन / मैग्नेट्रॉन वाल्व	रडार (Radar) प्रणाली, माइक्रोवेव ओवन।
3	**अवरक्त तरंगें (Infrared)**	1 mm - 700 nm	3×10^{11} - 4×10^{14} Hz	गर्म वस्तुएँ एवं अणु	रिमोट कंट्रोल, नाइट विज़न, फिजियोथेरेपी।
4	**दृश्य प्रकाश (Visible)**	700 nm - 400 nm	4×10^{14} - 8×10^{14} Hz	दीप्त वस्तुएँ, परमाणु उत्तेजन	मानव दृष्टि की संवेदना, फोटोग्राफी।
5	**पराबैंगनी (UV Rays)**	400 nm - 1 nm	8×10^{14} - 3×10^{16} Hz	सूर्य, उच्च ताप चाप (Arc)	जल शोधन (RO/UV), अदृश्य लेखन, LASIK।
6	**X-किरणें (X-Rays)**	1 nm - 10^{-3} nm	3×10^{16} - 3×10^{19} Hz	भारी धातु पर तीव्र इलेक्ट्रॉन प्रहार	चिकित्सा (अस्थि भंजन निदान), कैंसर उपचार।
7	**गामा किरणें (γ-Rays)**	< 10^{-3} nm	> 3×10^{19} Hz	रेडियोएक्टिव नाभि का क्षय	कैंसर ट्यूमर नष्ट करना, नाभिकीय संरचना अध्ययन।

4. बोर्ड परीक्षा हेतु 30 100% महत्वपूर्ण प्रश्न उत्तर सहित

अंक-वार विभाजन: [2 अंक के लघु उत्तरीय प्रश्न (Q1 से Q10)]

2 अंक **प्रश्न 1: विस्थापन धारा (Displacement Current) किसे कहते हैं? इसका सूत्र लिखिए।**

उत्तर: समय के साथ परिवर्तित होने वाले विद्युत क्षेत्र (या विद्युत फ्लक्स) के कारण उत्पन्न होने वाली धारा को **विस्थापन धारा** कहते हैं।

सूत्र: $I_d = \varepsilon_0 (d\Phi_E / dt)$। इसका मात्रक ऐम्पियर (A) होता है।

2 अंक **प्रश्न 2: विद्युतचुंबकीय तरंगें क्या हैं? इनकी खोज किसने की थी?**

उत्तर: वे तरंगें जो परस्पर लंबवत दोलनशील विद्युत क्षेत्र (E) तथा चुंबकीय क्षेत्र (B) से बनी होती हैं और निर्वात में प्रकाश के वेग से गमन करती हैं, विद्युतचुंबकीय तरंगें कहलाती हैं। इनकी सैद्धांतिक खोज **जेम्स क्लर्क मैक्सवेल** (1865) ने तथा प्रयोगात्मक पुष्टि **हेनरिक हर्ट्ज** (1887) ने की थी।

2 अंक **प्रश्न 3: ओजोन परत का मानव जीवन के लिए क्या महत्व है?**

उत्तर: ओजोन परत (O_3) समताप मंडल (Stratosphere) में पाई जाती है। यह सूर्य से आने वाली हानिकारक **पराबैंगनी किरणों (UV rays)** को अवशोषित कर पृथ्वी पर जीवन की रक्षा करती है। यह त्वचा कैंसर और मोतियाबिंद जैसी बीमारियों से बचाती है।

2 अंक **प्रश्न 4: X-किरणों के दो मुख्य उपयोग लिखिए।**

उत्तर:

1. **चिकित्सा क्षेत्र में:** शरीर की टूटी हुई हड्डियों (Fracture) तथा फेफड़ों के संक्रमण का पता लगाने में।
2. **उद्योग एवं सुरक्षा में:** क्रिस्टल संरचना के अध्ययन तथा हवाई अड्डों पर सामान की सुरक्षा जाँच हेतु।

2 अंक **प्रश्न 5: ग्रीनहाउस प्रभाव (Greenhouse Effect) क्या है? इसके लिए कौन-सी तरंगें उत्तरदायी हैं?**

उत्तर: पृथ्वी के वायुमंडल द्वारा सूर्य से प्राप्त ताप को रोककर पृथ्वी के औसत ताप को जीवित रहने योग्य बनाए रखने की घटना को ग्रीनहाउस प्रभाव कहते हैं। इसके लिए मुख्य रूप से **अवरक्त तरंगें (Infrared Waves)** उत्तरदायी हैं।

2 अंक **प्रश्न 6: विस्थापन धारा तथा चालक धारा में दो अंतर लिखिए।**

उत्तर:

चालक धारा (I_c)	विस्थापन धारा (I_d)
यह चालक तार में मुक्त इलेक्ट्रॉनों के प्रवाह से उत्पन्न होती है।	यह समय के साथ विद्युत क्षेत्र/फ्लक्स में परिवर्तन से उत्पन्न होती है।
इसका मान $I = V/R$ होता है।	इसका मान $I_d = \varepsilon_0 (d\Phi_E/dt)$ होता है।

2 अंक **प्रश्न 7: माइक्रोवेव (सूक्ष्म तरंगों) का उपयोग रडार प्रणाली में क्यों किया जाता है?**

उत्तर: क्योंकि सूक्ष्म तरंगों की तरंगदैर्ध्य बहुत कम (लघु) होती है, जिससे ये बिना अधिक फैले एक सीधी बीम में दूर तक यात्रा कर सकती हैं और छोटी बाधाओं से परावर्तित होकर सटीक लोकेशन देती हैं।

2 अंक **प्रश्न 8: पराबैंगनी किरणों के दो उपयोग लिखिए।**

उत्तर:

1. जल शोधक यंत्रों (Water Purifiers) में जीवाणुओं एवं रोगाणुओं को नष्ट करने में।
2. नकली नोटों तथा गुप्त हस्ताक्षरों की पहचान करने में।

2 अंक **प्रश्न 9: विद्युतचुंबकीय तरंगों में विद्युत क्षेत्र एवं चुंबकीय क्षेत्र के आयामों में क्या संबंध होता है?**

उत्तर: निर्वात में विद्युत क्षेत्र के आयाम (E_0) तथा चुंबकीय क्षेत्र के आयाम (B_0) का अनुपात प्रकाश की चाल c के बराबर होता है:

$$E_0 / B_0 = c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

2 अंक **प्रश्न 10: फोटोग्राफी में अंधेरे कमरे में लाल रंग का प्रकाश ही क्यों उपयोग किया जाता है?**

उत्तर: लाल रंग के प्रकाश की तरंगदैर्ध्य सर्वाधिक ($\lambda \approx 700\ nm$) होती है, जिसके कारण इसकी आवृत्ति एवं फोटॉन की ऊर्जा बहुत कम होती है। अतः यह फोटोग्राफिक फिल्म को प्रभावित या खराब नहीं करता।

[3 अंक के मध्यम उत्तरीय प्रश्न (Q11 से Q20)]

3 अंक **प्रश्न 11: ऐम्पियर-मैक्सवेल नियम को समझाइए तथा इसका गणितीय रूप व्युत्पन्न कीजिए।**

उत्तर: ऐम्पियर का मूल नियम केवल नियत धाराओं के लिए सत्य था। संधारित्र की प्लेटों के मध्य नियम असंगत सिद्ध हो रहा था। मैक्सवेल ने इस असंगति को दूर करने के लिए विस्थापन धारा I_d की अवधारणा जोड़ी।

संशोधित नियम के अनुसार: किसी बंद परिपथ के चुंबकीय क्षेत्र का रेखीय समाकलन उसमें प्रवाहित कुल धारा (चालक धारा + विस्थापन धारा) का μ_0 गुना होता है।

$$\oint B \cdot dl = \mu_0 (I_c + I_d)$$

चूँकि $I_d = \varepsilon_0 (d\Phi_E/dt)$, अतः:

$$\oint B \cdot dl = \mu_0 [I_c + \varepsilon_0 (d\Phi_E/dt)]$$

3 अंक **प्रश्न 12: सिद्ध कीजिए कि विद्युतचुंबकीय तरंगों में औसतन विद्युत ऊर्जा घनत्व तथा चुंबकीय ऊर्जा घनत्व परस्पर बराबर होते हैं।**

उत्तर:

औसत विद्युत ऊर्जा घनत्व $u_E = (1/4) \varepsilon_0 E_0^2$

हम जानते हैं कि $E_0 = c B_0$ तथा $c = 1 / \sqrt{(\mu_0 \varepsilon_0)} \Rightarrow c^2 = 1 / (\mu_0 \varepsilon_0)$

E_0^2 का मान रखने पर:

$u_E = (1/4) \varepsilon_0 (c B_0)^2 = (1/4) \varepsilon_0 \cdot [1 / (\mu_0 \varepsilon_0)] \cdot B_0^2 = B_0^2 / (4 \mu_0)$

परंतु $u_B = B_0^2 / (4 \mu_0)$ होता है।

$\therefore u_E = u_B$ (इति सिद्धम)

3 अंक **प्रश्न 13: विद्युतचुंबकीय तरंगों की अनुप्रस्थ (Transverse) प्रकृति को समझाइए।**

उत्तर: तरंग की अनुप्रस्थ प्रकृति का अर्थ है कि दोलन करने वाले क्षेत्र तरंग संचरण की दिशा के लंबवत होते हैं।

यदि कोई विद्युतचुंबकीय तरंग X-अक्ष की दिशा में संचारित हो रही है, तो मैक्सवेल के समीकरणों से यह सिद्ध होता है कि X-अक्ष के अनुदिश विद्युत एवं चुंबकीय क्षेत्र के घटक शून्य होते हैं ($E_x = 0, B_x = 0$)।

अर्थात विद्युत क्षेत्र E Y-अक्ष के अनुदिश तथा चुंबकीय क्षेत्र B Z-अक्ष के अनुदिश दोलन करते हैं। चूँकि दोलन तरंग संचरण के लंबवत हैं, अतः इनकी प्रकृति **अनुप्रस्थ** होती है।

3 अंक **प्रश्न 14: हर्ट्ज के प्रयोग का संक्षिप्त वर्णन कीजिए तथा इससे क्या निष्कर्ष निकला?**

उत्तर: हेनरिक हर्ट्ज ने 1887 में एल-सी (LC) दोलित्र परिपथ का उपयोग करके प्रयोगशाला में विद्युतचुंबकीय तरंगें उत्पन्न कीं।

संरचना: इसमें धातु की दो बड़ी प्लेटें दो धात्विक गोलों से जुड़ी होती हैं जो एक स्पार्क गैप (Spark Gap) बनाती हैं। गोलों को प्रेरण कुंडली से जोड़ा जाता है।

निष्कर्ष: स्पार्क गैप में उच्च विभवांतर से स्पार्क उत्पन्न होता है, जिससे उच्च आवृत्ति के दोलन होते हैं और विद्युतचुंबकीय तरंगें उत्सर्जित होती हैं। हर्ट्ज ने दर्शाया कि इन तरंगों में प्रकाश की भाँति परावर्तन, अपवर्तन एवं व्यतिकरण होता है।

3 अंक **प्रश्न 15: माइक्रोवेव ओवन (Microwave Oven) किस सिद्धांत पर कार्य करता है? समझाइए।**

उत्तर: माइक्रोवेव ओवन का कार्य सिद्धांत **अनुनाद (Resonance)** पर आधारित है। भोजन में जल के अणु उपस्थित होते हैं। सूक्ष्म तरंगों की आवृत्ति को इस प्रकार चुना जाता है कि वह जल के अणुओं की प्राकृतिक घूर्णन आवृत्ति के बराबर (~2.45 GHz) हो। जब ये तरंगें भोजन पर गिरती हैं, तो जल के अणु अनुनाद के कारण अत्यधिक कंपन करने लगते हैं, जिससे ऊष्मीय ऊर्जा उत्पन्न होती है और भोजन शीघ्र पक जाता है।

3 अंक **प्रश्न 16: अवरक्त तरंगों को 'ऊष्मा तरंगें' (Heat Waves) क्यों कहा जाता है? इनके दो प्रमुख उपयोग लिखिए।**

उत्तर: अवरक्त तरंगें जब किसी पदार्थ पर गिरती हैं, तो पदार्थ में मौजूद अणु (विशेष रूप से H_2O, CO_2) इन्हें आसानी से अवशोषित कर लेते हैं। इससे अणुओं की तापीय गति बढ़ जाती है और वस्तु का ताप बढ़ जाता है। इसलिए इन्हें **ऊष्मा तरंगें** कहते हैं।

उपयोग: (1) टीवी व इलेक्ट्रॉनिक्स के रिमोट कंट्रोल में। (2) कोहरे में दूर की स्पष्ट तस्वीरें लेने हेतु।

3 अंक **प्रश्न 17: विद्युतचुंबकीय तरंगों द्वारा दाब (Radiation Pressure) आरोपित करने का क्या कारण है? व्यंजक लिखिए।**

उत्तर: विद्युतचुंबकीय तरंगों में ऊर्जा के साथ-साथ **संवेग (Momentum)** भी होता है। जब ये तरंगें किसी सतह पर गिरती हैं, तो अपना संवेग सतह को स्थानांतरित कर देती हैं। संवेग परिवर्तन की दर बल उत्पन्न करती है, जिससे दाब आरोपित होता है। यदि U कुल अवशोषित ऊर्जा है, तो स्थानांतरित संवेग $p = U / c$ होता है। पूर्ण अवशोषण के लिए विकिरण दाब $P = I / c$ (जहाँ I = तीव्रता) होता है।

3 अंक **प्रश्न 18: कुहासे / कोहरे में देखने के लिए किन तरंगों का प्रयोग किया जाता है और क्यों?**

उत्तर: कुहासे या कोहरे में देखने के लिए **अवरक्त किरणों (Infrared Rays)** का उपयोग किया जाता है।

कारण: रैले के प्रकीर्णन नियमानुसार प्रकीर्णन की मात्रा तरंगदैर्ध्य के चतुर्थ घात के व्युत्क्रमानुपाती होती है ($I \propto 1/\lambda^4$)। चूँकि अवरक्त तरंगों की तरंगदैर्ध्य दृश्य प्रकाश से काफी अधिक होती है, अतः इनका कोहरे या धुएँ के कणों द्वारा प्रकीर्णन बहुत कम होता है और ये बिना रुके दूर तक चली जाती हैं।

3 अंक **प्रश्न 19: गाउस के विद्युत एवं चुम्बकत्व के नियमों में क्या मूलभूत अंतर है? इसका भौतिक अर्थ क्या है?**

उत्तर:

1. **विद्युत का गाउस नियम:** $\oint E \cdot dA = q / \varepsilon_0$ (यह बताता है कि स्वतंत्र विद्युत आवेश का अस्तित्व होता है)।
2. **चुंबकत्व का गाउस नियम:** $\oint B \cdot dA = 0$ (यह बताता है कि स्वतंत्र चुंबकीय ध्रुव यानी **एकल चुम्बकीय ध्रुव (Monopole) का कोई अस्तित्व नहीं होता**। चुंबकीय बल रेखाएँ सदैव बंद वक्र बनाती हैं)।

3 अंक **प्रश्न 20: पृथ्वी के वायुमंडल के विभिन्न क्षेत्रों का संक्षेप में वर्णन कीजिए तथा रेडियो तरंगों के परावर्तन में आयनमंडल की भूमिका लिखिए।**

उत्तर: वायुमंडल को नीचे से ऊपर मुख्यतः क्षोभमंडल (Troposphere), समतापमंडल (Stratosphere), मध्यमंडल (Mesosphere) तथा आयनमंडल (Ionosphere) में बाँटा गया है।
आयनमंडल की भूमिका: आयनमंडल में सूर्य के UV विकिरण द्वारा गैसें आयनित रहती हैं। यह मंडल पृथ्वी से भेजी गई **लघु रेडियो तरंगों (Short Waves)** को पूर्ण आंतरिक परावर्तन द्वारा पुनः पृथ्वी पर लौटा देता है, जिससे दूरस्थ स्थानों तक रेडियो संचार संभव होता है।

[4 व 5 अंक के दीर्घ उत्तरीय प्रश्न (Q21 से Q25)]

4/5 अंक **प्रश्न 21: मैक्सवेल के चारों समीकरण लिखिए तथा प्रत्येक का भौतिक महत्व (Physical Significance) समझाइए।**

उत्तर: मैक्सवेल ने वैद्युतिकी एवं चुंबकत्व के मूलभूत नियमों को चार गणितीय समीकरणों के रूप में समेकित किया:

1. विद्युतिकी में गाउस का नियम:

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = q / \varepsilon_0$$

भौतिक महत्व: यह नियम बताता है कि स्थिर या गतिमान आवेश विद्युत क्षेत्र उत्पन्न करते हैं तथा स्वतंत्र धनात्मक एवं ऋणात्मक आवेश पृथक अस्तित्व में रह सकते हैं।

2. चुंबकत्व में गाउस का नियम:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$$

भौतिक महत्व: यह सिद्ध करता है कि प्रकृति में एकल चुंबकीय ध्रुव का कोई अस्तित्व नहीं है। चुंबकीय ध्रुव सदैव युग्म (N-S) में पाए जाते हैं।

3. फैराडे का विद्युतचुंबकीय प्रेरण का नियम:

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -(d\Phi_B / dt)$$

भौतिक महत्व: समय के साथ परिवर्तनशील चुंबकीय क्षेत्र सदैव एक प्रेरित विद्युत क्षेत्र उत्पन्न करता है। (जनरेटर एवं ट्रांसफार्मर का आधार)।

4. ऐम्पियर-मैक्सवेल का नियम:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 (I_c + \varepsilon_0 \, d\Phi_E/dt)$$

भौतिक महत्व: यह दर्शाता है कि चालक धारा तथा समय के साथ परिवर्तनशील विद्युत क्षेत्र दोनों ही चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करते हैं।

4/5 अंक **प्रश्न 22: सिद्ध कीजिए कि संधारित्र को आवेशित करते समय उसकी प्लेटों के मध्य विस्थापन धारा I_d का मान परिपथ की चालक धारा I_c के ठीक बराबर होता है ($I_c = I_d$)।**

उत्तर:

मान लीजिए किसी क्षण संधारित्र की प्लेटों पर आवेश $q(t)$ है तथा प्लेटों का क्षेत्रफल A है।

चालक तार में प्रवाहित चालक धारा: $I_c = dq / dt$ --- (समीकरण 1)

संधारित्र की प्लेटों के मध्य विद्युत क्षेत्र: $E = \sigma / \varepsilon_0 = q / (A\,\varepsilon_0)$

अतः प्लेटों के मध्य से गुजरने वाला विद्युत फ्लक्स:

$\Phi_E = E \cdot A = [\, q / (A\,\varepsilon_0)\,] \cdot A = q / \varepsilon_0$

विस्थापन धारा की परिभाषा से:

$I_d = \varepsilon_0\,(d\Phi_E / dt) = \varepsilon_0 \cdot (d/dt)\,[\, q / \varepsilon_0\,]$

$I_d = \varepsilon_0 \cdot (1 / \varepsilon_0) \cdot (dq / dt) = dq / dt$ --- (समीकरण 2)

समीकरण (1) और (2) की तुलना करने पर:

$$I_c = I_d$$

निष्कर्ष: संधारित्र के बाहर चालक तार में केवल चालक धारा होती है तथा संधारित्र के अंदर केवल विस्थापन धारा होती है, और दोनों का परिमाण सदैव समान होता है। परिपथ में धारा की संततता (Continuity) बनी रहती है।

4/5 अंक **प्रश्न 23: विद्युतचुंबकीय स्पेक्ट्रम को मुख्य भागों में बाँटकर प्रत्येक की तरंगदैर्ध्य परास, उत्पत्ति एवं दो-दो मुख्य उपयोगों का वर्णन कीजिए।**

उत्तर: संपूर्ण विद्युतचुंबकीय स्पेक्ट्रम को तरंगदैर्ध्य के घटते क्रम में 7 भागों में विभाजित किया जाता है:

1. **रेडियो तरंगें:** ($\lambda > 0.1$ m) - त्वरित आवेश द्वारा - टीवी व रेडियो प्रसारण में।
2. **सूक्ष्म तरंगें (Microwaves):** (0.1 m से 1 mm) - मैग्नेट्रॉन द्वारा - रडार व ओवन में।
3. **अवरक्त किरणें:** (1 mm से 700 nm) - गर्म वस्तुओं से - रिमोट कंट्रोल व कोहरे की फोटोग्राफी।
4. **दृश्य प्रकाश:** (700 nm से 400 nm) - दीप्त वस्तुओं द्वारा - वस्तुओं को देखने में।
5. **पराबैंगनी किरणें:** (400 nm से 1 nm) - सूर्य व आर्क लैंप द्वारा - जल के जीवाणु नष्ट करने में।
6. **X-किरणें:** (1 nm से 10^{-3} nm) - तीव्र इलेक्ट्रॉनों के टकराने से - अस्थि भंजन निदान में।
7. **गामा किरणें:** ($< 10^{-3}$ nm) - नाभिकीय क्षय से - कैंसर उपचार में।

4/5 अंक **प्रश्न 24: समतल विद्युतचुंबकीय तरंग का समीकरण लिखिए। इसके विद्युत एवं चुंबकीय क्षेत्रों के बीच संबंध व्युत्पन्न कीजिए।**

उत्तर: यदि एक समतल विद्युतचुंबकीय तरंग X-अक्ष के अनुदिश गमन कर रही है, तो:

विद्युत क्षेत्र का समीकरण: $E_y = E_0 \sin(kx - \omega t)$

चुंबकीय क्षेत्र का समीकरण: $B_z = B_0 \sin(kx - \omega t)$

जहाँ $k = 2\pi / \lambda$ (तरंग संचरण नियतांक) तथा $\omega = 2\pi v$ (कोणीय आवृत्ति)।

