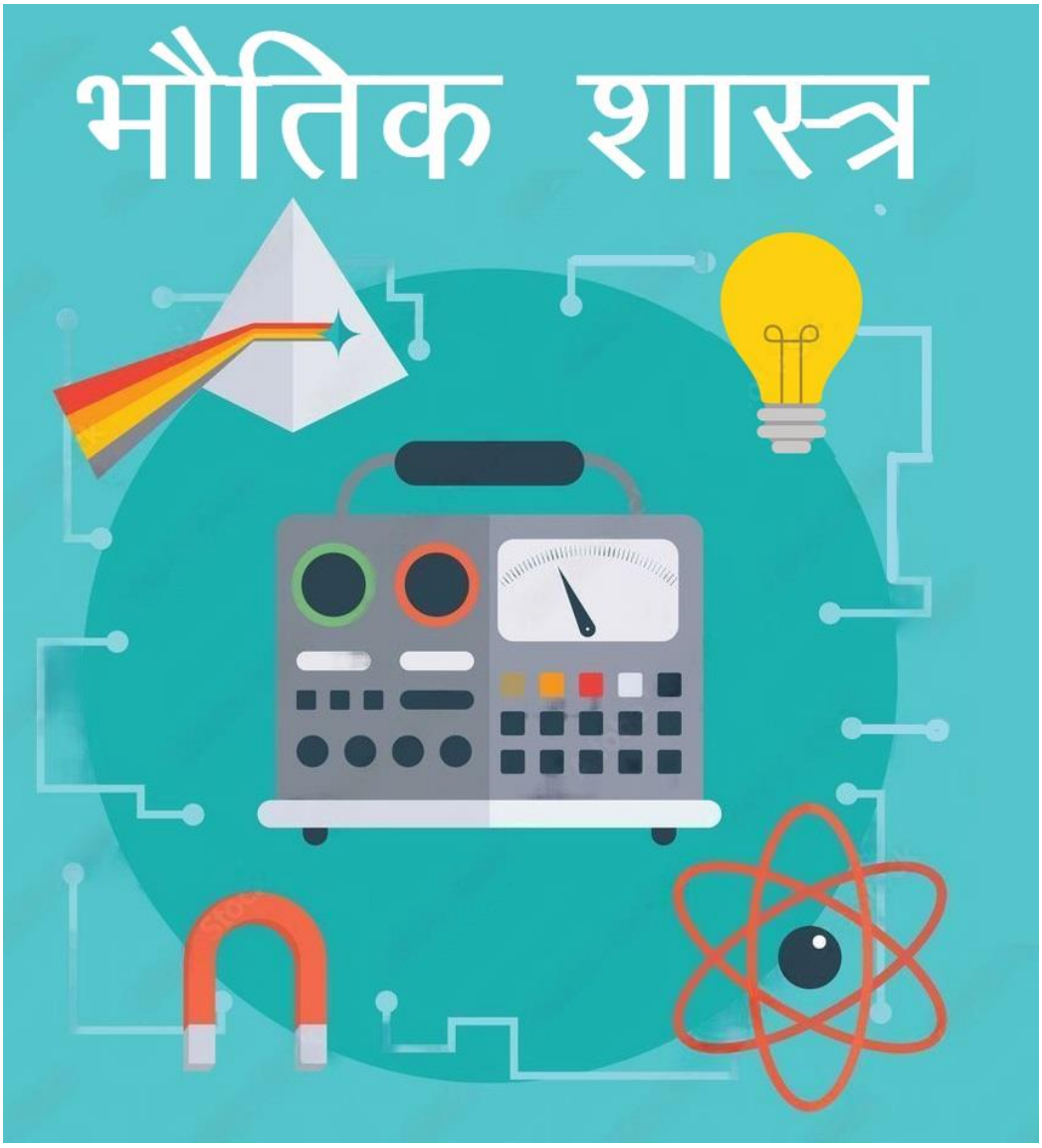
भौतिकी

अध्याय-8: विद्युत चुंबकीय तरंगें



विद्युत चुंबकीय तरंगे

जब किसी विद्युत परिपथ में विद्युत धारा बहुत अधिक आवृत्ति से परिवर्तित (बदलती) है। तब विद्युत परिपथ में उत्पन्न ऊर्जा, तरंगों के रूप में सभी दिशाओं में फैलने लगती है। इन तरंगों को विद्युत चुंबकीय तरंग कहते हैं electromagnetic waves, इन तरंगों के संचरण के लिए माध्यम के आवश्यकता नहीं होती है।

