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)

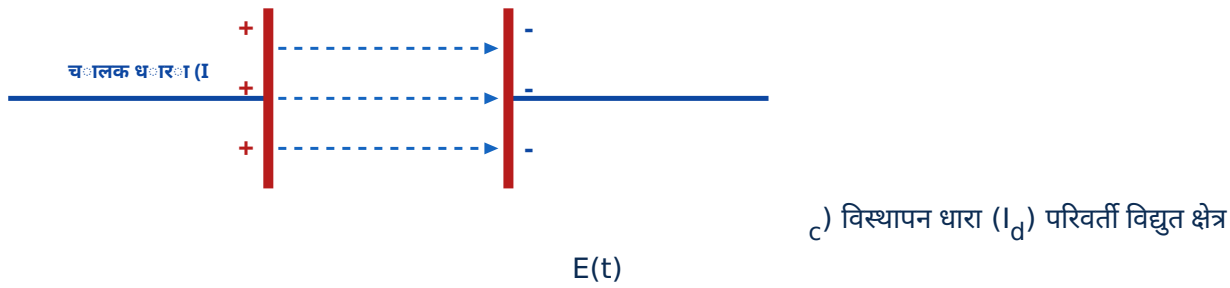
$$I_d = \varepsilon_0 \cdot (d\Phi_E / dt)$$

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।

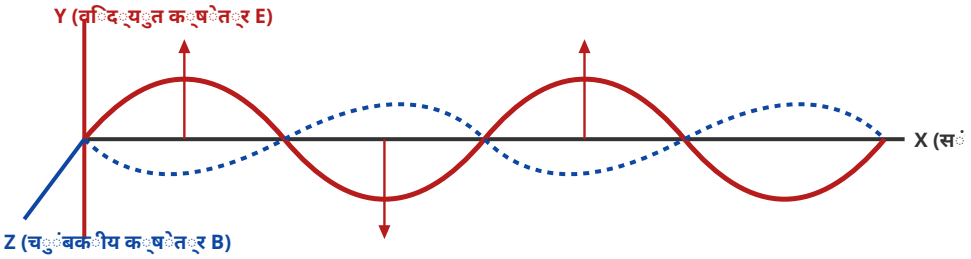


चित्र 1.1: संधारित्र की प्लेटों के मध्य विस्थापन धारा (Displacement Current in Capacitor)

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 ★★★