तरंग की चाल: $v = \omega / k = \lambda v$।

निर्वात के लिए $v = c = 1 / \sqrt{(\mu_0 \varepsilon_0)}$।

मैक्सवेल के समीकरण $\oint E \cdot dl = - d\Phi_B/dt$ का प्रयोग करने पर प्राप्त होता है:

$$E_0 / B_0 = c$$

4/5 अंक **प्रश्न 25: विद्युतचुंबकीय तरंगों की 5 प्रमुख विशेषताएँ लिखिए तथा सिद्ध कीजिए कि निर्वात में इनकी चाल $c = 1 / \sqrt{(\mu_0 \varepsilon_0)}$ होती है।**

उत्तर:

विशेषताएँ: (1) ये अनुप्रस्थ होती हैं। (2) निर्वात में चाल 3×10^8 m/s होती है। (3) इनमें आवेश नहीं होता। (4) ऊर्जा समान रूप से विभाजित होती है। (5) ये परावर्तन एवं ध्रुवण प्रदर्शित करती हैं।

सत्यापन: डाइमेंशनल एनालिसिस (विमीय विश्लेषण) द्वारा:

μ_0 की विमा $= [M A^{-2} L T^{-2}]$

ε_0 की विमा $= [M^{-1} A^2 L^{-3} T^4]$

$\mu_0 \varepsilon_0$ की विमा $= [L^{-2} T^2]$

$\therefore 1 / \sqrt{(\mu_0 \varepsilon_0)}$ की विमा $= [L T^{-1}]$ (वेग की विमा)।

मान रखने पर: $1 / \sqrt{(4\pi \times 10^{-7} \times 8.854 \times 10^{-12})} \approx 2.9979 \times 10^8$ m/s $= c$।

[महत्वपूर्ण हल सहित संख्यात्मक प्रश्न (Numericals Q26 से Q30)]

संख्यात्मक **प्रश्न 26: एक समतल विद्युतचुंबकीय तरंग में विद्युत क्षेत्र का शिखर मान $E_0 = 120$ N/C है। चुंबकीय क्षेत्र के शिखर मान B_0 की गणना कीजिए।**

हल:

दिया है: $E_0 = 120$ N/C, $c = 3 \times 10^8$ m/s

सूत्र: $E_0 / B_0 = c \Rightarrow B_0 = E_0 / c$

$B_0 = 120 / (3 \times 10^8) = 40 \times 10^{-8}$ T $= 4 \times 10^{-7}$ T

उत्तर: चुंबकीय क्षेत्र का शिखर मान 4×10^{-7} **टेस्ला** *(Tesla)* है।

संख्यात्मक **प्रश्न 27: किसी विद्युतचुंबकीय तरंग की आवृत्ति $v = 5 \times 10^{14}$ Hz है। इसकी तरंगदैर्ध्य (λ) मीटर तथा ऐंगस्ट्रॉम (Å) में ज्ञात कीजिए।**

हल:

दिया है: $v = 5 \times 10^{14}$ Hz, $c = 3 \times 10^{8}$ m/s

सूत्र: $c = v\lambda \Rightarrow \lambda = c / v$

$\lambda = (3 \times 10^{8}) / (5 \times 10^{14}) = 0.6 \times 10^{-6}$ m $= 6 \times 10^{-7}$ m

ऐंगस्ट्रॉम में: $\lambda = 6 \times 10^{-7} / 10^{-10} = 6000$ Å (यह दृश्य प्रकाश क्षेत्र में है)।

उत्तर: तरंगदैर्ध्य 6×10^{-7} m या 6000 Å है।

संख्यात्मक **प्रश्न 28: एक समांतर प्लेट संधारित्र की धारिता $C = 1\ \mu F$ है। यदि इसकी प्लेटों के बीच विभवांतर 100 V/s की दर से बदल रहा है, तो विस्थापन धारा का मान ज्ञात कीजिए।**

हल:

दिया है: $C = 1\ \mu F = 10^{-6}$ F, $dV / dt = 100$ V/s

हम जानते हैं कि संधारित्र का आवेश $q = C V$

$\therefore I_c = dq / dt = C \cdot (dV / dt)$

चूँकि संधारित्र के लिए $I_d = I_c$ होता है:

$I_d = 10^{-6} \times 100 = 10^{-4}$ A $= 0.1$ mA

उत्तर: विस्थापन धारा का मान 0.1 mA या 10^{-4} A है।

संख्यात्मक **प्रश्न 29: एक समतल विद्युतचुंबकीय तरंग के विद्युत क्षेत्र का वर्ग-माध्य-मूल (rms) मान $E_{rms} = 6$ V/m है। तरंग का कुल औसत ऊर्जा घनत्व ज्ञात कीजिए। ($\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\ C^2/N\text{-}m^2$)**

हल:

दिया है: $E_{rms} = 6$ V/m

कुल औसत ऊर्जा घनत्व का सूत्र: $u = \varepsilon_0 E_{rms}^2$

$u = (8.85 \times 10^{-12}) \times (6)^2 = 8.85 \times 10^{-12} \times 36$

$u = 3.186 \times 10^{-10}\ J/m^3$

उत्तर: कुल औसत ऊर्जा घनत्व $3.186 \times 10^{-10}\ J/m^3$ है।

संख्यात्मक **प्रश्न 30: किसी तरंग का समीकरण $E_y = 30 \sin(2 \times 10^{11} t - 300 x)$ V/m द्वारा दिया गया है। तरंग की आवृत्ति (ν) तथा तरंग चाल (v) ज्ञात कीजिए।**

हल:

मानक समीकरण से तुलना करने पर: $E_y = E_0 \sin(\omega t - kx)$

यहाँ $\omega = 2 \times 10^{11}$ rad/s, $k = 300$ rad/m

1. आवृत्ति: $\omega = 2\pi v \Rightarrow v = \omega / (2\pi) = (2 \times 10^{11}) / (2 \times 3.14) \approx 3.18 \times 10^{10}$ Hz
2. तरंग चाल: $v = \omega / k = (2 \times 10^{11}) / 300 \approx 6.67 \times 10^{8}$ m/s

उत्तर: आवृत्ति = 3.18×10^{10} Hz, चाल = 6.67×10^{8} m/s।

5. विगत वर्षों के बोर्ड प्रश्न (PYQs 2018 - 2025) सटीक उत्तर सहित

MP Board 2024 **PYQ 1: ग्रीनहाउस प्रभाव के लिए कौन-सी विद्युतचुंबकीय तरंगें उत्तरदायी हैं?**

उत्तर: अवरक्त तरंगें (Infrared Waves)।

MP Board 2023 **PYQ 2: विस्थापन धारा का सूत्र लिखिए तथा इसका मात्रक बताइए।**

उत्तर: सूत्र: $I_d = \varepsilon_0 (d\Phi_E / dt)$। मात्रक: **ऐम्पियर (A)**।

MP Board 2022 **PYQ 3: विद्युतचुंबकीय तरंगों की दो मुख्य विशेषताएँ लिखिए।**

उत्तर: (1) इनकी प्रकृति अनुप्रस्थ होती है। (2) ये निर्वात में प्रकाश की चाल (3×10^8 m/s) से चलती हैं।

MP Board 2020 **PYQ 4: जल को रोगाणुमुक्त करने के लिए किस तरंग का प्रयोग किया जाता है?**

उत्तर: पराबैंगनी किरणों (UV Rays) का।

MP Board 2019 **PYQ 5: टीवी के रिमोट कंट्रोल में कौन-सी तरंगों का उपयोग होता है?**

उत्तर: अवरक्त तरंगों (Infrared Waves) का।

6. अंत में Quick Revision Notes & Memory Tricks

★ याद रखने योग्य मुख्य बिंदु (Memory Tricks) ★

- **स्पेक्ट्रम याद रखने की ट्रिक्स (घटती तरंगदैर्ध्य के क्रम में):**
  "Radio Micro In Vis UV X Gamma"
  (रेडियो > माइक्रो > अवरक्त > दृश्य > पराबैंगनी > X-किरणें > गामा)
- **आवृत्ति का क्रम:** स्पेक्ट्रम में रेडियो से गामा किरणों की ओर जाने पर आवृत्ति (ν) तथा ऊर्जा ($E = h\nu$) बढ़ती है, जबकि तरंगदैर्ध्य (λ) घटती है।
- **सर्वाधिक वेधन क्षमता (Penetrating Power): गामा किरणों (γ-rays)** की होती है क्योंकि इनकी आवृत्ति उच्चतम होती है।
- **सर्वाधिक तरंगदैर्ध्य: रेडियो तरंगों** की होती है।
- **विद्युतचुंबकीय तरंगों का स्रोत:** त्वरित (Accelerated) आवेश। स्थिर आवेश केवल विद्युत क्षेत्र उत्पन्न करता है।
- **समान ऊर्जा वितरण:** तरंग की 50% ऊर्जा विद्युत क्षेत्र में और 50% ऊर्जा चुंबकीय क्षेत्र में होती है।

★★★ अध्याय 8 (विद्युतचुंबकीय तरंगें) संपूर्ण नोट्स - MP Board परीक्षा हेतु 100% सफलता ★★★

कक्षा 12 भौतिक विज्ञान (Physics)

अध्याय - 9: किरण प्रकाशिकी एवं प्रकाशिक यंत्र (Ray Optics and Optical Instruments)

MP Board + NCERT | 100% बोर्ड परीक्षा विशेष हस्तलिखित नोट्स

1. अध्याय का संक्षिप्त परिचय (Chapter Introduction)

प्रकाशिकी (Optics): भौतिक विज्ञान की वह शाखा जिसके अंतर्गत प्रकाश, उसके गुणों, उसकी प्रकृति तथा प्रकाशिक घटनाओं का अध्ययन किया जाता है, प्रकाशिकी कहलाती है। इसे मुख्यतः दो भागों में बाँटा जाता है:

- **किरण प्रकाशिकी (Ray Optics):** इसमें प्रकाश को एक सीधी रेखा में गमन करने वाली किरण माना जाता है। यह परावर्तन, अपवर्तन, लेंस तथा प्रकाशिक यंत्रों के सिद्धांतों की व्याख्या करती है।
- **तरंग प्रकाशिकी (Wave Optics):** इसमें प्रकाश की तरंग प्रकृति का अध्ययन किया जाता है (जैसे व्यतिकरण, विवर्तन, ध्रुवण)।

2. सभी महत्वपूर्ण परिभाषाएँ (Important Definitions)

1. **प्रकाश का परावर्तन (Reflection of Light):** जब प्रकाश किरण किसी पॉलिशदार या चिकने पृष्ठ से टकराकर उसी माध्यम में वापस लौट आती है, तो इस घटना को प्रकाश का परावर्तन कहते हैं।
2. **प्रकाश का अपवर्तन (Refraction of Light):** जब प्रकाश किरण एक पारदर्शी माध्यम से दूसरे पारदर्शी माध्यम में प्रवेश करती है, तो अपने मूल पथ से विचलित हो जाती है। इस घटना को अपवर्तन कहते हैं।
3. **अपवर्तनांक (Refraction Index - μ):** निर्वात में प्रकाश की चाल (c) तथा माध्यम में प्रकाश की चाल (v) के अनुपात को उस माध्यम का निरपेक्ष अपवर्तनांक कहते हैं: $\mu = rac{c}{v}$।
4. **क्रांतिक कोण (Critical Angle - θ_c / i_c):** सघन माध्यम में बना वह आपतन कोण जिसके लिए विरल माध्यम में अपवर्तन कोण का मान 90° होता है, क्रांतिक कोण कहलाता है।
5. **पूर्ण आंतरिक परावर्तन (Total Internal Reflection):** जब प्रकाश किरण सघन माध्यम से विरल माध्यम में प्रवेश करती है और आपतन कोण का मान क्रांतिक कोण से अधिक होता है, तो प्रकाश किरण पूरी तरह सघन माध्यम में ही परावर्तित हो जाती है।
6. **प्रिस्म का कोण (Angle of Prism - A):** प्रिस्म के दो अपवर्तक पृष्ठों के बीच के कोण को प्रिस्म कोण कहते हैं।
7. **विचलन कोण (Angle of Deviation - δ):** आपतित किरण की प्रारंभिक दिशा तथा निर्गत किरण के बीच बने कोण को विचलन कोण कहते हैं।
8. **वर्ण विक्षेपण (Dispersion of Light):** जब श्वेत प्रकाश किसी प्रिस्म से गुजरता है तो वह अपने घटक सात रंगों में विभाजित हो जाता है। इस घटना को वर्ण विक्षेपण कहते हैं।
9. **लेंस की क्षमता (Power of Lens - P):** किसी लेंस द्वारा प्रकाश किरणों को अभिसरित या अपसरित करने की क्षमता की माप को लेंस की क्षमता कहते हैं। यह फोकस दूरी का व्युत्क्रम होती है ($P = 1/f$). इसका SI मात्रक **डायोप्टर (Diopter - D)** है।
10. **नेत्र की समंजन क्षमता (Power of Accommodation):** नेत्र लेंस की अपनी फोकस दूरी को समायोजित करके पास तथा दूर की वस्तुओं को स्पष्ट देखने की क्षमता को समंजन क्षमता कहते हैं।

3. महत्वपूर्ण सूत्र संग्रह (Master Formula Boxes)

1. दर्पण सूत्र एवं आवर्धन (Mirror Formula & Magnification)

- दर्पण सूत्र: $1/f = 1/v + 1/u$
- रेखीय आवर्धन (m): $m = -v/u = h'/h = (f - v)/f = f/(f - u)$
- वक्रता त्रिज्या एवं फोकस दूरी में संबंध: $f = R/2$

2. अपवर्तन एवं पूर्ण आंतरिक परावर्तन (Refraction & TIR)

- स्नेल का नियम: $\mu_{21} = \sin(i) / \sin(r) = \mu_2 / \mu_1$
- वास्तविक तथा आभासी गहराई: $\mu =$ (वास्तविक गहराई) / (आभासी गहराई) $= h / h'$
- क्रांतिक कोण तथा अपवर्तनांक में संबंध: $\sin(i_c) = 1 / \mu$

3. गोलीय पृष्ठ से अपवर्तन एवं लेंस मेकर सूत्र (Lens Maker Formula)

- एकल गोलीय अपवर्तक पृष्ठ: $(\mu_2 / v) - (\mu_1 / u) = (\mu_2 - \mu_1) / R$
- लेंस मेकर सूत्र: $1/f = (\mu - 1) [1/R_1 - 1/R_2]$
- पतला लेंस सूत्र: $1/f = 1/v - 1/u$
- लेंस की क्षमता: $P \text{ (in D)} = 1 / f \text{ (in m)} = 100 / f \text{ (in cm)}$
- संपर्क में रखे दो पतले लेंसों का संयोजन: $1/F = 1/f_1 + 1/f_2 \implies P = P_1 + P_2$

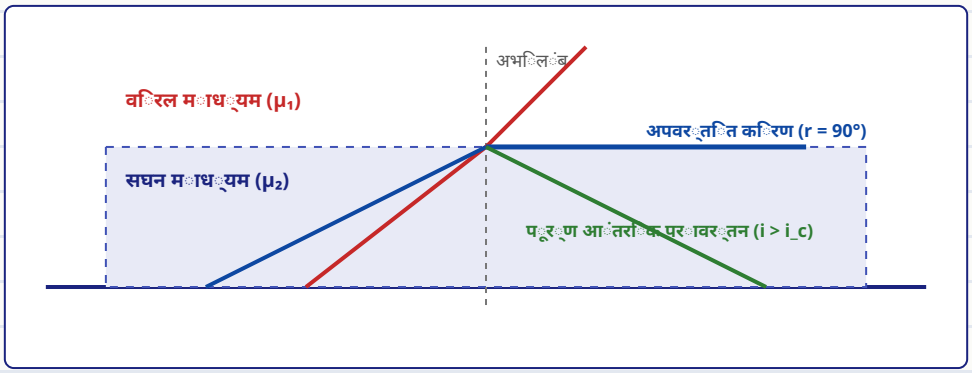
4. प्रिस्म द्वारा अपवर्तन (Prism Refraction)

- प्रिस्म का अपवर्तनांक सूत्र: $\mu = \sin[(A + \delta_m)/2] / \sin(A/2)$
- पतले प्रिस्म द्वारा विचलन ($A < 10^\circ$): $\delta = (\mu - 1) A$
- कोणीय वर्ण विक्षेपण: $\theta = \delta_v - \delta_r = (\mu_v - \mu_r) A$
- वर्ण विक्षेपण क्षमता: $\omega = (\mu_v - \mu_r) / (\mu_y - 1)$

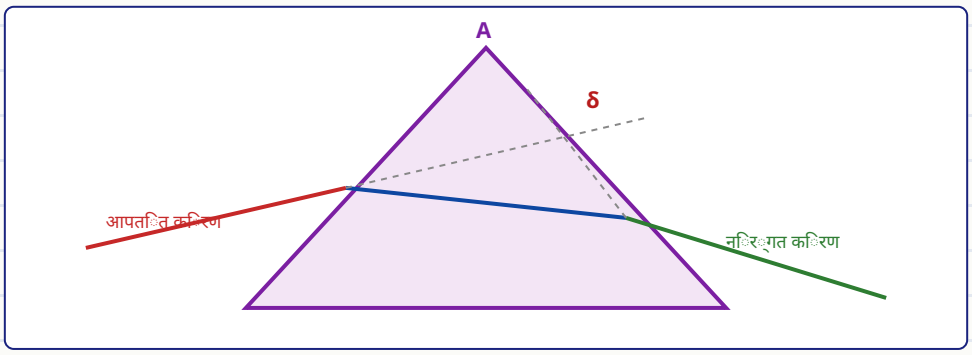
5. प्रकाशिक यंत्र (Optical Instruments)

- **सरल सूक्ष्मदर्शी (Simple Microscope):**
  - जब अंतिम प्रतिबिंब स्पष्ट दृष्टि की न्यूनतम दूरी ($D = 25 \text{ cm}$) पर बने: $M = 1 + D/f$
  - जब अंतिम प्रतिबिंब अनंत पर बने (सामान्य समायोजन): $M = D/f$
- **संयुक्त सूक्ष्मदर्शी (Compound Microscope):**
  - स्पष्ट दृष्टि की न्यूनतम दूरी पर: $M = - (v_0 / u_0) [1 + D / f_e]$
  - अनंत पर (सामान्य समायोजन): $M = - (v_0 / u_0) \times (D / f_e) \approx - (L / f_0) \times (D / f_e)$
  - नली की लंबाई: $L = v_0 + |u_e|$ (सामान्य समायोजन हेतु $L = v_0 + f_e$)
- **खगोलीय दूरदर्शी (Astronomical Telescope):**
  - सामान्य समायोजन (अंतिम प्रतिबिंब अनंत पर): $M = - f_0 / f_e$, नली की लंबाई $L = f_0 + f_e$
  - स्पष्ट दृष्टि की न्यूनतम दूरी पर: $M = - (f_0 / f_e) [1 + f_e / D]$, नली की लंबाई $L = f_0 + |u_e|$

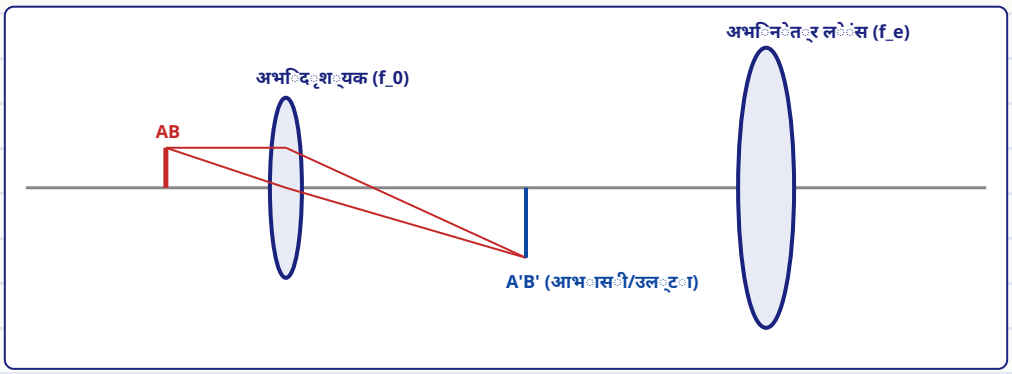
4. आवश्यक हस्तलिखित रेखाचित्र (Optical Diagrams)



चित्रांकन 1: प्रकाश का अपवर्तन, क्रांतिक कोण (i_c) एवं पूर्ण आंतरिक परावर्तन (TIR)



चित्रांकन 2: प्रिस्म द्वारा अपवर्तन एवं विचलन कोण (δ)



चित्रांकन 3: संयुक्त सूक्ष्मदर्शी का किरण आरेख (Compound Microscope)

5. बोर्ड परीक्षा हेतु 30 महत्वपूर्ण प्रश्न एवं उत्तर (2, 3, 4, 5 अंक अनुसार)

--- अति लघु उत्तरीय प्रश्न (2 अंक) ---

प्रश्न 1: प्रकाश के परावर्तन के नियम लिखिए। 2 अंक

उत्तर: परावर्तन के दो मुख्य नियम हैं:

1. आपतित किरण, परावर्तित किरण तथा आपतन बिंदु पर खींचा गया अभिलंब तीनों एक ही तल में होते हैं।
2. आपतन कोण (i) का मान हमेशा परावर्तन कोण (r) के बराबर होता है ($i = r$)।

प्रश्न 2: पूर्ण आंतरिक परावर्तन की दो आवश्यक शर्तें लिखिए। 2 अंक

उत्तर:

1. प्रकाश किरण को सघन माध्यम से विरल माध्यम में जाना चाहिए।
2. सघन माध्यम में आपतन कोण का मान दोनों माध्यमों के क्रांतिक कोण (i_c) से अधिक होना चाहिए ($i > i_c$)।