विद्युत चुंबकीय तरंगे निर्वात में $\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$ वेग से चलती हैं। जो कि निर्वात में प्रकाश की चाल C के मान के बराबर है जिसका मान 3×10^8 मीटर/सेकंड होता है।

महत्वपूर्ण बिंदु

1. विद्युत चुंबकीय क्षेत्रों के आयामों का अनुपात $C = \frac{E_0}{B_0}$ होता है। जहां E_0 = विद्युत क्षेत्र में तरंग का आयाम B_0 = चुंबकीय क्षेत्र में तरंग का आयाम
2. गामा किरणें, एक्स किरणें तथा अवरक्त किरणें यह सभी विद्युत चुंबकीय तरंग के उदाहरण हैं। एवं बीटा किरणें इससे अलग है।
3. बैगनी प्रकाश की आवृत्ति अधिक होती है। जबकि लाल प्रकाश की आवृत्ति न्यूनतम होती है।
4. अवरक्त किरणों की आवृत्ति सबसे कम होती है। जबकि गामा किरणों की आवृत्ति सबसे अधिकतम होती है।

मैक्सवेल के समीकरण

वैज्ञानिक मैक्सवेल ने विद्युत तथा चुंबकीय क्षेत्रों से संबंधित नियमों को एक गणितीय रूप में स्थापित किया। इसलिए ही इन नियमों को मैक्सवेल के समीकरण (Maxwell equation) कहते हैं।

यह समीकरण निम्न प्रकार है-

1. विद्युत संबंधी गौस का नियम

इस नियम के अनुसार, किसी बंद पृष्ठ से गुजरने वाला कुल विद्युत फ्लक्स, उस पृष्ठ पर उपस्थित कुल आवेश का $1/\varepsilon_0$ गुना होता है।
यदि बंद पृष्ठ का क्षेत्रफल A तथा आवेश q है और विद्युत क्षेत्र E हो तब यह नियम इस प्रकार लिख सकते हैं

$$\oint \vec{E} \cdot \vec{dA} = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

इस समीकरण को मैक्सवेल का द्वितीय समीकरण कहते हैं।

2. चुंबकत्व संबंधित गौस का नियम

किसी बंद पृष्ठ से गुजरने वाला कुल चुंबकीय फ्लक्स सदैव शून्य होता है। यदि बंद पृष्ठ का क्षेत्रफल A हो एवं चुंबकीय क्षेत्र B है तब गौस का नियम

$$\oint \vec{B} \cdot \vec{dA} = 0$$

इस समीकरण को मैक्सवेल का द्वितीय समीकरण कहते हैं।

3. फैराडे नियम

इस नियम के अनुसार, किसी बंद परिपथ में उत्पन्न प्रेरित विद्युत वाहक बल का परिमाण उस परिपथ से बद्ध चुंबकीय फ्लक्स परिवर्तन की ऋणात्मक दर के बराबर होता है। यदि प्रेरित विद्युत वाहक बल e तथा चुंबकीय फ्लक्स ϕ_B हो तो यह नियम

$$e = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

यदि परिपथ की सीमा रेखा से बिंदु तक की लंबाई dl तथा इस पर विद्युत क्षेत्र E है तब प्रेरित विद्युत वाहक बल

$$e = \oint \vec{E} \cdot \vec{d\ell}$$

अब e का मान रखने पर फैराडे नियम

$$\oint \vec{E} \cdot \vec{d\ell} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