प्रश्न 3: क्रांतिक कोण की परिभाषा लिखिए तथा इसका अपवर्तनांक से संबंध बताइए। 2 अंक

उत्तर: सघन माध्यम में बना वह आपतन कोण जिसके लिए विरल माध्यम में अपवर्तन कोण 90° होता है, क्रांतिक कोण (i_c) कहलाता है।
संबंध: $\sin(i_c) = rac{1}{\mu}$ या $\mu = rac{1}{\sin(i_c)}$।

प्रश्न 4: ऑप्टिकल फाइबर (प्रकाशिक तंतु) किस सिद्धांत पर कार्य करता है? इसके दो उपयोग लिखिए। 2 अंक

उत्तर: ऑप्टिकल फाइबर **पूर्ण आंतरिक परावर्तन (Total Internal Reflection)** के सिद्धांत पर कार्य करता है।
उपयोग: (i) दूरसंचार में उच्च गति डेटा प्रेषित करने हेतु, (ii) चिकित्सा क्षेत्र में एंडोस्कोपी (Endoscopy) द्वारा शरीर के आंतरिक अंगों को देखने में।

प्रश्न 5: लेंस की क्षमता (Power of Lens) को परिभाषित कीजिए तथा इसका मात्रक लिखिए। 2 अंक

उत्तर: किसी लेंस की मीटर में मापी गई फोकस दूरी के व्युत्क्रम को लेंस की क्षमता कहते हैं।
सूत्र: $P = rac{1}{f ext{ (मीटर में)}}$
मात्रक: इसका SI मात्रक **डायोप्टर (Diopter - D)** है। उत्तर लेंस हेतु क्षमता धनात्मक (+) तथा अवतल लेंस हेतु ऋणात्मक (-) होती है।

प्रश्न 6: उत्तल लेंस को पानी में डुबोने पर उसकी फोकस दूरी पर क्या प्रभाव पड़ता है? 2 अंक

उत्तर: जब उत्तल लेंस को पानी (या किसी अन्य द्रव जिसका अपवर्तनांक कांच से कम है) में डुबोया जाता है, तो लेंस के पदार्थ का आपेक्षिक अपवर्तनांक घट जाता है। लेंस मेकर सूत्र $ rac{1}{f} = (\mu - 1)\left(rac{1}{R_1} - rac{1}{R_2} ight)$ के अनुसार अपवर्तनांक घटने पर **फोकस दूरी बढ़ जाती है** (लगभग 4 गुना हो जाती है) और लेंस की क्षमता घट जाती है।

प्रश्न 7: प्राथमिक तथा द्वितीयक इंद्रधनुष में दो मुख्य अंतर लिखिए। 2 अंक

उत्तर:

गुण	प्राथमिक इंद्रधनुष	द्वितीयक इंद्रधनुष
परावर्तन की संख्या	बूंद के अंदर 1 बार पूर्ण आंतरिक परावर्तन	बूंद के अंदर 2 बार पूर्ण आंतरिक परावर्तन
तीव्रता/रंग क्रम	अधिक तीव्र, बाहर लाल व अंदर बैंगनी	कम तीव्र (हल्का), बाहर बैंगनी व अंदर लाल

प्रश्न 8: खतरे का संकेत (Sign Board) लाल रंग का ही क्यों बनाया जाता है? 2 अंक

उत्तर: रैले के प्रकीर्णन नियमानुसार, प्रकीर्णित प्रकाश की मात्रा तरंगदैर्ध्य की चतुर्थ घात के व्युत्क्रमानुपाती होती है ($I \propto rac{1}{\lambda^4}$)। चूंकि लाल रंग की तरंगदैर्ध्य दृश्य प्रकाश में सबसे अधिक होती है, इसलिए इसका प्रकीर्णन सबसे कम होता है और यह कोहरे/धुएँ में भी दूर से स्पष्ट दिखाई देता है।

प्रश्न 9: समतल दर्पण की फोकस दूरी तथा आवर्धन का मान कितना होता है? 2 अंक

उत्तर: समतल दर्पण की फोकस दूरी **अनंत (∞)** होती है तथा रेखीय आवर्धन का मान **$+1$** होता है। ($+1$ दर्शाती है कि प्रतिबिंब सीधा, आभासी तथा वस्तु के बराबर आकार का बनता है)।

प्रश्न 10: समंजन क्षमता से आप क्या समझते हैं? स्पष्ट दृष्टि की न्यूनतम दूरी कितनी होती है? 2 अंक

उत्तर: सिलियरी मांसपेशियों की सहायता से नेत्र लेंस की अपनी फोकस दूरी को आवश्यकतानुसार बदलने की क्षमता को समंजन क्षमता कहते हैं। एक सामान्य स्वस्थ मानव नेत्र के लिए स्पष्ट दृष्टि की न्यूनतम दूरी **$D = 25 ext{ cm}$** होती है।

--- लघु उत्तरीय प्रश्न (3 अंक) ---

प्रश्न 11: स्नेल का अपवर्तन का नियम लिखिए तथा सिद्ध कीजिए कि $_1\mu_2 imes _2\mu_1 = 1$। 3 अंक

उत्तर: स्नेल का नियम: किन्हीं दो माध्यमों और एक निश्चित रंग के प्रकाश के लिए आपतन कोण की ज्या ($\sin i$) तथा अपवर्तन कोण की ज्या ($\sin r$) का अनुपात एक नियतांक होता है।
$$ rac{\sin i}{\sin r} = _1\mu_2 = rac{\mu_2}{\mu_1}$$ **उत्क्रमणीयता का सिद्धांत:** जब प्रकाश किरण प्रथम माध्यम (1) से द्वितीय माध्यम (2) में जाती है: $$_1\mu_2 = rac{\sin i}{\sin r} \quad ext{--- (1)}$$ यदि किरण के पथ को उलट दिया जाए तो वह माध्यम (2) से (1) में प्रवेश करेगी: $$_2\mu_1 = rac{\sin r}{\sin i} \quad ext{--- (2)}$$ समीकरण (1) तथा (2) का गुणा करने पर: $$_1\mu_2 imes _2\mu_1 = \left(rac{\sin i}{\sin r} ight) imes \left(rac{\sin r}{\sin i} ight) = 1$$ $$\Rightarrow _1\mu_2 = rac{1}{_2\mu_1} \quad ext{(इति सिद्धम)}$$

प्रश्न 12: वास्तविक गहराई और आभासी गहराई में संबंध स्थापित कीजिए। 3 अंक

उत्तर: माना कि सघन माध्यम (जैसे जल, अपवर्तनांक μ) में h गहराई पर एक बिंदु वस्तु O स्थित है। जब इसे विरल माध्यम (वायु) से देखा जाता है, तो अपवर्तन के कारण यह बिंदु I पर आभासी रूप से ऊपर उठा हुआ प्रतीत होता है।
स्नेल के नियमानुसार: $$\mu = rac{\sin r}{\sin i}$$ छोटे आपतन कोणों के लिए $\sin i pprox an i$ तथा $\sin r pprox an r$।
चित्र की ज्यामिति से: $$ an i = rac{x}{h} \quad ext{और} \quad an r = rac{x}{h'}$$ जहाँ h = वास्तविक गहराई (OA) तथा h' = आभासी गहराई (IA)। $$\mu = rac{ an r}{ an i} = rac{x/h'}{x/h} = rac{h}{h'}$$ $$ herefore \mu = rac{ ext{वास्तविक गहराई}}{ ext{आभासी गहराई}}$$ विस्थापन (Apparent Shift) $d = h - h' = h \left(1 - rac{1}{\mu} ight)$।

प्रश्न 13: संपर्क में रखे दो पतले उत्तल लेंसों की संयुक्त फोकस दूरी का व्यंजक प्राप्त कीजिए। 3 अंक

उत्तर: माना दो पतले लेंस L_1 और L_2 जिनकी फोकस दूरियाँ क्रमशः f_1 व f_2 हैं, एक-दूसरे से सटाकर रखे गए हैं।
1. पहले लेंस L_1 के लिए बिंदु वस्तु O का प्रतिबिंब I' पर बनता है (v' दूरी पर): $$ rac{1}{f_1} = rac{1}{v'} - rac{1}{u} \quad ext{--- (1)}$$ 2. यह प्रतिबिंब I' दूसरे लेंस L_2 के लिए आभासी वस्तु का कार्य करता है तथा अंतिम प्रतिबिंब I दूरी v पर बनता है: $$ rac{1}{f_2} = rac{1}{v} - rac{1}{v'} \quad ext{--- (2)}$$ समीकरण (1) और (2) को जोड़ने पर: $$ rac{1}{f_1} + rac{1}{f_2} = \left(rac{1}{v'} - rac{1}{u} ight) + \left(rac{1}{v} - rac{1}{v'} ight) = rac{1}{v} - rac{1}{u}$$ यदि संयोजन की तुल्य फोकस दूरी F हो, तो पतला लेंस सूत्र $ rac{1}{F} = rac{1}{v} - rac{1}{u}$ से: $$ rac{1}{F} = rac{1}{f_1} + rac{1}{f_2}$$ क्षमता के रूप में: $P = P_1 + P_2$।

प्रश्न 14: कोणीय वर्ण विक्षेपण ($ heta$) एवं वर्ण विक्षेपण क्षमता (ω) की परिभाषा तथा सूत्र लिखिए। 3 अंक

उत्तर:
1. कोणीय वर्ण विक्षेपण ($ heta$): प्रिस्म से निर्गत बैंगनी तथा लाल रंग की किरणों के बीच बने कोण को कोणीय वर्ण विक्षेपण कहते हैं। $$ heta = \delta_v - \delta_r = (\mu_v - \mu_r)A$$ **2. वर्ण विक्षेपण क्षमता (ω):** बैंगनी और लाल किरणों के कोणीय वर्ण विक्षेपण ($ heta$) तथा माध्य किरण (पीले रंग) के विचलन (δ_y) के अनुपात को वर्ण विक्षेपण क्षमता कहते हैं। $$ \omega = rac{\delta_v - \delta_r}{\delta_y} = rac{\mu_v - \mu_r}{\mu_y - 1}$$ नोट: वर्ण विक्षेपण क्षमता एक मात्रकहीन तथा विमाहीन राशि है और यह प्रिस्म कोण *A* पर निर्भर नहीं करती।

प्रश्न 15: परावर्ती दूरदर्शी (Reflecting Telescope) के दो मुख्य लाभ लिखिए अपवर्ती दूरदर्शी की तुलना में। 3 अंक

उत्तर:
1. **वर्ण विपथन (Chromatic Aberration) का न होना:** परावर्ती दूरदर्शी में मुख्य अभिदृश्यक के रूप में परवलयाकार अवतल दर्पण का प्रयोग किया जाता है, इसलिए इसमें अपवर्तन न होने के कारण वर्ण विपथन का दोष पूर्णतः समाप्त हो जाता है।

2. **गोलीय विपथन (Spherical Aberration) में कमी:** परवलयाकार दर्पण का उपयोग करने से गोलीय विपथन भी दूर हो जाता है।
3. **उच्च विभेदन क्षमता व हल्का आकार:** बड़े आकार के लेंसों की तुलना में बड़े दर्पण बनाना और उन्हें सहारा देना अत्यधिक सरल तथा सस्ता होता है।

--- दीर्घ उत्तरीय प्रश्न (4 एवं 5 अंक) ---

प्रश्न 16: किसी गोलीय अपवर्तक पृष्ठ पर अपवर्तन के लिए सूत्र $ rac{\mu_2}{v} - rac{\mu_1}{u} = rac{\mu_2 - \mu_1}{R}$ व्युत्पन्न कीजिए। 5 अंक

उत्तर (निगमन):
माना SPS' एक उत्तल गोलीय अपवर्तक पृष्ठ है जो दो माध्यमों μ_1 (विरल) तथा μ_2 (सघन) को अलग करता है। पृष्ठ का ध्रुव P तथा वक्रता केंद्र C है ($PC = +R$)।
मुख्य अक्ष पर u दूरी पर एक बिंदु वस्तु O रखी है। बिंदु O से चलने वाली आपतित किरण OA पृष्ठ के बिंदु A पर आपतित होती है और अभिलंब AC की ओर झुककर बिंदु I पर प्रतिबिंब बनाती है ($PI = +v$)।
माना आपतन कोण $= i$, अपवर्तन कोण $= r$।
माना $ ngle AOP = lpha$, $ ngle AIP = eta$, $ ngle ACP = \gamma$।
त्रिभुज ΔAOC में, बहिष्कोण प्रमेय से: $i = lpha + \gamma$ \quad --- (1)
त्रिभुज ΔAIC में, $\gamma = r + eta \Rightarrow r = \gamma - eta$ \quad --- (2)
स्नेल के नियमानुसार: $ rac{\sin i}{\sin r} = rac{\mu_2}{\mu_1}$
यदि द्वार बहुत छोटा हो, तो $\sin i pprox i$ तथा $\sin r pprox r$: $$\mu_1 i = \mu_2 r$$ समीकरण (1) व (2) से i तथा r के मान रखने पर: $$\mu_1 (lpha + \gamma) = \mu_2 (\gamma - eta)$$ $$\mu_1 lpha + \mu_2 eta = (\mu_2 - \mu_1)\gamma \quad ext{--- (3)}$$ कोण = चाप / त्रिज्या सिद्धांत से ($ lpha pprox an lpha = rac{AP}{-u}$, $ eta pprox an eta = rac{AP}{v}$, $\gamma pprox an\gamma = rac{AP}{R}$): $$\mu_1 \left(rac{AP}{-u} ight) + \mu_2 \left(rac{AP}{v} ight) = (\mu_2 - \mu_1) \left(rac{AP}{R} ight)$$ AP से दोनों तरफ भाग देने पर: $$ rac{\mu_2}{v} - rac{\mu_1}{u} = rac{\mu_2 - \mu_1}{R}$$ **(इति सिद्धम)**

प्रश्न 17: पतले लेंस के लिए लेंस मेकर का सूत्र $ rac{1}{f} = (\mu - 1)\left(rac{1}{R_1} - rac{1}{R_2} ight)$ स्थापित कीजिए। 5 अंक

उत्तर (निगमन):
माना μ अपवर्तनांक वाले पदार्थ का एक पतला लेंस वायु ($\mu_1 = 1$) में रखा है। लेंस के दो गोलीय पृष्ठों की वक्रता त्रिज्याएँ R_1 तथा R_2 हैं।
1. प्रथम पृष्ठ (R_1) द्वारा अपवर्तन:
वस्तु O का प्रतिबिंब I' पर बनता है (v' दूरी पर)। गोलीय पृष्ठ के सूत्र से: $$ rac{\mu}{v'} - rac{1}{u} = rac{\mu - 1}{R_1} \quad ext{--- (1)}$$ **2. द्वितीय पृष्ठ (R_2) द्वारा अपवर्तन:**
प्रतिबिंब I' द्वितीय पृष्ठ के लिए आभासी वस्तु का कार्य करता है और अंतिम प्रतिबिंब I दूरी v पर बनता है। इस बार प्रकाश कांच (μ) से वायु (1) में जा रहा है: $$ rac{1/\mu}{v} - rac{1}{v'} = rac{1/\mu - 1}{R_2}$$ दोनों पक्षों में μ से गुणा करने पर: $$ rac{1}{v} - rac{\mu}{v'} = rac{1 - \mu}{R_2} = - rac{\mu - 1}{R_2} \quad ext{--- (2)}$$ समीकरण (1) तथा (2) को जोड़ने पर: $$\left(rac{\mu}{v'} - rac{1}{u} ight) + \left(rac{1}{v} - rac{\mu}{v'} ight) = (\mu - 1)\left(rac{1}{R_1} - rac{1}{R_2} ight)$$ $$ rac{1}{v} - rac{1}{u} = (\mu - 1)\left(rac{1}{R_1} - rac{1}{R_2} ight)$$ यदि वस्तु अनंत पर स्थित हो ($u = \infty$), तो प्रतिबिंब फोकस पर बनेगा ($v = f$): $$ rac{1}{f} = (\mu - 1)\left(rac{1}{R_1} - rac{1}{R_2} ight)$$ **(इति सिद्धम)**

प्रश्न 18: प्रिस्म के अपवर्तनांक के लिए व्यंजक $\mu = rac{\sin\left(rac{A + \delta_m}{2} ight)}{\sin\left(rac{A}{2} ight)}$ स्थापित कीजिए। 5 अंक

उत्तर (निगमन):
माना ABC एक प्रिस्म का मुख्य परिच्छेद है जिसका प्रिस्म कोण A है।
चित्र की ज्यामिति से कुल विचलन कोण: $$\delta = (i_1 - r_1) + (i_2 - r_2) = (i_1 + i_2) - (r_1 + r_2) \quad ext{--- (1)}$$ चतुर्भुज $AQMR$ में $ ngle A + ngle QMR = 180^\circ$ तथा त्रिभुज ΔQMR में $r_1 + r_2 + ngle QMR = 180^\circ$।
अतः: $$r_1 + r_2 = A \quad ext{--- (2)}$$ समीकरण (2) को (1) में रखने पर: $$\delta = i_1 + i_2 - A \quad \Rightarrow \quad A + \delta = i_1 + i_2 \quad ext{--- (3)}$$ **न्यूनतम विचलन की स्थिति में ($\delta = \delta_m$):**
इस स्थिति में आपतन कोण तथा निर्गत कोण बराबर होते हैं ($i_1 = i_2 = i$) और अपवर्तन कोण भी समान होते हैं ($r_1 = r_2 = r$)।

समीकरण (2) से: $r + r = A \Rightarrow 2r = A \Rightarrow r = rac{A}{2}$
समीकरण (3) से: $A + \delta_m = i + i = 2i \Rightarrow i = rac{A + \delta_m}{2}$
स्नेल के नियमानुसार प्रिस्म का अपवर्तनांक: $$\mu = rac{\sin i}{\sin r} = rac{\sin\left(rac{A + \delta_m}{2} ight)}{\sin\left(rac{A}{2} ight)}$$ **(इति सिद्धम)**

प्रश्न 19: संयुक्त सूक्ष्मदर्शी (Compound Microscope) की रचना, किरण आरेख तथा आवर्धन क्षमता के सूत्र का निगमन दोनों स्थितियों में कीजिए। 5 अंक

उत्तर:
सिद्धांत व संरचना: इसमें दो उत्तल लेंस होते हैं। वस्तु की ओर वाले छोटे द्वारक व छोटी फोकस दूरी के लेंस को **अभिदृश्यक (O)** तथा आँख की ओर वाले बड़े द्वारक व मध्यम फोकस दूरी के लेंस को **अभिनेत्र लेंस (E)** कहते हैं।
आवर्धन क्षमता का निगमन: $$ ext{आवर्धन क्षमता } M = rac{ eta}{ lpha} pprox rac{ an eta}{ an lpha}$$ जहाँ $ an eta = rac{h''}{D}$ (अंतिम प्रतिबिंब द्वारा निर्मित कोण) तथा $ an lpha = rac{h}{D}$ (वस्तु द्वारा बिना यंत्र के निर्मित कोण)। $$M = rac{h''/D}{h/D} = rac{h''}{h} = \left(rac{h'}{h} ight) imes \left(rac{h''}{h'} ight) = m_0 imes m_e$$ चूंकि अभिदृश्यक का आवर्धन $m_0 = - rac{v_0}{u_0}$ तथा अभिनेत्र लेंस का आवर्धन $m_e = rac{v_e}{u_e}$। $$ herefore M = - rac{v_0}{u_0} \cdot rac{v_e}{u_e}$$
स्थिति I: जब अंतिम प्रतिबिंब स्पष्ट दृष्टि की न्यूनतम दूरी (D) पर बने:
अभिनेत्र लेंस के लिए $ rac{1}{v_e} - rac{1}{u_e} = rac{1}{f_e} \Rightarrow - rac{1}{D} - \left(- rac{1}{u_e} ight) = rac{1}{f_e} \Rightarrow rac{1}{u_e} = rac{1}{D} + rac{1}{f_e}$
दोनों तरफ D से गुणा करने पर: $ rac{D}{u_e} = 1 + rac{D}{f_e}$ $$\mathbf{M = - rac{v_0}{u_0} \left(1 + rac{D}{f_e} ight)}$$
स्थिति II: जब अंतिम प्रतिबिंब अनंत पर बने (शांत नेत्र हेतु):
यहाँ $u_e = f_e$: $$\mathbf{M = - rac{v_0}{u_0} \left(rac{D}{f_e} ight) pprox - rac{L}{f_0} \cdot rac{D}{f_e}}$$

प्रश्न 20: खगोलीय दूरदर्शी (Astronomical Telescope) का किरण आरेख खींचिए तथा सामान्य समायोजन (अनंत पर अंतिम प्रतिबिंब) की स्थिति में आवर्धन क्षमता एवं नली की लंबाई का सूत्र व्युत्पन्न कीजिए। 5 अंक

उत्तर:
संरचना: इसमें बड़े द्वारक तथा बड़ी फोकस दूरी (f_0) वाला अभिदृश्यक लेंस तथा छोटे द्वारक व छोटी फोकस दूरी (f_e) वाला अभिनेत्र लेंस होता है।
आवर्धन क्षमता (M): $$M = rac{ eta}{ lpha} pprox rac{ an eta}{ an lpha}$$ चित्र की ज्यामिति से: $$ an lpha = rac{A'B'}{f_0} \quad ext{तथा} \quad an eta = rac{A'B'}{-u_e}$$ $$M = rac{A'B'/(-u_e)}{A'B'/f_0} = - rac{f_0}{u_e}$$ **1. सामान्य समायोजन में (जब अंतिम प्रतिबिंब अनंत पर बने):**
इस स्थिति में अभिनेत्र लेंस के लिए $u_e = f_e$। $$\mathbf{M = - rac{f_0}{f_e}}$$ नली की कुल लंबाई $\mathbf{L = f_0 + f_e}$।
2. जब अंतिम प्रतिबिंब D (25 cm) पर बने: $$\mathbf{M = - rac{f_0}{f_e}\left(1 + rac{f_e}{D} ight)}$$ नली की लंबाई $\mathbf{L = f_0 + |u_e|}$।

प्रश्न 21: पूर्ण आंतरिक परावर्तन पर आधारित दो प्राकृतिक घटनाओं के नाम लिखिए। 2 अंक

उत्तर: 1. रेगिस्तान में मरीचिका (Mirage) का दिखना। 2. हीरे का अत्यधिक जगमगाना/चमकना।

प्रश्न 22: लेंस संयोजन से आप क्या समझते हैं? दो लेंसों को संपर्क में रखने पर क्षमता तथा आवर्धन पर क्या प्रभाव पड़ता है? 3 अंक

उत्तर: दो या दो से अधिक लेंसों को मिलाकर एक प्रकाशिक निकाय बनाना लेंस संयोजन कहलाता है।
• कुल क्षमता: $P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots$ (समान योग)
• कुल रेखीय आवर्धन: $M = m_1 imes m_2 imes m_3 imes \dots$ (गुणनफल)

प्रश्न 23: प्राथमिक तथा द्वितीयक फोकसों से क्या अभिप्राय है? 2 अंक

उत्तर:
• **प्रथम मुख्य फोकस (F_1):** मुख्य अक्ष पर स्थित वह बिंदु जहाँ से चलने वाली (या जिसकी ओर जाती प्रतीत होने वाली) किरणें लेंस से अपवर्तन के पश्चात मुख्य अक्ष के समांतर हो जाती हैं।
• **द्वितीय मुख्य फोकस (F_2):** मुख्य अक्ष के समांतर आने वाली किरणें लेंस से अपवर्तन के पश्चात जिस बिंदु पर मिलती हैं (या मिलती हुई प्रतीत होती हैं)। इसे ही मुख्य फोकस माना जाता है।

प्रश्न 24: प्रकाश का प्रकीर्णन (Scattering) क्या है? रैले का प्रकीर्णन नियम लिखिए। 3 अंक

उत्तर: जब प्रकाश किरणें किसी ऐसे माध्यम से गुजरती हैं जिसमें अति सूक्ष्म कण (जैसे धूल, धुएँ के कण) विद्यमान हों, तो प्रकाश सभी दिशाओं में फैल जाता है। इस घटना को प्रकीर्णन कहते हैं।
रैले का नियम: यदि प्रकीर्णक कणों का आकार प्रकाश की तरंगदैर्ध्य λ से बहुत छोटा हो, तो प्रकीर्णित प्रकाश की तीव्रता (I) तरंगदैर्ध्य की चतुर्थ घात के व्युत्क्रमानुपाती होती है: $$I \propto rac{1}{\lambda^4}$$

प्रश्न 25: किसी अवतल दर्पण के जल में डुबोने पर उसकी फोकस दूरी पर क्या प्रभाव पड़ेगा? 2 अंक

उत्तर: कोई प्रभाव नहीं पड़ेगा। क्योंकि दर्पण की फोकस दूरी $f = R/2$ केवल दर्पण की वक्रता त्रिज्या पर निर्भर करती है, माध्यम के अपवर्तनांक पर नहीं।

प्रश्न 26: सूर्योदय एवं सूर्यास्त के समय सूर्य लाल क्यों दिखाई देता है? 3 अंक

उत्तर: सूर्योदय व सूर्यास्त के समय सूर्य क्षितिज के पास होता है, जिससे प्रकाश किरणों को वायुमंडल में अत्यधिक दूरी तय करनी पड़ती है। कम तरंगदैर्ध्य वाले रंग (नीला, बैंगनी) रास्ते में प्रकीर्णित होकर फैल जाते हैं। केवल सबसे अधिक तरंगदैर्ध्य वाला लाल प्रकाश ही हमारी आँखों तक पहुँच पाता है, जिससे सूर्य रक्ताभ (लाल) दिखाई देता है।

प्रश्न 27: किसी पतले प्रिस्म का कोण 6° है और अपवर्तनांक 1.5 है। विचलन कोण की गणना कीजिए। 2 अंक

उत्तर: पतले प्रिस्म हेतु विचलन सूत्र: $\delta = (\mu - 1) A$
दिया है: $A = 6^\circ$, $\mu = 1.5$
$\delta = (1.5 - 1) imes 6^\circ = 0.5 imes 6^\circ = \mathbf{3^\circ}$।

प्रश्न 28: सूक्ष्मदर्शी की विभेदन सीमा तथा विभेदन क्षमता को समझाइए। 3 अंक

उत्तर:
• **विभेदन**
सीमा: दो पास-पास स्थित वस्तुओं के बीच की वह न्यूनतम दूरी जिसे सूक्ष्मदर्शी द्वारा अलग-अलग स्पष्ट देखा जा सके। $\Delta d =

rac{\lambda}{2\mu \sin heta}$।

• **विभेदन क्षमता:** विभेदन सीमा के व्युत्क्रम को विभेदन क्षमता कहते हैं: $ ext{विभेदन क्षमता} = rac{1}{\Delta d} = rac{2\mu \sin heta}{\lambda}$।

प्रश्न 29: आकाश का रंग नीला क्यों दिखाई देता है? 2 अंक

उत्तर: वायुमंडल में उपस्थित नाइट्रोजन व ऑक्सीजन के अणु नीले व बैंगनी रंग (कम तरंगादैर्ध्य) का प्रकीर्णन लाल रंग की तुलना में बहुत अधिक करते हैं। यह प्रकीर्णित नीला प्रकाश चारों ओर फैल जाता है, जिससे आकाश नीला दिखाई देता है।

प्रश्न 30: अवतल दर्पण के लिए दर्पण सूत्र $ rac{1}{f} = rac{1}{v} + rac{1}{u}$ सिद्ध कीजिए। 3 अंक

उत्तर: माना एक अवतल दर्पण जिसका ध्रुव P, वक्रता केंद्र C और फोकस F है। मुख्य अक्ष पर u दूरी पर वस्तु AB रखी है, जिसका वास्तविक प्रतिबिंब $A'B'$ दूरी v पर बनता है।
समरूप त्रिभुज ΔABC तथा $\Delta A'B'C$ में: $$ rac{AB}{A'B'} = rac{CB}{CB'} = rac{PB - PC}{PC - PB'} \quad ext{--- (1)}$$ समरूप त्रिभुज ΔABP तथा $\Delta A'B'P$ में: $$ rac{AB}{A'B'} = rac{PB}{PB'} \quad ext{--- (2)}$$ समीकरण (1) तथा (2) की तुलना से: $$ rac{PB - PC}{PC - PB'} = rac{PB}{PB'}$$ चिह्न परिपाटी के अनुसार: $PB = -u$, $PB' = -v$, $PC = -R = -2f$। $$ rac{-u - (-2f)}{-2f - (-v)} = rac{-u}{-v} \Rightarrow rac{-u + 2f}{-2f + v} = rac{u}{v}$$ तिर्यक गुणा करने पर: $$-uv + 2fv = -2fu + uv \Rightarrow 2f u + 2f v = 2uv$$ दोनों तरफ $2uvf$ से भाग देने पर: $$\mathbf{ rac{1}{f} = rac{1}{v} + rac{1}{u}} \quad ext{(इति सिद्धम)}$$

6. बोर्ड परीक्षा हेतु हल सहित महत्वपूर्ण आंकिक प्रश्न (Solved Numericals)

प्रश्न: एक उत्तल लेंस की वायु में फोकस दूरी $20 ext{ cm}$ है। इसे पानी ($\mu_w = 4/3$) में डुबाने पर इसकी नई फोकस दूरी क्या होगी? (कांच का अपवर्तनांक $\mu_g = 3/2$) आंकिक प्रश्न 1

हल:
1. वायु में लेंस मेकर सूत्र से: $$ rac{1}{f_a} = (_a\mu_g - 1)\left(rac{1}{R_1} - rac{1}{R_2} ight)$$ $$ rac{1}{20} = \left(rac{3}{2} - 1 ight) K = rac{1}{2} K \quad \Rightarrow \quad K = rac{1}{10}$$ 2. जल में लेंस मेकर सूत्र से: $$ rac{1}{f_w} = (_w\mu_g - 1) K = \left(rac{_a\mu_g}{_a\mu_w} - 1 ight) K$$ $$_w\mu_g = rac{3/2}{4/3} = rac{9}{8}$$ $$ rac{1}{f_w} = \left(rac{9}{8} - 1 ight) imes rac{1}{10} = rac{1}{8} imes rac{1}{10} = rac{1}{80}$$ $$\mathbf{f_w = 80 ext{ cm}}$$ **उत्तर:** जल में डुबोने पर लेंस की फोकस दूरी $80 ext{ cm}$ (चार गुनी) हो जाएगी।

प्रश्न: $+5 ext{ D}$ तथा $-3 ext{ D}$ क्षमता के दो पतले लेंसों को परस्पर सटाकर रखा गया है। संयोजन की तुल्य फोकस दूरी तथा प्रकृति ज्ञात कीजिए। आंकिक प्रश्न 2

हल:
दी गई क्षमताएँ: $P_1 = +5 ext{ D}$, $P_2 = -3 ext{ D}$
संयोजन की कुल क्षमता $P = P_1 + P_2 = +5 - 3 = \mathbf{+2 ext{ D}}$।
तुल्य फोकस दूरी $F = rac{100}{P ext{ (in D)}} = rac{100}{+2} = \mathbf{+50 ext{ cm}}$।
प्रकृति: चूंकि कुल फोकस दूरी धनात्मक (+) है, इसलिए यह संयोजन **अभिसारी (उत्तल लेंस)** की भांति कार्य करेगा।

प्रश्न: एक 60° कोण वाले प्रिस्म का न्यूनतम विचलन कोण 30° है। प्रिस्म के पदार्थ का अपवर्तनांक ज्ञात कीजिए। ($\sin 45^\circ = 1/\sqrt{2}$, $\sin 30^\circ = 1/2$) आंकिक प्रश्न 3

हल:
दिया है: प्रिस्म कोण $A = 60^\circ$, न्यूनतम विचलन कोण $\delta_m = 30^\circ$
सूत्र: $\mu = rac{\sin\left(rac{A + \delta_m}{2} ight)}{\sin\left(rac{A}{2} ight)}$ $$\mu = rac{\sin\left(rac{60^\circ + 30^\circ}{2} ight)}{\sin\left(rac{60^\circ}{2} ight)} = rac{\sin(45^\circ)}{\sin(30^\circ)}$$ $$\mu = rac{1/\sqrt{2}}{1/2} = rac{2}{\sqrt{2}} = \mathbf{\sqrt{2} pprox 1.414}$$ **उत्तर:** प्रिस्म के पदार्थ का अपवर्तनांक 1.414 है।

प्रश्न: एक संयुक्त सूक्ष्मदर्शी के अभिदृश्यक लेंस की फोकस दूरी $1 ext{ cm}$ तथा अभिनेत्र लेंस की फोकस दूरी $2.5 ext{ cm}$ है। यदि नली की लंबाई $15 ext{ cm}$ हो और अंतिम प्रतिबिंब अनंत पर बने, तो आवर्धन क्षमता की गणना कीजिए। आंकिक प्रश्न 4

हल:
दिया है: $f_0 = 1 ext{ cm}$, $f_e = 2.5 ext{ cm}$, $D = 25 ext{ cm}$, नली की लंबाई $L pprox v_0 = 15 ext{ cm}$
अनंत पर प्रतिबिंब बनने की स्थिति में आवर्धन क्षमता सूत्र: $$M = - rac{L}{f_0} imes rac{D}{f_e}$$ $$M = - rac{15}{1} imes rac{25}{2.5} = - 15 imes 10 = \mathbf{-150}$$ **उत्तर:** आवर्धन क्षमता 150 है (ऋणात्मक चिन्ह उल्टा प्रतिबिंब दर्शाता है)।

7. महत्वपूर्ण ट्रिक्स एवं याद रखने योग्य तथ्य (Exam Smart Tips)

💡 **MP Board Topper Formula Memory Tricks:**

- **दर्पण व लेंस चिन्ह में भ्रम न हों:** Mirror में $+$ (प्लस): $ rac{1}{f} = rac{1}{v} + rac{1}{u}$ | Lens में $-$ (माइनस): $ rac{1}{f} = rac{1}{v} - rac{1}{u}$।
- **आवर्धन का मर्म:** m का मान negative (-) $ ightarrow$ प्रतिबिंब **वास्तविक व उल्टा** | m का मान positive (+) $ ightarrow$ प्रतिबिंब **आभासी व सीधा**।
- **क्रांतिक कोण शॉर्टकट:** सघन माध्यम जितना अधिक गाढ़ा (उच्च अपवर्तनांक μ), क्रांतिक कोण i_c उतना ही **छोटा** होगा। (हीरे हेतु $i_c pprox 24.4^\circ$)।
- **दूरदर्शी vs सूक्ष्मदर्शी:** Telescopes में $f_0 > f_e$ (अभिदृश्यक बड़ा) | Microscopes में $f_0 < f_e$ (अभिनेत्र बड़ा)।
- **इंद्रधनुष याद करने की ट्रिक:** 'VIBGYOR' (बैंजानीहपीनाला) - बैंगनी का विचलन व अपवर्तनांक सर्वाधिक, तरंगदैर्ध्य सबसे कम। लाल का तरंगदैर्ध्य सर्वाधिक, विचलन व अपवर्तनांक सबसे कम।

8. Quick Revision Bullet Notes (अंतिम समय पुनरीक्षण)

- **परावर्तन:** अवतल दर्पण वास्तविक व आभासी दोनों प्रतिबिंब बना सकता है; उत्तल दर्पण सदैव आभासी, सीधा व छोटा प्रतिबिंब बनाता है।
- **अपवर्तन:** विरल से सघन जाने पर किरण अभिलंब की ओर झुकती है ($i > r$); सघन से विरल जाने पर अभिलंब से दूर हटती है ($i < r$)।
- **पूर्ण आंतरिक परावर्तन:** तभी संभव है जब प्रकाश सघन से विरल में जाए और $i > i_c$ हो।
- **लेंस संयोजन:** $P = P_1 + P_2$ | $ rac{1}{F} = rac{1}{f_1} + rac{1}{f_2}$ | यदि उत्तल व अवतल समान फोकस दूरी के हों, तो तुल्य क्षमता 0 (फोकस दूरी ∞, समतल कांच प्लेट की भांति)।
- **प्रिस्म:** न्यूनतम विचलन कोण की स्थिति में प्रिस्म के अंदर अपवर्तित किरण प्रिस्म के आधार के समांतर होती है।
- **सूक्ष्मदर्शी व दूरदर्शी:** दोनों में आवर्धन बढ़ाने हेतु अभिनेत्र लेंस की फोकस दूरी f_e छोटी होनी चाहिए।

9. पिछले वर्षों के प्रश्न (PYQs - 2018 से 2025 तक MP Board)

प्रश्न PYQ 1: खगोलीय दूरदर्शी का वर्णन निम्न शीर्षकों के अंतर्गत कीजिए: (i) किरण आरेख, (ii) आवर्धन क्षमता का सूत्र जब अंतिम प्रतिबिंब स्पष्ट दृष्टि की न्यूनतम दूरी पर बने, (iii) नली की लंबाई। PYQ 2024 (5 अंक)

उत्तर:
(i) किरण आरेख: (मुख्य पाठ्य में दर्शाए अनुसार समानांतर आपतित किरणों का f_0 पर प्रतिबिंब तथा अभिनेत्र द्वारा आवर्धित अंतिम प्रतिबिंब बनाना)।
(ii) आवर्धन क्षमता का व्यंजक: $$M = - rac{f_0}{f_e}\left(1 + rac{f_e}{D} ight)$$ **(iii) नली की लंबाई (L):** $$L = f_0 + |u_e|$$

प्रश्न PYQ 2: पूर्ण आंतरिक परावर्तन क्या है? इसकी शर्तें तथा कोई दो व्यावहारिक उपयोग लिखिए। PYQ 2023 (3 अंक)

उत्तर:
परिभाषा: जब सघन माध्यम से विरल माध्यम में जाती प्रकाश किरण का आपतन कोण क्रांतिक कोण से अधिक हो जाता है, तो किरण विरल माध्यम में न जाकर पूर्णतः उसी सघन माध्यम में परावर्तित हो जाती है।
शर्तें: 1. प्रकाश किरण सघन से विरल माध्यम में गति करे। 2. आपतन कोण $i > i_c$ हो।
उपयोग: 1. ऑप्टिकल फाइबर (प्रकाशिक तंतु) द्वारा संदेश प्रेषण में। 2. एंडोस्कोपी डॉक्टरी जांच में।

प्रश्न PYQ 3: स्नेल के अपवर्तन नियम द्वारा सिद्ध कीजिए कि किसी माध्यम का अपवर्तनांक तरंगदैर्ध्य के व्युत्क्रमानुपाती होता है। PYQ 2022 (4 अंक)

उत्तर:
अपवर्तनांक की परिभाषा से: $$\mu = rac{c}{v}$$ चूंकि तरंग चाल $v = u \lambda$ (जहाँ $ u$ आवृत्ति है जो माध्यम परिवर्तन पर अपरिवर्तित रहती है): $$\mu = rac{ u \lambda_0}{ u \lambda} = rac{\lambda_0}{\lambda}$$ जहाँ λ_0 निर्वात में तरंगदैर्ध्य है। $$ herefore \mu \propto rac{1}{\lambda}$$ अर्थात जिस रंग का तरंगदैर्ध्य अधिक होगा (जैसे लाल रंग), उसका अपवर्तनांक कम होगा और जिसका तरंगदैर्ध्य कम होगा (जैसे बैंगनी), उसका अपवर्तनांक अधिक होगा।

प्रश्न PYQ 4: एक उत्तल लेंस की फोकस दूरी $20 ext{ cm}$ है। इसकी क्षमता डायोप्टर में ज्ञात कीजिए। PYQ 2020 (3 अंक)

हल:
दिया है: उत्तल लेंस हेतु फोकस दूरी $f = +20 ext{ cm} = +0.2 ext{ m}$।
सूत्र: $P = rac{1}{f ext{ (m)}} = rac{1}{+0.2} = \mathbf{+5 ext{ D}}$।
उत्तर: उत्तल लेंस की क्षमता $+5 ext{ डायोप्टर}$ होगी।

अध्याय 10: तरंग प्रकाशिकी (Wave Optics)

कक्षा 12 | MP Board + NCERT | सम्पूर्ण हस्तलिखित नोट्स

1. अध्याय का संक्षिप्त परिचय (Introduction)

अभी तक हमने किरण प्रकाशिकी (Ray Optics) में प्रकाश को एक सीधी रेखा में चलता हुआ माना था, जिससे परावर्तन और अपवर्तन की व्याख्या आसानी से हो गई थी। परंतु कुछ घटनाएँ जैसे—व्यतिकरण (Interference), विवर्तन (Diffraction) और ध्रुवण (Polarization) की व्याख्या प्रकाश को सीधी रेखा में मानकर नहीं की जा सकती। इन घटनाओं को समझने के लिए प्रकाश को **तरंग (Wave)** मानना पड़ता है। इसी अध्ययन को हम **तरंग प्रकाशिकी** कहते हैं।

2. महत्वपूर्ण परिभाषाएँ (Important Definitions)

- **तरंगाग्र (Wavefront):** किसी माध्यम में खींचा गया वह काल्पनिक पृष्ठ जिसमें स्थित सभी कण कंपन की समान कला (Same Phase) में हों, तरंगाग्र कहलाता है। प्रकाश स्रोत की आकृति के आधार पर यह तीन प्रकार का होता है:
  १. गोलीय तरंगाग्र: बिंदु प्रकाश स्रोत के कारण।
  २. बेलनाकार तरंगाग्र: रेखीय प्रकाश स्रोत (जैसे स्लिट) के कारण।
  ३. समतल तरंगाग्र: अत्यधिक दूरी (जैसे सूर्य) से आने वाले प्रकाश के कारण।
- **हाइगेन्स का सिद्धांत:** हाइगेन्स के अनुसार, तरंगाग्र का प्रत्येक बिंदु एक नए विक्षोभ (Disturbance) की तरह कार्य करता है, जिससे नई तरंगें निकलती हैं। इन्हें **द्वितीयक तरंगिकाएँ (Secondary Wavelets)** कहते हैं।
- **कलासंबद्ध स्रोत (Coherent Sources):** ऐसे प्रकाश स्रोत जिनसे निकलने वाली तरंगों के बीच का कलांतर (Phase Difference) समय के साथ नियत रहता है (अर्थात बदलता नहीं है), कलासंबद्ध स्रोत कहलाते हैं।
- **प्रकाश का व्यतिकरण:** जब समान आवृत्ति और लगभग समान आयाम की दो प्रकाश तरंगें किसी माध्यम में एक ही दिशा में गमन करती हैं, तो उनके अध्यारोपण (Superposition) के कारण माध्यम के विभिन्न बिंदुओं पर प्रकाश की तीव्रता में परिवर्तन हो जाता है। इस घटना को व्यतिकरण कहते हैं।

3. सभी महत्वपूर्ण सूत्र (Formula Box)

1. परिणामी आयाम (Resultant Amplitude):

$$R = \sqrt{(a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos \varphi)}$$

2. परिणामी तीव्रता (Resultant Intensity):

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{(I_1I_2)} \cos \varphi$$

3. संपोषी व्यतिकरण (Maximum Intensity - Bright Fringe):

पथांतर (Path Difference) $\Delta x = n\lambda$ (जहाँ $n = 0, 1, 2, ...$)

$$I_{max} = (\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2})^2$$

4. विनाशी व्यतिकरण (Minimum Intensity - Dark Fringe):

पथांतर (Path Difference) $\Delta x = (2n - 1)\lambda/2$ (जहाँ $n = 1, 2, ...$)

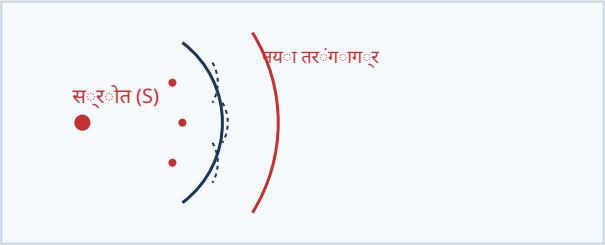
$$I_{min} = (\sqrt{I_1} - \sqrt{I_2})^2$$

5. फ्रिंज चौड़ाई (Fringe Width - β):

$$\beta = \lambda D / d$$

जहाँ, λ = तरंगदैर्ध्य, D = स्लिटों से पर्दे की दूरी, d = दोनों स्लिटों के बीच की दूरी।

4. हस्तलिखित रेखाचित्र (Essential Diagrams)



चित्र *1:* हाइगेन्स के सिद्धांत द्वारा तरंगिका निर्माण

5. महत्वपूर्ण प्रश्न एवं उत्तर (1 से 30)

[2 अंक वाले अति लघु उत्तरीय प्रश्न]

प्रश्न 1: तरंगाग्र किसे कहते हैं? यह कितने प्रकार का होता है?