यह मैक्सवेल का तृतीय समीकरण है।

4. एम्पीयर मैक्सवेल नियम

इस नियम के अनुसार, किसी बंद पृष्ठ की सीमा के अनुदिश चुंबकीय क्षेत्र का रेखीय समाकल उस परिपथ पर उपस्थित कुल धारा (अर्थात चालन धारा एवं विस्थापन धारा) के योग का μ_0 गुना होता है।
यदि परिपथ का चुंबकीय क्षेत्र B तथा लघु दूरी dℓ है एवं चालन धारा i_c और विस्थापन धारा i_d हो तब यह नियम

$$\oint \vec{B} \cdot \vec{d\ell} = \mu_0(i_c + i_d)$$

जहां विस्थापन धारा i_d का मान $\varepsilon_0 \frac{d\Phi_B}{dt}$ के बराबर होता है।
यह मैक्सवेल का चतुर्थ समीकरण है।

विद्युत चुंबकीय स्पेक्ट्रम

विद्युत चुंबकीय तरंगे निर्वात में प्रकाश की चाल से चलती हैं। ये तरंगे प्रकाश तरंगे होती हैं। इनमें प्रकाश की भांति अपवर्तन, परावर्तन एवं व्यतिकरण आदि के गुण पाए जाते हैं तरंगदैध्य के परिसर के आधार पर इन तरंगों को एक क्रम में रखा गया है जिसे विद्युत चुंबकीय स्पेक्ट्रम कहते हैं।

विद्युत चुंबकीय स्पेक्ट्रम को नीचे अनेकों भागों में विस्तार से दिया गया है एक-एक तरंगों की आवृत्ति, तरंगदैध्य एवं उनके उपयोग भी दिए गए हैं यहां तरंगों को तरंगदैध्य के बढ़ते क्रम में दर्शाया गया है।

1. रेडियो तरंगे

तरंग धैर्य - रेडियो तरंगों की तरंगदैध्य 1/10 से 10^4 मीटर तक होती है।
आवृत्ति - रेडियो तरंगों की आवृत्ति 3×10^9 से 3×10^4 हर्ट्स तक होती है।

अविष्कारक - मारकोनी
गुण - यह परावर्तित, अपवर्तित होती है।
उपयोग - वीडियो एवं टीवी की संचार प्रणालियों में।

2. माइक्रो तरंगे

तरंग धैर्य - रेडियो तरंगों की तरंगदैध्य 10^{-3} से 3/10 मीटर तक होती है।
आवृत्ति - रेडियो तरंगों की आवृत्ति 3×10^{11} से 10^{9} हर्ट्स तक होती है।
अविष्कारक - हर्ट्स
गुण - इसमें परावर्तन व ध्रुवण का गुण पाया जाता है।
उपयोग - रेडार, माइक्रोवेव ओवन तथा अधिक दूरी तक के संचार में।

3. अवरक्त विकिरण

तरंग धैर्य - रेडियो तरंगों की तरंगदैध्य 8×10^{-7} से 5×10^{-3} मीटर तक होती है।
आवृत्ति - रेडियो तरंगों की आवृत्ति 4×10^{14} से 6×10^{10} हर्ट्स तक होती है।
अविष्कारक - हरशैल
गुण - वोलोमीटर पर परावर्तन, अपवर्तन तथा विवर्तन में।
उपयोग - पौधशाला में एवं पौधों को गर्म रखने में।

4. दृश्य विकिरण

तरंग धैर्य - रेडियो तरंगों की तरंगदैध्य 4×10^{-7} से 8×10^{-7} मीटर तक होती है।
आवृत्ति - रेडियो तरंगों की आवृत्ति 8×10^{14} से 4×10^{14} हर्ट्स तक होती है।
अविष्कारक - न्यूटन
गुण - परावर्तन, अपवर्तन, विवर्तन, ध्रुवण तथा व्यतिकरण आदि।
उपयोग - अणुओं की संरचना का अध्ययन करने में।