उत्तर: किसी माध्यम में वह काल्पनिक पृष्ठ जिसमें स्थित सभी कण समान कला में कंपन करते हैं, तरंगाग्र कहलाता है। यह मुख्य रूप से तीन प्रकार का होता है: (i) गोलीय तरंगाग्र, (ii) बेलनाकार तरंगाग्र, और (iii) समतल तरंगाग्र।

प्रश्न 2: प्रकाश के कलासंबद्ध स्रोतों से क्या तात्पर्य है? क्या दो स्वतंत्र मोमबत्तियाँ कलासंबद्ध हो सकती हैं?

उत्तर: ऐसे स्रोत जिनसे उत्सर्जित तरंगों के मध्य कलांतर सदैव समय के साथ नियत रहता है, कलासंबद्ध स्रोत कहलाते हैं। दो स्वतंत्र मोमबत्तियाँ कभी भी कलासंबद्ध नहीं हो सकतीं क्योंकि उनके परमाणुओं से प्रकाश का उत्सर्जन स्वतंत्र और अनियमित होता है।

प्रश्न 3: संपोषी तथा विनाशी व्यतिकरण की मूल शर्त क्या है?

उत्तर:
1. **संपोषी व्यतिकरण:** तरंगों के बीच पथांतर तरंगदैर्ध्य का पूर्ण गुणज होना चाहिए ($\Delta x = n\lambda$)।
2. **विनाशी व्यतिकरण:** तरंगों के बीच पथांतर अर्द्ध-तरंगदैर्ध्य का विषम गुणज होना चाहिए [$\Delta x = (2n-1)\lambda/2$]।

प्रश्न 4: यदि यंग के द्विशिल्ट प्रयोग में पर्दे को स्लिटों से दूर ले जाया जाए, तो फ्रिंज चौड़ाई पर क्या प्रभाव पड़ेगा?

उत्तर: फ्रिंज चौड़ाई के सूत्र $\beta = \lambda D/d$ के अनुसार, फ्रिंज चौड़ाई (β) पर्दे की दूरी (D) के समानुपाती होती है। अतः पर्दा दूर ले जाने पर फ्रिंज की चौड़ाई बढ़ जाएगी।

प्रश्न 5: प्रकाश के विवर्तन से आप क्या समझते हैं?

उत्तर: जब प्रकाश किसी महीन अवरोध या तीक्ष्ण किनारे अथवा संकीर्ण स्लिट से होकर गुजरता है, तो वह अपने सरल रेखीय मार्ग से विचलित होकर अवरोध की ज्यामितीय छाया में मुड़ जाता है। प्रकाश के इस प्रकार मुड़ने की घटना को विवर्तन कहते हैं।

प्रश्न 6: ध्वनि तरंगों का विवर्तन दैनिक जीवन में आसानी से दिखाई (सुनाई) देता है परंतु प्रकाश का नहीं, क्यों?

उत्तर: विवर्तन की मुख्य शर्त यह है कि अवरोध का आकार तरंग के तरंगदैर्ध्य की कोटि का होना चाहिए। ध्वनि का तरंगदैर्ध्य बड़ा (लगभग 1 मीटर) होता है जो दैनिक जीवन के अवरोधों से मेल खाता है, जबकि प्रकाश का तरंगदैर्ध्य बहुत छोटा ($\sim 10^{-7}$ m) होता है।

प्रश्न 7: क्या प्रकाश का व्यतिकरण ऊर्जा संरक्षण के नियम के अनुकूल है?

उत्तर: हाँ, प्रकाश का व्यतिकरण ऊर्जा संरक्षण के नियम का पूर्ण पालन करता है। इसमें ऊर्जा का कोई विनाश या निर्माण नहीं होता, बल्कि विनाशी व्यतिकरण के बिंदुओं से ऊर्जा स्थानांतरित होकर संपोषी व्यतिकरण के बिंदुओं पर पुनर्वितरित हो जाती है।

प्रश्न 8: तरंगों के अध्यारोपण का सिद्धांत लिखिए।

उत्तर: जब दो या दो से अधिक तरंगें किसी माध्यम में एक साथ चलती हैं, तो माध्यम के किसी कण का परिणामी विस्थापन (y) प्रत्येक तरंग द्वारा उत्पन्न अलग-अलग विस्थापनों के सदिश योग के बराबर होता है: $y = y_1 + y_2 + ...$

प्रश्न 9: एकल झिरी विवर्तन में केंद्रीय उच्चिष्ठ की चौड़ाई का सूत्र लिखिए।

उत्तर: एकल झिरी विवर्तन में केंद्रीय उच्चिष्ठ की कोणीय चौड़ाई का सूत्र $2\theta = 2\lambda / a$ होता है, जहाँ a झिरी (स्लिट) की चौड़ाई है। रेखीय चौड़ाई $2x = 2\lambda D / a$ होती है।

प्रश्न 10: फ्रिज चौड़ाई किन-किन कारकों पर निर्भर करती है?

उत्तर: सूत्र $\beta = \lambda D/d$ के आधार पर:
1. प्रकाश के तरंगदैर्ध्य (λ) के समानुपाती।
2. स्लिट और पर्दे की दूरी (D) के समानुपाती।
3. दोनों स्लिटों के बीच की दूरी (d) के व्युत्क्रमानुपाती।

[3 अंक वाले लघु उत्तरीय प्रश्न]

प्रश्न 11: हाइगेन्स के द्वितीयक तरंगिकाओं के सिद्धांत के मुख्य बिंदु लिखिए।

उत्तर: हाइगेन्स के सिद्धांत के तीन मुख्य बिंदु निम्नलिखित हैं:
1. जब किसी माध्यम में स्थित प्रकाश स्रोत से तरंगें निकलती हैं, तो माध्यम के कण कंपन करने लगते हैं। वह पृष्ठ जिसमें स्थित सभी कण समान कला में हों, तरंगाग्र कहलाता है।
2. तरंगाग्र का प्रत्येक बिंदु एक नए प्रकाश स्रोत की भाँति कार्य करता है जिससे नई तरंगें चारों ओर निकलती हैं, जिन्हें द्वितीयक तरंगिकाएँ कहते हैं। ये मूल प्रकाश की चाल से चलती हैं।
3. किसी भी क्षण इन द्वितीयक तरंगिकाओं को स्पर्श करता हुआ खींचा गया बाहर की ओर का आवरण (Envelop) उस क्षण नए तरंगाग्र की स्थिति को दर्शाता है।

प्रश्न 12: व्यतिकरण और विवर्तन में कोई तीन मुख्य अंतर स्पष्ट कीजिए।

उत्तर:

लक्षण	व्यतिकरण (Interference)	विवर्तन (Diffraction)
स्रोत	यह दो अलग-अलग कलासंबद्ध तरंगाग्रों से आने वाली तरंगों के अध्यारोपण से होता है।	यह एक ही तरंगाग्र के विभिन्न बिंदुओं से आने वाली द्वितीयक तरंगिकाओं के बीच होता है।
फ्रिंज तीव्रता	सभी दीप्त (Bright) फ्रिंजों की तीव्रता एक समान होती है।	केंद्रीय उच्चिष्ठ की तीव्रता सर्वाधिक होती है, दूरी बढ़ने पर तीव्रता तेजी से घटती है।
फ्रिंज चौड़ाई	सभी फ्रिंज प्रायः समान चौड़ाई के होते हैं।	फ्रिंजों की चौड़ाई कभी भी समान नहीं होती, केंद्रीय फ्रिंज सबसे चौड़ा होता है।

प्रश्न 13: स्थायी व्यतिकरण प्रतिरूप प्राप्त करने के लिए आवश्यक शर्तें लिखिए।

उत्तर: आवश्यक शर्तें निम्नलिखित हैं:

1. दोनों प्रकाश स्रोत पूर्णतः **कलासंबद्ध** होने चाहिए।
2. दोनों तरंगों की आवृत्तियाँ अथवा तरंगदैर्ध्य समान होने चाहिए।
3. दोनों प्रकाश स्रोतों के बीच की दूरी (d) बहुत कम होनी चाहिए ताकि फ्रिंज चौड़ाई स्पष्ट दिखे।
4. दोनों तरंगों का आयाम लगभग बराबर होना चाहिए जिससे अदीप्त फ्रिंज पूरी तरह काली दिखाई दे।

प्रश्न 14: यदि यंग के द्वि-स्लिट प्रयोग को हवा के स्थान पर पानी में डुबो दिया जाए तो फ्रिंज चौड़ाई पर क्या प्रभाव पड़ेगा? गणितीय रूप से समझाइए।

उत्तर: हम जानते हैं कि हवा में फ्रिंज चौड़ाई $\beta = \lambda D/d$ होती है। जब उपकरण को μ अपवर्तनांक वाले माध्यम (जैसे पानी) में डुबोया जाता है, तो प्रकाश का तरंगदैर्ध्य घटकर $\lambda' = \lambda/\mu$ हो जाता है।

अतः नई फ्रिंज चौड़ाई $\beta' = \lambda' D/d = (\lambda D/d)/\mu = \beta/\mu$ हो जाएगी।

चूंकि पानी का अपवर्तनांक $\mu > 1$ होता है, इसलिए फ्रिंज की चौड़ाई **घट जाएगी**।

प्रश्न 15: श्वेत प्रकाश का उपयोग करने पर यंग के प्रयोग में फ्रिंज प्रतिरूप कैसा दिखाई देगा?

उत्तर: जब यंग के प्रयोग में एकवर्णीय प्रकाश के स्थान पर श्वेत प्रकाश का उपयोग किया जाता है, तो:
1. केंद्रीय फ्रिंज पूर्णतः **श्वेत (सफ़ेद)** बनेगी क्योंकि सभी रंगों की तरंगें केंद्र पर समान कला में पहुँचती हैं (पथांतर शून्य होता है)।
2. केंद्रीय फ्रिंज के दोनों ओर सबसे पास वाली फ्रिंज बैंगनी रंग की होगी क्योंकि इसका तरंगदैर्ध्य सबसे कम होता है।
3. कुछ दूरी के बाद फ्रिंजें एक-दूसरे पर हावी (Overlap) हो जाएँगी और स्पष्ट प्रतिरूप दिखाई देना बंद हो जाएगा।

प्रश्न 16: तरंग प्रकाशिकी के आधार पर प्रकाश के ऋजुरेखीय गमन (Straight line propagation) की सीमा को समझाइए।

उत्तर: प्रकाश तरंग प्रकृति का होने के बावजूद हमें सीधी रेखा में चलता हुआ प्रतीत होता है क्योंकि इसका तरंगदैर्ध्य बहुत सूक्ष्म होता है। तरंग प्रकाशिकी के अनुसार, जब प्रकाश किसी द्वारक से गुजरता है, तो वह केवल तभी तक सीधी रेखा में माना जा सकता है जब तक वह **फ्रेनल दूरी (Fresnel Distance - z_F)** से कम दूरी तय करता है। इसका सूत्र $z_F = a^2 / \lambda$ है। इस दूरी से अधिक पथ तय करने पर विवर्तन का प्रभाव हावी हो जाता है और प्रकाश फैलने लगता है।

प्रश्न 17: फ्रेनल दूरी (Fresnel Distance) किसे कहते हैं? इसका सूत्र एवं महत्व लिखिए।

उत्तर: वह न्यूनतम दूरी जहाँ तक किसी स्लिट से निकलने वाले प्रकाश का विवर्तन जनित फैलाव, स्लिट की चौड़ाई के बराबर होता है, फ्रेनल दूरी कहलाती है।
सूत्र: $z_F = a^2 / \lambda$
महत्व: यह दूरी किरण प्रकाशिकी (Ray Optics) और तरंग प्रकाशिकी (Wave Optics) के बीच की सीमा रेखा तय करती है। $z << z_F$ के लिए किरण प्रकाशिकी वैध है।

[4 अंक वाले दीर्घ उत्तरीय प्रश्न]

प्रश्न 18: हाइगेन्स के तरंग सिद्धांत के आधार पर प्रकाश के परावर्तन के नियमों की व्याख्या कीजिए।

उत्तर: माना ZZ' एक परावर्तक पृष्ठ है जिस पर एक समतल तरंगाग्र AB तिरछा आपतित होता है। तरंग की चाल v है। जैसे ही सिरा A पृष्ठ को छूता है, वहाँ से द्वितीयक तरंगिकाएँ निकलने लगती हैं। सिरा B को पृष्ठ के बिंदु A' तक पहुँचने में t समय लगता है, अतः $BA' = vt$।

इसी समय में A से निकलने वाली द्वितीयक तरंगिका उतनी ही दूरी vt तय कर एक गोलाकार चाप बनाएगी। A से A' पर स्पर्श रेखा A'B' खींचते हैं, जो परावर्तित तरंगाग्र को दर्शाती है। अतः $AB' = vt$।

अब समकोण त्रिभुज ΔABA' तथा ΔAB'A' में:

1. आधरण भुजा AA' उभयनिष्ठ है।
2. $BA' = AB' = vt$
3. ∠ABA' = ∠AB'A' = 90°

अतः दोनों त्रिभुज सर्वांगसम हैं (RHS नियम से)। इसलिए इनके संगत कोण बराबर होंगे:

$$\angle BAA' = \angle B'A'A \Rightarrow i = r$$

यही परावर्तन का नियम है (आपतन कोण = परावर्तन कोण)।

प्रश्न 19: हाइगेन्स के सिद्धांत द्वारा प्रकाश के अपवर्तन (स्नेल के नियम) की व्याख्या कीजिए।

उत्तर: माना दो माध्यमों को अलग करने वाला एक पृष्ठ XY है, जिसमें प्रकाश की चाल क्रमशः v_1 तथा v_2 है। एक समतल तरंगाग्र AB आपतन कोण i पर आपतित होता है। सिरा B को बिंदु A' तक पहुँचने में t समय लगता है, अतः $BA' = v_1t$।

इसी समय t में बिंदु A से दूसरे माध्यम में द्वितीयक तरंगिका v_2t दूरी तय कर लेगी। हम A को केंद्र मानकर $AB' = v_2t$ त्रिज्या का एक चाप खींचते हैं और A' से इस पर स्पर्श रेखा A'B' खींचते हैं, जो अपवर्तित तरंगाग्र है।

त्रिभुज ΔABA' में, $\sin i = BA' / AA' = v_1t / AA'$

त्रिभुज ΔAB'A' में, $\sin r = AB' / AA' = v_2t / AA'$

दोनों समीकरणों का भाग देने पर:

$$\sin i / \sin r = (v_1t / AA') / (v_2t / AA') = v_1 / v_2$$

चूंकि माध्यमों के लिए $v_1 / v_2 = {}_2\mu_1$ (नियत) होता है, अतः:

$$\sin i / \sin r = \mu \text{ (स्थिरांक)}$$

यही स्नेल का अपवर्तन का नियम है।

प्रश्न 20: तरंगों के अध्यारोपण के फलस्वरूप परिणामी तीव्रता का व्यंजक स्थापित कीजिए और संपोषी एवं विनाशी व्यतिकरण की स्थितियाँ ज्ञात कीजिए।

उत्तर: मान लीजिए दो तरंगों के समीकरण $y_1 = a_1 \sin \omega t$ तथा $y_2 = a_2 \sin(\omega t + \varphi)$ हैं, जहाँ φ दोनों के बीच कलांतर है।
अध्यारोपण के सिद्धांत से, परिणामी विस्थापन $y = y_1 + y_2$

$y = a_1 \sin \omega t + a_2 (\sin \omega t \cos \varphi + \cos \omega t \sin \varphi)$

$y = (a_1 + a_2 \cos \varphi) \sin \omega t + (a_2 \sin \varphi) \cos \omega t$

माना $a_1 + a_2 \cos \varphi = R \text{ dashed } \cos \theta$ तथा $a_2 \sin \varphi = R \text{ dashed } \sin \theta$

वर्ग करके जोड़ने पर परिणामी आयाम का वर्ग प्राप्त होता है:

$$R^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos \varphi$$

चूंकि तीव्रता आयाम के वर्ग के समानुपाती होती है ($I \propto R^2$), अतः परिणामी तीव्रता:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{(I_1I_2)} \cos \varphi$$

स्थितियाँ:

1. **संपोषी (अधिकतम तीव्रता):** जब $\cos \varphi = +1$ हो, अर्थात $\varphi = 0, 2\pi, 4\pi...$ तब $I_{max} = (\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2})^2$।
2. **विनाशी (न्यूनतम तीव्रता):** जब $\cos \varphi = -1$ हो, अर्थात $\varphi = \pi, 3\pi, 5\pi...$ तब $I_{min} = (\sqrt{I_1} - \sqrt{I_2})^2$।

[5 अंक वाले विस्तृत उत्तरीय प्रश्न]

प्रश्न 21: यंग के द्विशिल्ट (Double Slit) प्रयोग का सिद्धांत समझाइए तथा दीप्त और अदीप्त फ्रिंजों की चौड़ाई के लिए व्यंजक $\beta = \lambda D/d$ स्थापित कीजिए।

उत्तर: सिद्धांत: माना S_1 और S_2 दो कलासंबद्ध स्लिटें हैं जिनके बीच की दूरी d है। इनसे D दूरी पर एक पर्दा रखा है। पर्दे के केंद्र O से x दूरी पर एक बिंदु P है जहाँ फ्रिंज की प्रकृति ज्ञात करनी है।

S_1 और S_2 से बिंदु P पर पहुँचने वाली तरंगों के बीच पथांतर $\Delta x = S_2P - S_1P$ होगा।

ज्यामिति की सहायता से, समकोण त्रिभुजों से गणना करने पर पथांतर का मान प्राप्त होता है:

$$\Delta x = x \cdot d / D$$

१. दीप्त फ्रिंजों (Bright Fringes) के लिए:

पथांतर $\Delta x = n\lambda$ होना चाहिए।

$x \cdot d / D = n\lambda \Rightarrow x_n = n\lambda D / d$ (जहाँ n = 0, 1, 2, ...)

दो लगातार दीप्त फ्रिंजों के बीच की दूरी (फ्रिंज चौड़ाई β):

$$\beta = x_{n+1} - x_n = (n+1)\lambda D/d - n\lambda D/d = \lambda D / d$$

२. अदीप्त फ्रिंजों (Dark Fringes) के लिए:

पथांतर $\Delta x = (2n - 1)\lambda / 2$ होना चाहिए।

$x \cdot d / D = (2n - 1)\lambda / 2 \Rightarrow x'_n = (2n - 1)\lambda D / 2d$

दो लगातार अदीप्त फ्रिंजों के बीच की दूरी भी समान आती है:

$$\beta' = x'_{n+1} - x'_n = \lambda D / d$$

अतः स्पष्ट है कि दीप्त और अदीप्त दोनों प्रकार की फ्रिंजों की चौड़ाई एक समान होती है, अर्थात $\beta = \lambda D/d$।

प्रश्न 22: एकल झिरी (Single Slit) के कारण प्रकाश के विवर्तन प्रतिरूप की व्याख्या कीजिए तथा केंद्रीय उच्चिष्ठ की चौड़ाई का व्यंजक प्राप्त कीजिए।

उत्तर: जब आयाम 'a' की एकल झिरी पर समतल तरंगाग्र आपतित होता है, तो झिरी के प्रत्येक बिंदु से द्वितीयक तरंगिकाएँ निकलती हैं जो पर्दे पर विभिन्न कोणों θ पर विवर्तित होती हैं।
झिरी के दोनों सिरों से निकलने वाली तरंगों के बीच का कुल पथांतर $\Delta x = a \sin \theta$ होता है।
निम्निष्ठ (Minima) की स्थिति:
जब पथांतर तरंगदैर्ध्य λ का पूर्ण गुणज हो, तब विनाशी प्रभाव के कारण अंधकार (निम्निष्ठ) उत्पन्न होता है:

$$a \sin \theta = n\lambda \quad \Rightarrow \quad \sin \theta \approx \theta = n\lambda / a \quad (\text{जहाँ } n = 1, 2, 3...)$$

केंद्रीय उच्चिष्ठ (Central Maximum) की चौड़ाई:
केंद्रीय उच्चिष्ठ, प्रथम निम्निष्ठों (दोनों ओर n = 1) के बीच का फैला हुआ चमकीला भाग होता है।
अतः कोणीय स्थिति $\theta = \pm \lambda / a$ होगी।
१. **कुल कोणीय चौड़ाई:** $2\theta = 2\lambda / a$
२. **रेखीय चौड़ाई:** यदि पर्दे की दूरी D हो, तो रेखीय चौड़ाई $2x = 2\theta \cdot D = 2\lambda D / a$ होगी।

[अन्य महत्वपूर्ण संक्षिप्त एवं संख्यात्मक प्रश्न 23-30]

प्रश्न 23: विवर्तन प्राप्त करने के लिए स्लिट की चौड़ाई किस कोटि की होनी चाहिए?