5. पराबैगनी किरणें

तरंग धैर्य - रेडियो तरंगों की तरंगदैध्य $1/10^{8}$ से 4×10^{-7} मीटर तक होती है।
आवृत्ति - रेडियो तरंगों की आवृत्ति 3×10^{16} से 8×10^{14} हर्ट्स तक होती है।
अविष्कारक - रिटर

गुण - गामा किरणों के तथा प्रकाश विद्युत प्रभाव के गुण
उपयोग - अदृश्य लिखावट में, नकली दस्तावेज में, फिंगरप्रिंट में

6. एक्स किरणें

तरंग धैर्य - रेडियो तरंगों की तरंगदैध्य $1/10^{11}$ से 3×10^{-8} मीटर तक होती है।
आवृत्ति - रेडियो तरंगों की आवृत्ति 3×10^{19} से 10^{16} हर्ट्स तक होती है।
अविष्कारक - रोजन
गुण - आयनीकरण क्षमता, गामा किरणों के गुण आदि पाए जाते हैं।
उपयोग - रोगों के निवारण में, चिकित्सा विज्ञान में।

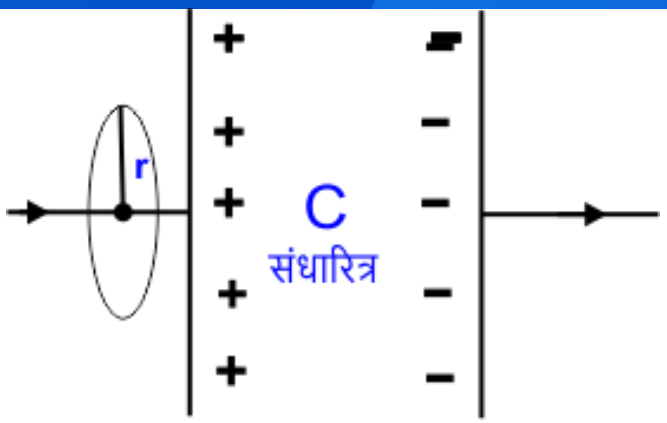
7. गामा किरणें

तरंग धैर्य - रेडियो तरंगों की तरंगदैध्य $1/10^{14}$ से $1/10^{10}$ मीटर तक होती है।
आवृत्ति - रेडियो तरंगों की आवृत्ति 3×10^{22} से 3×10^{18} हर्ट्स तक होती है।
अविष्कारक - बेकेरल या क्यूरी
गुण - विवर्तन, आयनीकरण, प्रतिदीप्ति आदि का गुण।
उपयोग - परमाणु के नाभिक की संरचना में, कैंसर के इलाज में।

एम्पीयर मैक्सवेल नियम

इस नियम के अनुसार, संधारित्र की प्लेटों को विद्युत क्षेत्र में लगाकर एंपियर के नियम प्रयोग करके एक समीकरण प्राप्त होता है इसे एम्पीयर मैक्सवेल समीकरण कहते हैं।

माना एक समांतर प्लेट संधारित्र C है जिसे इस प्रकार के विद्युत परिपथ में जोड़ा गया है जिसमें समय के साथ परिवर्तनशील धारा i प्रवाहित हो रही है। माना समांतर प्लेट संधारित्र के बाहर किसी बिंदु P पर चुंबकीय क्षेत्र ज्ञात करना है। तो इसके लिए धारावाही चालक को केंद्र मानकर r त्रिज्या का एक वृत्ताकार लूप खींचते हैं इस लूप को धारावाही चालक तार के लंबवत रखते हैं। जैसे चित्र में दिखाया गया है।



एम्पीयर मैक्सवेल नियम

एंपीयर का परिपथीय नियम के अनुसार

$$\oint \vec{B} \cdot \vec{d\ell} = \oint B d\ell \cos\theta$$

चूंकि चालक, लूप के लंबवत है इसलिए cosθ का मान 0° होगा तो

$$\oint \vec{B} \cdot \vec{d\ell} = \oint B d\ell \cos\theta = \mu_0 i$$

अब $\oint B d\ell = \mu_0 i$

$$B \oint d\ell = \mu_0 i$$

$B(2\pi r) = \mu_0 i$

या $\oint \vec{B} \cdot \vec{d\ell} = B(2\pi r)$

यदि समांतर प्लेट संधारित्र की प्लेटों का क्षेत्रफल तथा इन प्लेटों के बीच आवेश है तथा आवेश का पृष्ठ घनत्व हो तो समांतर प्लेट संधारित्र पर विद्युत क्षेत्र