उत्तर: विवर्तन की स्पष्ट घटना देखने के लिए स्लिट (अवरोध) की चौड़ाई प्रकाश के तरंगदैर्ध्य की कोटि यानी लगभग 10^{-7} **मीटर** या एंग्स्ट्रॉम (Å) की श्रेणी में होनी चाहिए।

प्रश्न 24: प्रकाश तरंगें अनुप्रस्थ (Transverse) होती हैं, इसकी पुष्टि किस घटना से होती है?

उत्तर: प्रकाश तरंगों के अनुप्रस्थ होने की पुष्टि केवल **ध्रुवण (Polarization)** की घटना से होती है, क्योंकि व्यतिकरण और विवर्तन अनुदैर्ध्य तरंगों में भी हो सकते हैं, लेकिन ध्रुवण केवल अनुप्रस्थ तरंगों में ही संभव है।

प्रश्न 25: दो तरंगों की तीव्रताओं का अनुपात 9:1 है। उनके व्यतिकरण प्रतिरूप में अधिकतम और न्यूनतम तीव्रताओं का अनुपात ज्ञात कीजिए।

उत्तर: दिया है: $I_1/I_2 = 9/1$. हम जानते हैं कि आयाम $a_1/a_2 = \sqrt{(I_1/I_2)} = \sqrt{9}/\sqrt{1} = 3/1$.
अधिकतम और न्यूनतम तीव्रता का सूत्र:
$I_{max} / I_{min} = (a_1 + a_2)^2 / (a_1 - a_2)^2 = (3 + 1)^2 / (3 - 1)^2 = 4^2 / 2^2 = 16 / 4 = 4:1$.

प्रश्न 26: यंग के प्रयोग में 6000 Å तरंगदैर्ध्य का प्रकाश उपयोग करने पर फ्रिंज चौड़ाई 2 मिमी प्राप्त होती है। यदि 4500 Å का प्रकाश उपयोग करें तो नई फ्रिंज चौड़ाई क्या होगी?

उत्तर: चूंकि $\beta \propto \lambda$, इसलिए $\beta_1/\beta_2 = \lambda_1/\lambda_2$.
दिया है: $\lambda_1 = 6000$ Å, $\beta_1 = 2$ mm, $\lambda_2 = 4500$ Å.
$2 / \beta_2 = 6000 / 4500 = 4 / 3$
$\beta_2 = (2 \times 3) / 4 = 1.5$ mm. अतः नई फ्रिंज चौड़ाई 1.5 मिमी होगी।

प्रश्न 27: फ्रिज विस्थापन (Fringe Shift) का सूत्र लिखिए यदि स्लिट के सामने मोटाई t की पारदर्शी पट्टी रख दी जाए।

उत्तर: यदि किसी एक स्लिट के मार्ग में t मोटाई और μ अपवर्तनांक की पट्टी रख दी जाए, तो पूरा व्यतिकरण प्रतिरूप विस्थापित हो जाता है। फ्रिंज विस्थापन का सूत्र है: $\Delta x = D(\mu - 1)t / d$।

प्रश्न 28: तरंग संचरण में 'किरण' और 'तरंगाग्र' के बीच कितना कोण होता है?

उत्तर: प्रकाश की किरण हमेशा तरंगाग्र के पृष्ठ के **लंबवत (90 डिग्री के कोण पर)** होती है और यह तरंग संचरण की दिशा को व्यक्त करती है।

प्रश्न 29: ज्यामितीय छाया में प्रकाश के प्रवेश करने की घटना को क्या कहते हैं?

उत्तर: तीखे किनारों से मुड़कर ज्यामितीय छाया में प्रकाश के प्रवेश करने की प्रायोगिक घटना को **विवर्तन (Diffraction)** कहा जाता है।

प्रश्न 30: सोडियम प्रकाश (λ = 5890 Å) के लिए एकल झिरी विवर्तन में 0.1 मिमी चौड़ी झिरी से 1 मीटर दूर पर्दे पर केंद्रीय उच्चिष्ठ की आधी चौड़ाई (कोणीय) ज्ञात करें।

उत्तर: केंद्रीय उच्चिष्ठ की आधी कोणीय चौड़ाई $\theta = \lambda / a$ होती है।
दिया है: $\lambda = 5890 \times 10^{-10}$ m, $a = 0.1 \times 10^{-3}$ m.
$\theta = (5890 \times 10^{-10}) / (10^{-4}) = 5.89 \times 10^{-3}$ Radian.

---

6. हल सहित महत्वपूर्ण संख्यात्मक प्रश्न (Solved Numericals)

आंकिक प्रश्न 1: यंग के द्वि-स्लिट प्रयोग में स्लिटों के बीच की दूरी 0.2 मिमी है और पर्दा 1.6 मीटर की दूरी पर रखा गया है। यह पाया जाता है कि केंद्रीय दीप्त फ्रिंज से चौथी दीप्त फ्रिंज की दूरी 1.2 सेमी है। उपयोग किए गए प्रकाश का तरंगदैर्ध्य ज्ञात कीजिए।

हल:

दिया गया है:

स्लिटों के बीच की दूरी (d) = 0.2 mm = 0.2×10^{-3} m

पर्दे की दूरी (D) = 1.6 m

चौथी दीप्त फ्रिंज की दूरी (x_4) = 1.2 cm = 1.2×10^{-2} m

फ्रिंज की संख्या (n) = 4

दीप्त फ्रिंज की दूरी का सूत्र: $x_n = n\lambda D / d$

मान रखने पर: $1.2 \times 10^{-2} = (4 \times \lambda \times 1.6) / (0.2 \times 10^{-3})$

$1.2 \times 10^{-2} = 32000 \times \lambda$

$\lambda = (1.2 \times 10^{-2}) / 32000 = 3.75 \times 10^{-7}$ m = 3750 Å.

उत्तर: प्रकाश का तरंगदैर्ध्य 3750 Å है।

7. महत्वपूर्ण तथ्य, ट्रिक्स और याद रखने योग्य बिंदु

- **याद रखने की ट्रिक (व्यतिकरण बनाम विवर्तन):** व्यतिकरण = 'दो अलग घर के लोगों का मिलना' (दो स्वतंत्र स्लिट)। विवर्तन = 'एक ही घर के सदस्यों में बंटवारा' (एक ही स्लिट के विभिन्न भाग)।
- यदि स्लिटों में से एक को पूरी तरह बंद कर दिया जाए, तो व्यतिकरण पैटर्न गायब हो जाता है और केवल एक साधारण विवर्तन पैटर्न शेष रहता है।
- साबुन के बुलबुले का रंगीन दिखाई देना प्रकाश के **व्यतिकरण** के कारण होता है, न कि वर्ण-विक्षेपण के कारण।

8. त्वरित दोहराव नोट्स (Quick Revision Notes)

- **तरंगाग्र:** समान कला में कंपन करने वाले कणों का लोकस पृष्ठ।
- **हाइगेन्स सिद्धांत:** प्रत्येक तरंगाग्र का बिंदु नई द्वितीयक तरंगिकाओं का जनरेटर होता है।
- **व्यतिकरण फ्रिंज चौड़ाई:** $\beta = \lambda D/d$. माध्यम में जाने पर घटती है।
- **केंद्रीय उच्चिष्ठ:** विवर्तन में इसकी चौड़ाई सामान्य फ्रिंज से दोगुनी ($2\lambda D/a$) होती है।

9. पिछले वर्षों के बोर्ड प्रश्न (PYQs) उत्तर सहित

प्रश्न (MP Board 2022, 2024): प्रकाश के व्यतिकरण के लिए आवश्यक कोई चार शर्तें लिखिए।

उत्तर: प्रकाश व्यतिकरण के लिए आवश्यक चार मुख्य शर्तें इस प्रकार हैं:

1. दोनों प्रकाश स्रोत पूर्णतः **कलासंबद्ध (Coherent)** होने चाहिए।
2. दोनों प्रकाश तरंगों की आवृत्ति और तरंगदैर्ध्य बिल्कुल समान होने चाहिए।
3. प्रकाश के दोनों स्रोतों के बीच की दूरी बहुत ही कम होनी चाहिए।
4. दोनों तरंगों का आयाम लगभग एक समान होना चाहिए ताकि दीप्त और अदीप्त फ्रिंजों में स्पष्ट अंतर (Contrast) दिखाई दे।

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।

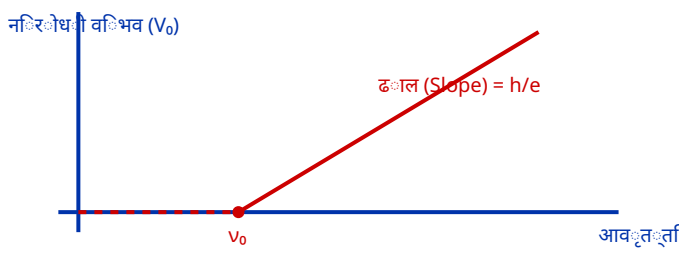
फार्मूला बॉक्स 2: आइंस्टीन का समीकरण तथा निरोधी विभव

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

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

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: $p = \ rac{h}{\lambda} = \ rac{E}{c}$.

कक्षा 12 | भौतिक विज्ञान (Physics)

अध्याय 12: परमाणु (Atom)

1. संक्षिप्त परिचय (Introduction)

परमाणु पदार्थ का वह सूक्ष्म कण है जो स्वतंत्र अवस्था में नहीं रह सकता परंतु रासायनिक अभिक्रियाओं में भाग लेता है। इस अध्याय में हम परमाणु की आंतरिक संरचना, थॉमसन मॉडल, रदरफोर्ड का अल्फा कण प्रकीर्णन प्रयोग, बोर का परमाणु मॉडल तथा हाइड्रोजन स्पेक्ट्रम का विस्तृत अध्ययन करेंगे, जो बोर्ड परीक्षा के दृष्टिकोण से अत्यंत महत्वपूर्ण है।

2. महत्वपूर्ण परिभाषाएँ (Important Definitions)

1. **असर पैरामीटर (Impact Parameter - b):** अल्फा कण के प्रारंभिक वेग सदिश की परमाणु के केंद्र (नाभिक) से लंबवत दूरी को असर पैरामीटर कहते हैं।
2. **निकटतम पहुंच की दूरी (Distance of Closest Approach - r_0):** जब कोई तीव्रगामी अल्फा कण नाभिक की ओर सीधा जाता है, तो एक निश्चित दूरी पर उसकी संपूर्ण गतिज ऊर्जा, स्थितिज ऊर्जा में परिवर्तित हो जाती है और वह वहीं से वापस लौट जाता है। इस न्यूनतम दूरी को निकटतम पहुंच की दूरी कहते हैं। इससे नाभिक के आकार का आकलन होता है।
3. **उत्तेजन विभव (Excitation Potential):** वह न्यूनतम त्वरित विभव जो किसी इलेक्ट्रॉन को इतनी ऊर्जा दे सके कि वह परमाणु को निम्नतम ऊर्जा स्तर से किसी उच्च (उत्तेजित) ऊर्जा स्तर में पहुंचा सके।
4. **आयनन विभव (Ionization Potential):** परमाणु के सबसे बाहरी इलेक्ट्रॉन को परमाणु से पूर्णतः बाहर निकालने के लिए आवश्यक न्यूनतम त्वरित विभव आयनन विभव कहलाता है। (H-परमाणु के लिए = 13.6 V)

3. मुख्य सूत्र (Formula Box)

1. निकटतम पहुंच की दूरी (r_0)

$$r_0 = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot (2Ze^2 / K)$$

जहाँ K = गतिज ऊर्जा, Z = परमाणु क्रमांक

2. बोर का कोणीय संवेग क्वांटमीकरण सिद्धांत

$$L = mvr = nh / 2\pi$$

जहाँ n = 1, 2, 3... (मुख्य क्वांटम संख्या), h = प्लांक नियतांक

3. n-वीं कक्षा की त्रिज्या (r_n) तथा ऊर्जा (E_n)

$$r_n = (n^2h^2\varepsilon_0) / (\pi mZe^2) = 0.53 \cdot (n^2 / Z)\ \text{Å}$$

$$E_n = -13.6 \cdot (Z^2 / n^2)\ eV$$

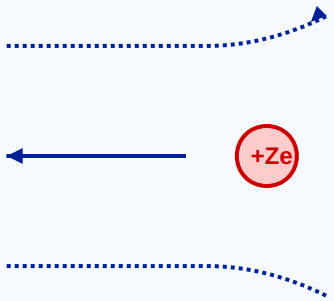
4. रिडबर्ग सूत्र (Rydberg Formula)

$$1/\lambda = R \cdot Z^2 [(1 / n_1^2) - (1 / n_2^2)]$$

जहाँ $R = 1.097 \times 10^7\ m^{-1}$ (रिडबर्ग नियतांक)

याद रखने योग्य ट्रिक: हाइड्रोजन परमाणु के लिए ऊर्जा हमेशा ऋणात्मक होती है, जो यह दर्शाती है कि इलेक्ट्रॉन नाभिक से बंधा हुआ है। यदि ऊर्जा शून्य या धनात्मक हो जाए, तो इलेक्ट्रॉन मुक्त हो जाता है।

4. हस्तलिखित रेखाचित्र (Handwritten Diagrams)



चित्र 1: रदरफोर्ड अल्फा-कण प्रकीर्णन (हस्तचित्र प्रारूप)

चित्र 2: हाइड्रोजन स्पेक्ट्रम ऊर्जा स्तर आरेख

5. महत्वपूर्ण बोर्ड परीक्षा प्रश्न एवं उत्तर (1 से 30)

[अति लघु उत्तरीय प्रश्न - 2 अंक]

प्रश्न 1: थॉमसन के परमाणु मॉडल के दो मुख्य दोष लिखिए। MP 2022, 24

उत्तर: 1. यह मॉडल अल्फ़ा कणों के बड़े कोण पर होने वाले प्रकीर्णन की व्याख्या करने में पूरी तरह असफल रहा।
2. यह हाइड्रोजन परमाणु के रैखिक स्पेक्ट्रम की व्याख्या नहीं कर सका।

प्रश्न 2: रदरफोर्ड नाभिकीय मॉडल की दो सीमाएँ बताइए। MP 2023

उत्तर: 1. **परमाणु के स्थायित्व के संबंध में:** विद्युत गतिकी के अनुसार, त्वरित इलेक्ट्रॉन को लगातार ऊर्जा उत्सर्जित करनी चाहिए, जिससे उसकी कक्षा छोटी हो जाएगी और वह नाभिक में गिर जाएगा। यह मॉडल इसका समाधान नहीं दे पाया।
2. यह सतत स्पेक्ट्रम की जगह रैखिक स्पेक्ट्रम मिलने का कारण नहीं समझा सका।

प्रश्न 3: बोर के क्वांटमीकरण के द्वितीय प्रतिबंध का कथन लिखिए। NCERT

उत्तर: बोर के अनुसार, इलेक्ट्रॉन केवल उन्हीं बंद कक्षाओं में परिक्रमा कर सकता है जिनका कोणीय संवेग ($L = mvr$), $h / 2\pi$ का पूर्ण गुणज होता है। अर्थात् $mvr = nh / 2\pi$ (जहाँ n = 1,2,3...)

प्रश्न 4: हाइड्रोजन स्पेक्ट्रम की कौन सी श्रेणी दृश्य क्षेत्र (Visible region) में पड़ती है? MP 2020

उत्तर: हाइड्रोजन स्पेक्ट्रम की **बामर श्रेणी (Balmer series)** दृश्य प्रकाश क्षेत्र में पड़ती है। इसकी खोज सर्वप्रथम जोहान बामर ने की थी।

प्रश्न 5: रिडबर्ग नियतांक का मान और मात्रक लिखिए।

उत्तर: रिडबर्ग नियतांक (R) का मान $1.097 \times 10^7\ m^{-1}$ (प्रति मीटर) होता है।

[लघु उत्तरीय प्रश्न - 3 अंक]

प्रश्न 6: सिद्ध कीजिए कि हाइड्रोजन परमाणु की n-वीं कक्षा की त्रिज्या n^2 के अनुक्रमानुपाती होती है। MP 2024

उत्तर: इलेक्ट्रॉन को वृत्तीय कक्षा में घूमने के लिए आवश्यक अभिकेंद्र बल, नाभिक और इलेक्ट्रॉन के बीच स्थिर वैद्युत आकर्षण बल से प्राप्त होता है:
$m v^2 / r = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot (Ze^2 / r^2) \Rightarrow m v^2 = (1 / 4\pi\varepsilon_0) \cdot (Ze^2 / r)$ -- (समीकरण 1)
बोर के द्वितीय अभिगृहीत से, $v = nh / (2\pi mr)$। यह मान समीकरण 1 में रखने पर हल करने पर हमें प्राप्त होता है:
$r = (n^2 h^2 \varepsilon_0) / (\pi m Z e^2)$
चूँकि h, ε_0, π, m, Z, e नियतांक हैं, अतः $r \propto n^2$। (इति सिद्धम)

प्रश्न 7: हाइड्रोजन परमाणु के लिए लाइमैन तथा बामर श्रेणी की प्रथम रेखाओं की तरंगदैर्ध्य का अनुपात ज्ञात कीजिए।

उत्तर: लाइमैन श्रेणी की प्रथम रेखा के लिए ($n_1 = 1, n_2 = 2$):

$1/\lambda_L = R [1/1^2 - 1/2^2] = 3R/4 \Rightarrow \lambda_L = 4/(3R)$

बामर श्रेणी की प्रथम रेखा के लिए ($n_1 = 2, n_2 = 3$):

$1/\lambda_B = R [1/2^2 - 1/3^2] = R [1/4 - 1/9] = 5R/36 \Rightarrow \lambda_B = 36/(5R)$

अनुपात: $\lambda_L / \lambda_B = (4/3R) / (36/5R) = (4/3) \times (5/36) = 5 / 27$। उत्तर = 5:27

[दीर्घ उत्तरीय एवं संख्यात्मक प्रश्न - 4 व 5 अंक]

प्रश्न 8: बोर के परमाणु मॉडल के मुख्य तीन अभिगृहीत (Postulates) लिखिए। MP 2023, 2025

उत्तर: बोर के मुख्य तीन अभिगृहीत निम्नलिखित हैं:

1. **स्थाई कक्षा का नियम:** इलेक्ट्रॉन नाभिक के चारों ओर कुछ विशिष्ट गैर-विकिरणी स्थाई कक्षाओं में ही घूम सकते हैं, जिनमें वे ऊर्जा का उत्सर्जन नहीं करते।
2. **क्वांटमीकरण प्रतिबंध:** इलेक्ट्रॉन केवल उन्हीं कक्षाओं में घूम सकते हैं जिनमें उनका कोणीय संवेग $h/2\pi$ का पूर्ण गुणज हो ($mvr = nh/2\pi$).
3. **आवृत्ति प्रतिबंध:** जब इलेक्ट्रॉन किसी उच्च ऊर्जा स्तर (E_2) से निम्न ऊर्जा स्तर (E_1) में संक्रमण करता है, तो वह एक फोटॉन उत्सर्जित करता है जिसकी ऊर्जा दोनों स्तरों के अंतर के बराबर होती है: $h\nu = E_2 - E_1$.

प्रश्न 9 (Numerical): हाइड्रोजन परमाणु की निम्नतम अवस्था में ऊर्जा -13.6 eV है। यदि एक इलेक्ट्रॉन प्रथम उत्तेजित अवस्था से निम्नतम अवस्था में आता है, तो उत्सर्जित फोटॉन की ऊर्जा और तरंगदैर्ध्य की गणना कीजिए।

उत्तर: निम्नतम अवस्था की ऊर्जा $E_1 = -13.6\ eV$

प्रथम उत्तेजित अवस्था ($n = 2$) की ऊर्जा $E_2 = -13.6 / 2^2 = -3.4\ eV$

उत्सर्जित फोटॉन की ऊर्जा $\Delta E = E_2 - E_1 = -3.4 - (-13.6) = 10.2\ eV$

ऊर्जा जूल में: $10.2 \times 1.6 \times 10^{-19}\ J = 1.632 \times 10^{-18}\ J$

तरंगदैर्ध्य $\lambda = hc / \Delta E = (6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8) / (1.632 \times 10^{-18}) = 1.218 \times 10^{-7}\ m = 121.8\ nm$.

6. क्विक रिवीजन नोट्स (Quick Revision Notes)

1. परमाणु विद्युत रूप से उदासीन होता है क्योंकि प्रोटॉन और इलेक्ट्रॉन की संख्या समान होती है।
2. रदरफोर्ड प्रयोग से सिद्ध हुआ कि परमाणु का अधिकांश भाग खोखला है और संपूर्ण धनावेश केंद्र में केंद्रित है जिसे नाभिक कहते हैं।
3. हाइड्रोजन स्पेक्ट्रम श्रेणियाँ: लाइमैन (पराबैंगनी), बामर (दृश्य), पाशन, ब्रैकेट व फण्ड (अवरक्त क्षेत्र)।

कक्षा 12 | भौतिक विज्ञान (Physics)

अध्याय 13: नाभिक (Nuclei)

1. संक्षिप्त परिचय (Introduction)

परमाणु का समस्त धनावेश तथा लगभग संपूर्ण द्रव्यमान उसके केंद्र में एक अत्यंत सूक्ष्म स्थान में संचित रहता है जिसे **नाभिक (Nucleus)** कहते हैं। रदरफोर्ड के अल्फा कण प्रकीर्णन प्रयोग द्वारा नाभिक की खोज हुई। इस अध्याय में हम नाभिकीय आकार, द्रव्यमान क्षति, बंधन ऊर्जा, नाभिकीय बल, तथा नाभिकीय विखंडन व संलयन जैसी महत्वपूर्ण ऊर्जा उत्पादक प्रक्रियाओं का विस्तृत बोर्ड परीक्षा विशेष अध्ययन करेंगे।

2. महत्वपूर्ण परिभाषाएँ (Important Definitions)

1. **समस्थानिक (Isotopes):** एक ही तत्व के वे परमाणु जिनके परमाणु क्रमांक (Z) समान परंतु द्रव्यमान संख्या (A) भिन्न होती है। उदा: $_1H^1$, $_1H^2$, $_1H^3$
2. **समभारिक (Isobars):** विभिन्न तत्वों के वे परमाणु जिनकी द्रव्यमान संख्या (A) समान परंतु परमाणु क्रमांक (Z) भिन्न होते हैं। उदा: $_{18}Ar^{40}$ तथा $_{20}Ca^{40}$
3. **समन्यूट्रॉनिक (Isotones):** वे नाभिक जिनमें न्यूट्रॉनों की संख्या (A - Z) समान होती है। उदा: $_1H^3$ तथा $_2He^4$
4. **द्रव्यमान क्षति (Mass Defect - Δm):** किसी नाभिक का वास्तविक द्रव्यमान, उसके घटक न्यूक्लियानों (प्रोटॉनों और न्यूट्रॉनों) के द्रव्यमानों के योग से हमेशा कुछ कम होता है। इस अंतर को द्रव्यमान क्षति कहते हैं।
5. **नाभिकीय बंधन ऊर्जा (Binding Energy):** नाभिक के न्यूक्लियानों को अनंत दूरी तक अलग करने के लिए आवश्यक न्यूनतम ऊर्जा को बंधन ऊर्जा कहते हैं। यह द्रव्यमान क्षति के कारण उत्पन्न होती है।
6. **क्रातिक द्रव्यमान (Critical Mass):** नाभिकीय श्रृंखला अभिक्रिया को निरंतर बनाए रखने के लिए विखंडनीय पदार्थ का वह न्यूनतम आवश्यक द्रव्यमान जिससे कम होने पर न्यूट्रॉन बाहर निकल जाते हैं और अभिक्रिया रुक जाती है।

3. मुख्य सूत्र (Formula Box)

1. नाभिकीय त्रिज्या (Nuclear Radius)

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

जहाँ $R_0 \approx 1.2 \times 10^{-15}$ m (1.2 fm), A = द्रव्यमान संख्या

2. नाभिकीय घनत्व (Nuclear Density)

$$\rho = m_n / ((4/3)\pi R_0^3) \approx 2.3 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

नोट: नाभिकीय घनत्व द्रव्यमान संख्या (A) पर निर्भर नहीं करता, यह सभी नाभिकों के लिए नियत रहता है।

3. द्रव्यमान क्षति (Mass Defect - Δm)

$$\Delta m = [Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n] - M$$

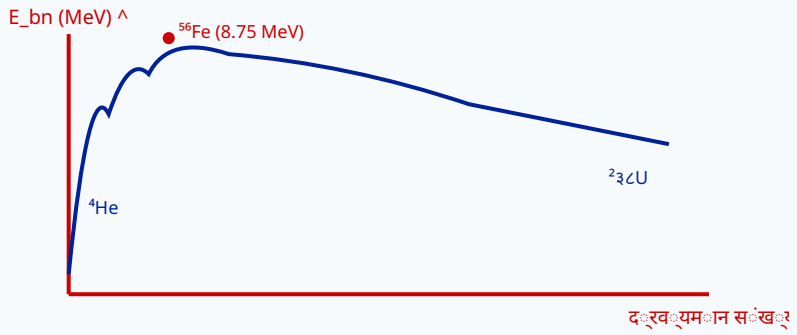
जहाँ M = नाभिक का वास्तविक द्रव्यमान, m_p = प्रोटॉन द्रव्यमान, m_n = न्यूट्रॉन द्रव्यमान

4. बंधन ऊर्जा (Binding Energy - E_b)

$$E_b = \Delta m \cdot c^2 = \Delta m \text{ (in amu)} \times 931.5 \text{ MeV}$$

याद रखने योग्य ट्रिक: बोर्ड परीक्षा में यदि द्रव्यमान ए.एम.यू. *(amu)* में दिया गया हो, तो सीधे ***931.5*** से गुणा करके ऊर्जा *MeV* में प्राप्त करें। गुणा-भाग का समय बचेगा!

4. हस्तलिखित रेखाचित्र (Handwritten Diagrams)



चित्र 1: प्रति न्यूक्लिऑन बंधन ऊर्जा वक्र (Binding Energy Curve)

5. महत्वपूर्ण बोर्ड परीक्षा प्रश्न एवं उत्तर (1 से 30)

[अति लघु उत्तरीय प्रश्न - 2 अंक]

प्रश्न 1: नाभिकीय बल किसे कहते हैं? इसके दो मुख्य गुण लिखिए। MP 2022, 24

उत्तर: नाभिक के भीतर न्यूक्लियानों (प्रोटॉनों तथा न्यूट्रॉनों) को एक साथ बांधकर रखने वाले तीव्र आकर्षण बल को नाभिकीय बल कहते हैं।

गुण: 1. यह प्रकृति का सबसे प्रबलतम आकर्षण बल है।

2. यह बल आवेश पर निर्भर नहीं करता (प्रोटॉन-प्रोटॉन व न्यूट्रॉन-न्यूट्रॉन के बीच समान होता है)।

प्रश्न 2: सिद्ध कीजिए कि नाभिकीय घनत्व द्रव्यमान संख्या A पर निर्भर नहीं करता। MP 2023, 25

उत्तर: नाभिक का द्रव्यमान $M = A \cdot m$ (जहाँ m एक न्यूक्लिऑन का औसत द्रव्यमान है)।

नाभिक का आयतन $V = (4/3)\pi R^3 = (4/3)\pi(R_0 A^{1/3})^3 = (4/3)\pi R_0^3 A$.

घनत्व $\rho = M / V = (A \cdot m) / ((4/3)\pi R_0^3 A) = m / ((4/3)\pi R_0^3)$.

समीकरण में A कट जाता है, अतः नाभिकीय घनत्व द्रव्यमान संख्या A से स्वतंत्र होता है।

प्रश्न 3: 1 ए.एम.यू. (amu) द्रव्यमान से उत्पन्न ऊर्जा का मान MeV में कितना होता है? MP 2020

उत्तर: 1 ए.एम.यू. (amu) द्रव्यमान के तुल्य ऊर्जा का मान **931.5 MeV** होता है ($E = \Delta m \times 931.5\ MeV$)।

प्रश्न 4: नाभिकीय विखंडन और नाभिकीय संलयन में मुख्य अंतर क्या है? NCERT

उत्तर: नाभिकीय विखंडन में एक भारी नाभिक दो हल्के नाभिकों में टूटता है (जैसे यूरेनियम का टूटना), जबकि नाभिकीय संलयन में दो या दो से अधिक हल्के नाभिक मिलकर एक भारी नाभिक का निर्माण करते हैं (जैसे सूर्य में हाइड्रोजन का हीलियम में बदलना)।

[लघु उत्तरीय प्रश्न - 3 अंक]

प्रश्न 5: प्रति न्यूक्लिऑन बंधन ऊर्जा वक्र के दो मुख्य निष्कर्ष या विशेषताएँ लिखिए। MP 2024

उत्तर: 1. मध्यवर्ती नाभिकों (जैसे $A = 30$ से $A = 170$) के लिए प्रति न्यूक्लिऑन बंधन ऊर्जा लगभग नियत और उच्च (लगभग 8.5 MeV) होती है, जिससे ये नाभिक अत्यधिक स्थाई होते हैं। सबसे अधिक स्थायित्व आयरन (^{56}Fe) का होता है (8.75 MeV)।

2. बहुत भारी नाभिकों ($A > 170$) के लिए प्रति न्यूक्लिऑन बंधन ऊर्जा का मान कम होने लगता है, जिसके कारण ये नाभिक अपेक्षाकृत कम स्थाई होते हैं और भारी नाभिक स्थायित्व प्राप्त करने के लिए विखंडित होने की प्रवृत्ति रखते हैं।

प्रश्न 6 (Numerical): यदि दो नाभिकों की द्रव्यमान संख्याओं का अनुपात 1:8 है, तो उनकी नाभिकीय त्रिज्याओं का अनुपात क्या होगा? **MP 2019**

उत्तर: हम जानते हैं कि नाभिकीय त्रिज्या का सूत्र: $R = R_0 \cdot A^{1/3}$ होता है।

अतः, $R_1 / R_2 = (A_1 / A_2)^{1/3}$

दिया है: $A_1 / A_2 = 1 / 8$

मान रखने पर: $R_1 / R_2 = (1 / 8)^{1/3} = 1 / 2$.

अतः उनकी त्रिज्याओं का अनुपात **1:2** होगा।

[दीर्घ उत्तरीय प्रश्न - 4 व 5 अंक]

प्रश्न 7: नाभिकीय रिएक्टर (Nuclear Reactor) का रेखाचित्र बनाइए तथा इसके मुख्य भागों (मंदक, नियंत्रक छड़ें, शीतलक) के कार्य लिखिए। **MP 2023, 2025**

उत्तर: नाभिकीय रिएक्टर एक ऐसी युक्ति है जिसमें नियंत्रित विखंडन द्वारा ऊर्जा प्राप्त की जाती है।

1. मंदक (Moderator): यह तीव्रगामी न्यूट्रॉनों की गति को धीमा करता है ताकि वे विखंडन के लिए उपयुक्त हो सकें।

उदाहरण: भारी जल (D_2O), ग्रेफाइट।

2. नियंत्रक छड़ें (Control Rods): ये अतिरिक्त न्यूट्रॉनों का अवशोषण करके श्रृंखला अभिक्रिया को नियंत्रित रखती हैं।

उदाहरण: कैडमियम (Cd) या बोरॉन (B) की छड़ें।

3. शीतलक (Coolant): यह रिएक्टर के कोर में उत्पन्न अत्यधिक ऊष्मा को बाहर निकालकर पानी को भाप में बदलता है।

उदाहरण: जल, द्रवित सोडियम।

6. क्विक रिवीजन नोट्स (Quick Revision Notes)

1. $R = R_0 A^{1/3}$ से स्पष्ट है कि भारी नाभिक बड़े होते हैं परंतु उनका घनत्व समान रहता है।
2. द्रव्यमान और ऊर्जा एक दूसरे के तुल्य हैं: $E = mc^2$.
3. तारों और सूर्य में ऊर्जा का स्रोत नाभिकीय संलयन (Hydrogen cycle) है।
4. परमाणु बम नाभिकीय विखंडन की अनियंत्रित श्रृंखला अभिक्रिया पर आधारित है, जबकि हाइड्रोजन बम नाभिकीय संलयन पर आधारित है।

अध्याय 14: अर्धचालक इलेक्ट्रॉनिकी: पदार्थ, युक्तियां एवं सरल परिपथ

1. अध्याय का संक्षिप्त परिचय (Brief Introduction)

अब तक हमने मुख्य रूप से चालकों (Conductors) और विद्युतरोधियों (Insulators) के बारे में अध्ययन किया है। लेकिन आधुनिक इलेक्ट्रॉनिकी की नींव एक विशेष वर्ग के पदार्थों पर टिकी है, जिन्हें **अर्धचालक (Semiconductors)** कहा जाता है। इन पदार्थों की विद्युत चालकता चालकों से कम परंतु कुचालकों से अधिक होती है। सबसे महत्वपूर्ण बात यह है कि हम इनकी चालकता को बाह्य अशुद्धि मिलाकर या तापमान बदलकर नियंत्रित कर सकते हैं। इसी नियंत्रण क्षमता के कारण डायोड, ट्रांजिस्टर, LED और इंटीग्रेटेड सर्किट (IC) का निर्माण संभव हो सका है, जिसने मोबाइल, कंप्यूटर और अंतरिक्ष तकनीक में क्रांति ला दी है।

2. महत्वपूर्ण परिभाषाएँ (Important Definitions)

- **अर्धचालक (Semiconductor):** वे पदार्थ जिनकी विद्युत चालकता 10^{-6} *S/m* से 10^{4} *S/m* के मध्य होती है। उदाहरण: सिलिकॉन (Si) तथा जर्मेनियम (Ge)।
- **वर्जित ऊर्जा अंतराल (Energy Band Gap - E_g):** संयोजकता बैंड (Valence Band) के उच्चतम ऊर्जा स्तर और चालन बैंड (Conduction Band) के निम्नतम ऊर्जा स्तर के बीच का अंतर वर्जित ऊर्जा अंतराल कहलाता है।
- **नैज अर्धचालक (Intrinsic Semiconductor):** बिना किसी बाह्य अशुद्धि के एकदम शुद्ध रूप में पाए जाने वाले अर्धचालक नैज अर्धचालक कहलाते हैं। इसमें इलेक्ट्रॉन और होल की संख्या समान होती है ($n_e = n_h = n_i$)।
- **अपद्रव्यी अर्धचालक (Extrinsic Semiconductor):** जब शुद्ध अर्धचालक में उसकी चालकता बढ़ाने के लिए कोई उपयुक्त अल्प मात्रा में अशुद्धि मिलाई जाती है, तो इसे अपद्रव्यी या बाह्य अर्धचालक कहते हैं।
- **मादन (Doping):** शुद्ध अर्धचालक में नियंत्रित मात्रा में वांछित अशुद्धि मिलाने की प्रक्रिया को मादन (Doping) कहते हैं। अशुद्धि परमाणुओं को डोपेंट (Dopant) कहा जाता है।
- **होल या कोटर (Hole):** जब संयोजकता बैंड से कोई इलेक्ट्रॉन ऊर्जा पाकर चालन बैंड में जाता है, तो संयोजकता बैंड में एक रिक्त स्थान बन जाता है, जिसे होल कहते हैं। यह एक आभासी धनावेश की भाँति व्यवहार करता है।

- **P-N संधि डायोड (P-N Junction Diode):** जब एक P-प्रकार के अर्धचालक क्रिस्टल को परमाणु स्तर पर N-प्रकार के अर्धचालक क्रिस्टल के साथ जोड़ा जाता है, तो संपर्क सतह को P-N संधि कहते हैं, और इस युक्ति को डायोड कहते हैं।
- **अवक्षय परत (Depletion Layer):** P-N संधि के दोनों ओर वह क्षेत्र जिसमें कोई भी गतिशील आवेश वाहक (मुक्त इलेक्ट्रॉन या होल) उपस्थित नहीं होते, केवल अचल आयन होते हैं, अवक्षय परत कहलाती है।

3. सभी महत्वपूर्ण सूत्र (All Important Formulas)

1. नैज अर्धचालक में आवेश वाहकों का साम्यावस्था संबंध (मास एक्शन लॉ):

$$n_e \times n_h = n_i^2$$

2. अर्धचालक की कुल विद्युत धारा:

$$I = I_e + I_h$$

3. अर्धचालक की कुल विद्युत चालकता (σ):

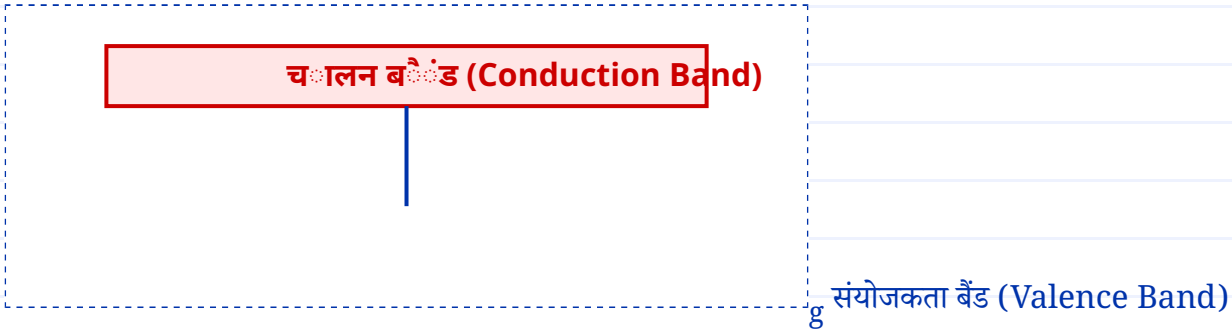
$$\sigma = e\,(n_e\mu_e + n_h\mu_h)$$

यहाँ μ_e = इलेक्ट्रॉन गतिशीलता, μ_h = होल गतिशीलता, e = इलेक्ट्रॉन का आवेश।

4. महत्वपूर्ण बिंदु (Key Points for Board Exam)

- परम शून्य ताप ($0\ K$) पर शुद्ध अर्धचालक एक आदर्श कुचालक (Insulator) की भाँति व्यवहार करता है क्योंकि चालन बैंड पूर्णतः रिक्त होता है।
- तापमान बढ़ाने पर अर्धचालकों का प्रतिरोध **घटता** है, अर्थात् इनका प्रतिरोध ताप गुणांक (α) **ऋणात्मक** होता है।
- P-प्रकार के अर्धचालक में बहुसंख्यक आवेश वाहक **होल** होते हैं तथा अशुद्धि त्रिसंयोजी (जैसे- Al, B, In) होती है।
- N-प्रकार के अर्धचालक में बहुसंख्यक आवेश वाहक **मुक्त इलेक्ट्रॉन** होते हैं तथा अशुद्धि पंचसंयोजी (जैसे- P, As, Sb) होती है।
- P-प्रकार और N-प्रकार दोनों ही अर्धचालक बाह्य रूप से पूर्णतः **विद्युत उदासीन** होते हैं।

5. आवश्यक हस्तलिखित डायग्राम (Hand-drawn Style Diagrams)



चित्र 1: अर्धचालक का ऊर्जा बैंड आरेख

चित्र 2: P-N संधि डायोड (अग्र अभिनति परिपथ)

6. महत्वपूर्ण प्रश्न एवं उत्तर (1 से 30)

[अति लघु उत्तरीय प्रश्न - 2 अंक]

प्रश्न 1: ऊर्जा बैंड के आधार पर चालक और अर्धचालक में मुख्य अंतर लिखिए। 2 अंक

उत्तर: चालकों में संयोजकता बैंड और चालन बैंड एक-दूसरे के ऊपर अतिव्यापित (Overlap) होते हैं, जिससे वर्जित ऊर्जा अंतराल शून्य ($E_g = 0$) होता है। इसके विपरीत, अर्धचालकों में यह अंतराल बहुत कम (लगभग $1\ eV$) होता है, जिसके कारण कुछ इलेक्ट्रॉन सामान्य ताप पर चालन बैंड में पहुँच जाते हैं।

प्रश्न 2: डोपिंग किसे कहते हैं? इसे शुद्ध अर्धचालक में क्यों किया जाता है? 2 अंक

उत्तर: शुद्ध अर्धचालक क्रिस्टल में अत्यंत सूक्ष्म मात्रा में बाह्य अशुद्धि (जैसे पंचसंयोजी या त्रिसंयोजी परमाणु) मिलाने की नियंत्रित प्रक्रिया को डोपिंग कहते हैं। शुद्ध अर्धचालक की चालकता बहुत कम होती है; डोपिंग करने से मुक्त आवेश वाहकों की संख्या अत्यधिक बढ़ जाती है जिससे चालकता कई गुना बढ़ जाती है।

प्रश्न 3: N-प्रकार के अर्धचालक में बहुसंख्यक और अल्पसंख्यक आवेश वाहकों के नाम लिखिए। क्या यह आवेशित होता है? 2 अंक

उत्तर: N-प्रकार के अर्धचालक में बहुसंख्यक आवेश वाहक **मुक्त इलेक्ट्रॉन** तथा अल्पसंख्यक आवेश वाहक **होल (कोटर)** होते हैं। नहीं, यह पूर्णतः **विद्युत उदासीन** होता है, क्योंकि मिलाए गए अशुद्धि परमाणु और मूल परमाणु दोनों ही उदासीन होते हैं।

प्रश्न 4: P-प्रकार के अर्धचालक को तैयार करने के लिए प्रयुक्त किन्हीं दो डोपेंट्स (अशुद्धियों) के नाम लिखिए। 2 अंक

उत्तर: P-प्रकार का अर्धचालक बनाने के लिए त्रिसंयोजी (Valency = 3) अशुद्धियों का उपयोग किया जाता है। उदाहरण: 1. एल्युमिनियम (Al), 2. बोरॉन (B) अथवा इंडियम (In)।

प्रश्न 5: अवक्षय परत (Depletion layer) की चौड़ाई पर अग्र अभिनति (Forward Bias) का क्या प्रभाव पड़ता है? 2 अंक

उत्तर: जब P-N संधि डायोड को अग्र अभिनति में जोड़ा जाता है, तो बाह्य विद्युत क्षेत्र आंतरिक प्राचीर विद्युत क्षेत्र का विरोध करता है। इसके कारण अवक्षय परत की चौड़ाई (Thickness) **घट जाती है** और संधि का प्रतिरोध बहुत कम हो जाता है।

प्रश्न 6: उत्क्रम अभिनति (Reverse Bias) में डायोड से प्रवाहित अल्प धारा का क्या कारण है? 2 अंक

उत्तर: उत्क्रम अभिनति में बाह्य वोल्टेज अल्पसंख्यक आवेश वाहकों (P-क्षेत्र के इलेक्ट्रॉन और N-क्षेत्र के होल) की गति में सहायता करता है। अतः प्रवाहित होने वाली सूक्ष्म धारा (माइक्रो-एम्पियर में) केवल **अल्पसंख्यक आवेश वाहकों** के कारण होती है, जिसे उत्क्रम संतृप्ति धारा कहते हैं।