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

$$E = \frac{q}{\varepsilon_0 A} \quad (\sigma = q/A \text{ से})$$

अब गौस की प्रमेय के अनुसार समांतर प्लेट संधारित्र की प्लेटों की सतह से गुजरने वाला विद्युत फ्लक्स

$$\phi_E = E \bullet A$$

E का मान उपरोक्त समीकरण में रखने पर

$$\phi_E = \frac{q}{\varepsilon_0 A} \times A$$

$$\phi_E = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

या $q = \phi_E \varepsilon_0$ समी. ①

यदि समांतर प्लेट संधारित्र पर आवेश q समय के साथ परिवर्तित हो रहा है तो विद्युत धारा

$$i = \frac{dq}{dt} \text{ (q = it से)}$$

समी. ① से q का मान रखने पर

$$i = \frac{d(\phi_E \varepsilon_0)}{dt}$$

$$i = \varepsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt}$$

इस विद्युत धारा को मैक्सवेल की विस्थापन धारा कहते हैं इसे i_d द्वारा दर्शाया जाता है।

कोई भी सतह, जिसकी आकृति बंद लूप हैं तो इसमें प्रवाहित होने वाली कुल धारा, सदैव चालन धारा i_c तथा विस्थापन धारा i_d के योग के बराबर होती है। अतः

$$i = i_c + i_d$$

ऊपर समीकरण से विस्थापन धारा का मान रखने पर

$$i = i_c + \varepsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt}$$

इस समीकरण से तात्पर्य है कि संधारित्र की प्लेटों के बाहर चालन धारा, कुल धारा के बराबर तथा विस्थापन धारा शून्य होगी। इसके विपरीत दूसरी ओर संधारित्र की प्लेटों के भीतर चालन धारा शून्य होगी तथा विस्थापन धारा कुल धारा के बराबर होगी। अर्थात्

$i_c = i,\ i_d = 0$ पहले के लिए

$i_c = 0,\ i_d = i$ दूसरे के लिए

अतः एंपीयर का नियम

$$\oint \vec{B} \cdot \vec{d\ell} = \mu_0(i_c + i_d)$$

$$\oint \vec{B} \cdot \vec{d\ell} = \mu_0 i_c + \mu_0 i_d$$

$$\oint \vec{B} \cdot \vec{d\ell} = \mu_0 i_0 + \mu_0 \frac{\varepsilon_0 d\phi_E}{dt}$$

इस समीकरण को एम्पीयर मैक्सवेल नियम कहते हैं।

मैक्सवेल का विद्युत चुंबकीय तरंग का सिद्धांत

विज्ञानिक मैक्सवेल के विद्युत चुंबकीय तरंग सिद्धांत के अनुसार, जब किसी परिपथ में विद्युत धारा उच्च आवृत्ति से बदलती है तो परिपथ में उत्पन्न ऊर्जा तरंगों के रूप में उत्सर्जित होने लगती है। जिसे विद्युत चुंबकीय तरंग कहते हैं। इन तरंगों के विशेष गुण नीचे दिए गए हैं।

विद्युत चुंबकीय तरंग के गुण

1. यह तरंगे प्रकाश तरंगे होती हैं क्योंकि इनमें प्रकाश की भांति अपवर्तित तथा परिवर्तित का गुण पाया जाता है।
2. यह तरंगे गतिशील (त्वरित) आवेशित कण द्वारा ही उत्पन्न की जाती है स्थिर आवेश द्वारा यह तरंगे उत्पन्न नहीं होती हैं।
3. इन तरंगों की औसत ऊर्जा, विद्युत चुंबकीय क्षेत्र में बराबर बराबर विभाजित होती है।
4. इन तरंगों के संचरण के लिए किसी भी पदार्थ के माध्यम की आवश्यकता नहीं होती है। अर्थात् ये बिना माध्यम के ही संचरित हो जाती है।
5. विद्युत चुंबकीय तरंगे निर्वात में प्रकाश की चाल 3×10^8 मीटर/सेकंड से चलती हैं। या ऐसे भी कह सकते हैं कि विद्युत चुंबकीय तरंगे निर्वात मे $\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$ वेग से चलती है। यह दोनों ही बातें एक जैसी हैं।