प्रश्न 7: प्राचीर विभव (Barrier Potential) की परिभाषा लिखिए। सिलिकॉन के लिए इसका मान कितना होता है? 2 अंक

उत्तर: P-N संधि पर विसरण के कारण अवक्षय परत के सिरों पर उत्पन्न वह विभवांतर जो आवेश वाहकों के स्वतः विसरण को और आगे रोकता है, प्राचीर विभव कहलाता है। सिलिकॉन (Si) के लिए इसका मान लगभग **0.7 V** तथा जर्मेनियम (Ge) के लिए **0.3 V** होता है।

प्रश्न 8: दिष्टकरण (Rectification) क्या है? इसके लिए किस युक्ति का उपयोग किया जाता है? 2 अंक

उत्तर: प्रत्यावर्ती धारा (AC) को दिष्ट धारा (DC) में परिवर्तित करने की प्रक्रिया को दिष्टकरण कहते हैं। इस कार्य के लिए **P-N संधि डायोड** का उपयोग दिष्टकारी के रूप में किया जाता है, क्योंकि यह केवल एक ही दिशा (अग्र अभिनति) में धारा प्रवाहित होने देता है।

प्रश्न 9: LED का पूरा नाम लिखिए। यह किस अभिनति में कार्य करता है? 2 अंक

उत्तर: LED का पूरा नाम **प्रकाश उत्सर्जक डायोड (Light Emitting Diode)** है। यह हमेशा **अग्र अभिनति (Forward Bias)** में कार्य करता है, जिसमें इलेक्ट्रॉन और होल के पुनर्संयोजन से ऊर्जा प्रकाश के रूप में उत्सर्जित होती है।

प्रश्न 10: सौर सेल (Solar Cell) का मुख्य कार्य सिद्धांत क्या है? इसमें प्रयुक्त दो प्रमुख पदार्थ लिखिए। 2 अंक

उत्तर: सौर सेल सौर ऊर्जा (प्रकाश ऊर्जा) को सीधे विद्युत ऊर्जा में परिवर्तित करता है। यह बिना किसी बाह्य अभिनति के **फोटोवोल्टिक प्रभाव (Photovoltaic Effect)** पर कार्य करता है। इसमें प्रयुक्त होने वाले मुख्य पदार्थ सिलिकॉन (Si) और गैलियम आर्सेनाइड (GaAs) हैं।

[लघु उत्तरीय प्रश्न - 3 अंक]

प्रश्न 11: नैज अर्धचालक और अपद्रव्यी अर्धचालक में तीन प्रमुख अंतर लिखिए। 3 अंक

उत्तर:

1. **शुद्धता:** नैज अर्धचालक पूर्णतः शुद्ध होते हैं, जबकि अपद्रव्यी अर्धचालकों में बाह्य अशुद्धि (डोपेंट) मिलाई जाती है।
2. **आवेश वाहक:** नैज में इलेक्ट्रॉनों और होलों की संख्या बराबर होती है ($n_e = n_h$), जबकि अपद्रव्यी में एक प्रकार का आवेश वाहक बहुसंख्यक होता है ($n_e \neq n_h$)।
3. **चालकता:** नैज अर्धचालक की चालकता सामान्य ताप पर बहुत कम होती है, जबकि अपद्रव्यी अर्धचालक की चालकता बहुत उच्च होती है।

प्रश्न 12: P-प्रकार और N-प्रकार के अर्धचालक में तीन मुख्य अंतर स्पष्ट कीजिए। 3 अंक

उत्तर:

1. **अशुद्धि का प्रकार:** P-प्रकार में त्रिसंयोजी (जैसे Al, B) अशुद्धि मिलाई जाती है, जबकि N-प्रकार में पंचसंयोजी (जैसे P, As) अशुद्धि मिलाई जाती है।
2. **बहुसंख्यक वाहक:** P-प्रकार में बहुसंख्यक आवेश वाहक होल होते हैं, जबकि N-प्रकार में बहुसंख्यक वाहक मुक्त इलेक्ट्रॉन होते हैं।
3. **ऊर्जा स्तर:** P-प्रकार में ग्राही ऊर्जा स्तर संयोजकता बैंड के ठीक ऊपर बनता है, जबकि N-प्रकार में दाता ऊर्जा स्तर चालन बैंड के ठीक नीचे बनता है।

प्रश्न 13: P-N संधि के निर्माण के दौरान होने वाली दो महत्वपूर्ण प्रक्रियाओं (विसरण एवं अपवाह) को समझाइए। 3 अंक

उत्तर:

1. **विसरण (Diffusion):** सांद्रता प्रवणता के कारण P-क्षेत्र से होल N-क्षेत्र की ओर तथा N-क्षेत्र से इलेक्ट्रॉन P-क्षेत्र की ओर गति करते हैं, इस प्रवाह को विसरण धारा कहते हैं।
2. **अपवाह (Drift):** संधि पर बने आंतरिक प्राचीर विद्युत क्षेत्र के कारण अल्पसंख्यक वाहकों (P के इलेक्ट्रॉन और N के होल) की जो गति होती है, उसे अपवाह कहते हैं। साम्यावस्था में विसरण धारा और अपवाह धारा परिमाण में बराबर और दिशा में विपरीत हो जाती हैं।

प्रश्न 14: जेनर डायोड क्या है? इसका प्रतीक चिह्न बनाइए तथा इसका मुख्य उपयोग लिखिए। 3 अंक

उत्तर: जेनर डायोड एक विशेष रूप से अत्यधिक मादित (Heavily Doping) P-N संधि डायोड है, जो बिना नष्ट हुए **उत्क्रम भंजन क्षेत्र (Reverse Breakdown Region)** में निरंतर कार्य कर सकता है।

मुख्य उपयोग: इसका उपयोग **वोल्टेज नियामक (Voltage Stabilizer)** के रूप में किया जाता है।

प्रतीक चिह्न संकेत: सामान्य डायोड के त्रिकोण के आगे सीधी लाइन के स्थान पर 'Z' आकार की रेखा बनाई जाती है।

प्रश्न 15: फोटोडायोड क्या है? यह किस अभिनति में संचालित होता है और क्यों? 3 अंक

उत्तर: फोटोडायोड एक प्रकाश-संवेदी P-N संधि डायोड है, जो इस पर आपतित होने वाले प्रकाश की तीव्रता के अनुसार विद्युत धारा में परिवर्तन करता है। यह हमेशा **उत्क्रम अभिनति (Reverse Bias)** में संचालित होता है। इसका कारण यह है कि उत्क्रम अभिनति में अल्पसंख्यक वाहकों के कारण बहने वाली संतृप्ति धारा बहुत कम होती है, अतः जब इस पर प्रकाश आपतित होता है, तो उत्पन्न अतिरिक्त आवेश वाहकों के कारण धारा में प्रतिशत परिवर्तन बहुत स्पष्ट और आसानी से मापने योग्य होता है।

[दीर्घ उत्तरीय प्रश्न - 4 व 5 अंक]

प्रश्न 16: P-N संधि डायोड के अग्र अभिनति (Forward Bias) एवं उत्क्रम अभिनति (Reverse Bias) के लिए परिपथ आरेख खींचिए तथा दोनों स्थितियों के लिए V-I अभिलाक्षणिक वक्र बनाइए। 4 अंक

उत्तर:

अग्र अभिनति: डायोड के P-सिरे को बैटरी के धन (+) ध्रुव से तथा N-सिरे को ऋण (-) ध्रुव से जोड़ा जाता है। इसमें धारा तेजी से (mA में) बढ़ती है।

उत्क्रम अभिनति: डायोड के P-सिरे को बैटरी के ऋण (-) ध्रुव से तथा N-सिरे को धन (+) ध्रुव से जोड़ा जाता है। इसमें धारा बहुत कम (μA में) बहती है और एक निश्चित वोल्टेज (भंजन विभव) पर अचानक बढ़ जाती है।

(बोर्ड परीक्षा में इसके लिए चित्र 2 जैसी संरचना तथा चतुर्थांश वक्र आरेख बनाना आवश्यक है, जहाँ प्रथम चतुर्थांश में अग्र वक्र और तृतीय चतुर्थांश में उत्क्रम वक्र दर्शाया जाता है)।

प्रश्न 17: P-N संधि डायोड का अर्ध-तरंग दिष्टकारी (Half Wave Rectifier) के रूप में कार्य सिद्धांत परिपथ आरेख सहित समझाइए। इसके निवेशी (Input) तथा निर्गत (Output) तरंग रूप को भी दर्शाइए। 5 अंक

उत्तर:

सिद्धांत: डायोड केवल अग्र अभिनति में धारा का चालन करता है, उत्क्रम अभिनति में नहीं।

कार्यविधि: निवेशी AC सिग्नल के पहले धनात्मक आधे चक्र के दौरान, ट्रांसफॉर्मर के द्वितीयक सिरे के कारण डायोड का P-सिरा धनात्मक विभव पर होता है, जिससे डायोड अग्र अभिनति में होकर लोड प्रतिरोध R_L से धारा प्रवाहित करता है। ऋणात्मक आधे चक्र के दौरान, P-सिरा ऋणात्मक हो जाता है, जिससे डायोड उत्क्रम अभिनति में आ जाता है और कोई धारा प्रवाहित नहीं होती। इस प्रकार निर्गत पर केवल धनात्मक आधे चक्र ही प्राप्त होते हैं।

निर्गत तरंग: यह एक रुक-रुक कर मिलने वाली दिष्ट धारा होती है जिसकी दक्षता 40.6% होती है।

प्रश्न 18: P-N संधि डायोड का पूर्ण-तरंग दिष्टकारी (Full Wave Rectifier) के रूप में कार्य परिपथ आरेख और तरंग रूप के साथ विस्तार से समझाइए। यह अर्ध-तरंग दिष्टकारी से कैसे बेहतर है? 5 अंक

उत्तर:

संरचना: इसमें मध्य-निष्कासी (Center-tapped) ट्रांसफॉर्मर और दो डायोड D_1 व D_2 का उपयोग किया जाता है।

कार्यविधि: AC के धनात्मक अर्धचक्र में D_1 अग्र अभिनति में और D_2 उत्क्रम अभिनति में होता है, जिससे R_L में धारा D_1 के कारण बहती है। ऋणात्मक अर्धचक्र में D_1 उत्क्रम अभिनति में और D_2 अग्र अभिनति में आ जाता है, जिससे R_L में धारा D_2 के कारण बहती है। महत्वपूर्ण बात यह है कि दोनों ही चक्रों में R_L में धारा की दिशा एक ही रहती है।

श्रेष्ठता: पूर्ण-तरंग दिष्टकारी में निवेशी तरंग के दोनों भागों का दिष्टकरण होता है, इसकी दक्षता (81.2%) अर्ध-तरंग से दोगुनी होती है और निर्गत में ऊर्मिका (Ripples) कम होती हैं।

प्रश्न 19: ऊर्जा बैंड सिद्धांत के आधार पर ठोसों को चालक, कुचालक और अर्धचालक में किस प्रकार वर्गीकृत किया जाता है? प्रत्येक का बैंड आरेख दर्शाइए। 4 अंक

उत्तर: ठोसों का वर्गीकरण वर्जित ऊर्जा अंतराल (E_g) के आधार पर होता है:

1. **चालक (Conductors):** इनमें चालन और संयोजकता बैंड अतिव्यापित होते हैं ($E_g = 0$)। बहुत अधिक संख्या में मुक्त इलेक्ट्रॉन उपलब्ध होते हैं।
2. **कुचालक (Insulators):** इनमें वर्जित ऊर्जा अंतराल बहुत बड़ा होता है ($E_g > 3\ eV$)। संयोजकता बैंड से इलेक्ट्रॉन चालन बैंड में नहीं जा पाते।
3. **अर्धचालक (Semiconductors):** इनमें वर्जित अंतराल छोटा होता है ($E_g \leq 3\ eV$)। जैसे सिलिकॉन के लिए $1.1\ eV$ और जर्मेनियम के लिए $0.7\ eV$। सामान्य ताप पर कुछ इलेक्ट्रॉन चालन बैंड में चले जाते हैं।

प्रश्न 20: जेनर डायोड वोल्टेज नियामक (Voltage Regulator) के रूप में किस प्रकार कार्य करता है? वैद्युत परिपथ बनाकर समझाइए। 3 अंक

उत्तर: जेनर डायोड को अनियंत्रित DC आपूर्ति के साथ श्रेणीक्रम में एक प्रतिरोध R_s जोड़कर उत्क्रम अभिनति (Reverse Bias) में लोड प्रतिरोध R_L के समांतर क्रम में जोड़ा जाता है। जब निवेशी वोल्टेज बढ़ता है, तो जेनर डायोड अपने भंजन क्षेत्र (Breakdown) में होने के कारण अपने सिरों पर विभवांतर को स्थिर रखता है, और अतिरिक्त वोल्टेज श्रेणी प्रतिरोध R_s के सिरों पर आ जाता है। इस प्रकार लोड R_L पर हमेशा एक स्थिर वोल्टेज प्राप्त होता है।

प्रश्न 21: कार्बन, सिलिकॉन और जर्मेनियम सभी की संयोजकता 4 है, फिर भी कार्बन कुचालक क्यों है जबकि Si और Ge अर्धचालक हैं? 2 अंक

उत्तर: कार्बन में वर्जित ऊर्जा अंतराल बहुत अधिक (लगभग 5.4 eV) होता है, जबकि सिलिकॉन (1.1 eV) और जर्मेनियम (0.7 eV) में यह बहुत कम होता है। इसलिए कार्बन में इलेक्ट्रॉन आसानी से चालन बैंड में नहीं जा पाते।

प्रश्न 22: क्या एक P-N संधि डायोड को ओम के नियम का पालन करने वाली युक्ति माना जा सकता है? 2 अंक

उत्तर: नहीं, डायोड एक **अनओमीय (Non-ohmic)** युक्ति है क्योंकि इसका V-I ग्राफ एक सीधी रेखा न होकर वक्रीय होता है, अर्थात् इसका प्रतिरोध नियत नहीं रहता।

प्रश्न 23: LED पारंपरिक फिलामेंट बल्बों की तुलना में क्यों बेहतर हैं? तीन कारण दीजिए। 3 अंक

उत्तर: 1. इनकी विद्युत खपत बहुत कम होती है। 2. इनका जीवनकाल अत्यधिक लंबा होता है। 3. ये चालू होने में बिल्कुल समय नहीं लेते (Fast response time)।

प्रश्न 24: सौर सेल के निर्माण के लिए गैलियम आर्सेनाइड (GaAs) को सिलिकॉन से बेहतर क्यों माना जाता है? 2 अंक

उत्तर: गैलियम आर्सेनाइड की सौर विकिरण के लिए अवशोषण क्षमता सिलिकॉन से बहुत अधिक होती है, जिससे यह कम प्रकाश में भी अधिक विद्युत उत्पन्न कर सकता है।

प्रश्न 25: किसी अर्धचालक को गर्म करने पर उसकी विद्युत चालकता पर क्या प्रभाव पड़ता है? 2 अंक

उत्तर: अर्धचालक को गर्म करने पर सहसंयोजक बंध टूटते हैं जिससे अत्यधिक मात्रा में मुक्त इलेक्ट्रॉन और होल युग्म उत्पन्न होते हैं, फलस्वरूप चालकता **बढ़ जाती है**।

प्रश्न 26: एकीकृत परिपथ (Integrated Circuit - IC) क्या है? इसके दो मुख्य लाभ लिखिए। 3 अंक

उत्तर: जब एक ही छोटे सिलिकॉन चिप पर डायोड, ट्रांजिस्टर, प्रतिरोधक और संधारित्र जैसे अनेक इलेक्ट्रॉनिक घटकों को एक साथ निर्मित किया जाता है, तो उसे IC कहते हैं। लाभ: 1. आकार बहुत छोटा हो जाता है, 2. विश्वसनीयता बहुत उच्च होती है।

प्रश्न 27: किसी P-N संधि डायोड का उत्क्रम भंजन विभव (Breakdown Voltage) क्या दर्शाता है? 2 अंक

उत्तर: वह निश्चित अधिकतम उत्क्रम वोल्टेज जिस पर अवक्षय परत के सहसंयोजक बंध अत्यधिक विद्युत क्षेत्र के कारण अचानक टूट जाते हैं और उत्क्रम धारा का मान तीव्रता से बढ़ता है।

प्रश्न 28: अग्र अभिनति में आदर्श डायोड का प्रतिरोध कितना माना जाता है? 2 अंक

उत्तर: एक आदर्श डायोड का अग्र अभिनति में प्रतिरोध **शून्य** तथा उत्क्रम अभिनति में प्रतिरोध **अनंत** माना जाता है।

प्रश्न 29: डायोड के गतिक प्रतिरोध (Dynamic Resistance) से आप क्या समझते हैं? इसका सूत्र लिखिए। 3 अंक

उत्तर: डायोड के सिरों पर विभवांतर में सूक्ष्म परिवर्तन (ΔV) और उसके कारण धारा में होने वाले सूक्ष्म परिवर्तन (ΔI) के अनुपात को गतिक प्रतिरोध कहते हैं। सूत्र: $r_d = \Delta V / \Delta I$।

प्रश्न 30: किसी अर्धचालक में 'इलेक्ट्रॉन गतिशीलता' (μ_e) का क्या अर्थ है? 2 अंक

उत्तर: एकांक विद्युत क्षेत्र लगाने पर मुक्त इलेक्ट्रॉन द्वारा प्राप्त अपवाह वेग (Drift Velocity) को इलेक्ट्रॉन गतिशीलता कहते हैं। ($\mu_e = v_d / E$)।

7. महत्वपूर्ण संख्यात्मक प्रश्न (Numericals - हल सहित)

आंकिक प्रश्न 1: एक शुद्ध सिलिकॉन क्रिस्टल में नैज आवेश वाहक सांद्रता $1.5 \times 10^{16}\ m^{-3}$ है। यदि इसे फास्फोरस परमाणु द्वारा मादित किया जाता है जिससे इलेक्ट्रॉनों की संख्या सांद्रता बढ़कर $4.5 \times 10^{22}\ m^{-3}$ हो जाती है, तो नए होल की सांद्रता ज्ञात कीजिए।

हल:

दिया है:

नैज वाहक सांद्रता, $n_i = 1.5 \times 10^{16}\ m^{-3}$

इलेक्ट्रॉन सांद्रता, $n_e = 4.5 \times 10^{22}\ m^{-3}$

हम जानते हैं (Mass Action Law से):

$$n_e \times n_h = n_i^2$$

इसलिए, $n_h = n_i^2 / n_e$

$n_h = (1.5 \times 10^{16})^2 / (4.5 \times 10^{22})$

$n_h = (2.25 \times 10^{32}) / (4.5 \times 10^{22}) = 0.5 \times 10^{10} = 5 \times 10^9\ m^{-3}$

उत्तर: होल की नई सांद्रता $5 \times 10^9\ m^{-3}$ है।

आंकिक प्रश्न 2: एक P-N संधि डायोड के अग्र अभिनति में विभव का मान ***0.6 V*** से बढ़ाकर ***0.7 V*** करने पर धारा का मान ***10 mA*** से बढ़कर ***30 mA*** हो जाता है। डायोड का गतिक प्रतिरोध ज्ञात कीजिए।

हल:

विभवांतर में परिवर्तन, $\Delta V = 0.7\ V - 0.6\ V = 0.1\ V$

धारा में परिवर्तन, $\Delta I = 30\ mA - 10\ mA = 20\ mA = 20 \times 10^{-3}\ A$

गतिक प्रतिरोध का सूत्र:

$$r_d = \Delta V / \Delta I$$

$r_d = 0.1 / (20 \times 10^{-3}) = 0.1 \times 1000 / 20 = 100 / 20 = 5\ \Omega$

उत्तर: डायोड का गतिक प्रतिरोध ***5 Ω*** है।

8. महत्वपूर्ण तथ्य, ट्रिक्स और याद रखने योग्य बिंदु

- **Trick to remember Doping:** **P**-type = **P**ositive holes = **T**ri-valent (Al, B) -> याद रखें: "P-T" (Physical Training). **N**-type = **N**egative electrons = **P**enta-valent (P, As) -> याद रखें: "N-P" (Net Profit).
- जब डायोड अग्र अभिनति में होता है, तो बाह्य बैटरी का धनात्मक सिरा P से जुड़ा होता है, जो छिद्रों (Holes) को संधि की ओर ढकेलता है, जिससे अवक्षय परत पतली हो जाती है।

9. Quick Revision Notes

1. **अर्धचालक:** चालकता धातु और कुचालक के बीच। 2. **ऊर्जा बैंड:** संयोजकता बैंड (पूर्ण/आंशिक भरा), चालन बैंड (रिक्त/आंशिक भरा), वर्जित अंतराल दोनों के बीच। 3. **मादन:** जानबूझकर अशुद्धि मिलाना। 4. **P-N संधि:** एक तरफ P, दूसरी तरफ N; संधि पर अवक्षय परत बनती है। 5. **दिष्टकारी:** AC को DC में बदलता है। अर्ध-तरंग में 1 डायोड, पूर्ण-तरंग में 2 डायोड।

10. पिछले वर्षों में बार-बार पूछे गए प्रश्न (PYQs)

PYQ (MP Board 2023, 2025): पूर्ण तरंग दिष्टकारी का परिपथ आरेख बनाकर इसकी कार्यविधि समझाइए।

उत्तर: यह प्रश्न अत्यंत महत्वपूर्ण है। उत्तर के लिए धारा प्रवाह की दोनों दिशाओं (D_1 चालू, D_2 बंद और इसके विपरीत) का स्पष्ट उल्लेख करें जैसा प्रश्न 18 में समझाया गया है। साफ-सुथरा तरंग रूप ग्राफ बनाना न भूलें ताकि पूरे अंक प्राप्त हों।