मैक्सवेल का विद्युत चुंबकीय तरंग का सिद्धांत

भौतिकी वैज्ञानिक मैक्सवेल ने अध्ययन द्वारा बताया कि विद्युत चुंबकीय तरंगे निर्वात में 3×10^8 मीटर/सेकंड की चाल से गति करती हैं। एवं यह चाल निर्वात में प्रकाश की चाल के बराबर है। तब इसके आधार पर मैक्सवेल यह मत दिया कि प्रकाश विद्युत चुंबकीय तरंगों के रूप में संचरित होता है।

इसके आधार पर विद्युत तथा चुंबकीय क्षेत्र से संबंधित एक सूत्र भी प्रदान किया गया।

विद्युत चुंबकीय तरंग का वेग $C = \frac{E}{B}$

सूत्र संबंधी महत्वपूर्ण प्रश्न

1. एक विद्युत चुंबकीय तरंग की आवृत्ति 5×10^{11} हर्ट्स है। तथा विद्युत क्षेत्र में तरंग का आयाम 60 वोल्ट/मीटर है। तो विद्युत चुंबकीय तरंग का चुंबकीय क्षेत्र में तरंग का आयाम ज्ञात कीजिए?

   हल

   यह सवाल महत्वपूर्ण है यह दिखने में जितना आसान है। बल्कि करने में उतना ही अधिक कठिन है।

तरंग का वेग $C = \frac{E_0}{B_0}$

जहां E_0 = विद्युत क्षेत्र में तरंग का आयाम

B_0 = चुंबकीय क्षेत्र में तरंग का आयाम

तथा C = प्रकाश की चाल है 3×10^8 मीटर/सेकंड

यहां सवाल में आवृत्ति दी गई है जिसका कोई यूज़ नहीं है। यह केवल भटकाने के लिए दी गई है। तो

$$C = \frac{E_0}{B_0}$$

$$B_0 = \frac{E_0}{C}$$

$$B_0 = \frac{60}{3 \times 10^8}$$

$B_0 = 2 \times 10^{-7}$ टेस्ला

विस्थापन धारा

जब किसी परिपथ में समय के साथ परिवर्तनशील विद्युत क्षेत्र के कारण उत्पन्न धारा का विस्थापन धारा (displacement current) कहते हैं इसे i_d द्वारा प्रदर्शित किया जाता है।

एंपीयर का परिपथी नियम से, किसी बंद लूप के लिए चुंबकीय क्षेत्र का रेखीय समाकल उस लूप द्वारा घेरे गए क्षेत्रफल से होकर गुजरने वाले कुल धारा का μ_0 गुना होता है अतः

$$\oint \vec{B} \cdot \overrightarrow{d\ell} = \mu_0 i$$

$\int$ समाकलन तथा $\oint$ रेखीय समाकल को निरूपित करता है तथा μ_0 निर्वात की चुंबकशीलता है।

विस्थापन धारा का सूत्र

एम्पीयर मैक्सवेल के नियम से

परिपथ की कुल धारा, सदैव चालन धारा i_c धारा विस्थापन धारा i_d के योग के बराबर होती है। अर्थात्

$i = i_c + i_d$

जहां i_d को विस्थापन धारा कहते हैं। तो

$$i = i_c + \varepsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt}$$

विस्थापन धारा की आवश्यकता

विद्युत चुंबकीय प्रेरण द्वारा ज्ञात किया गया कि विद्युत धारा चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करती है। एवं इसके विपरीत समय के साथ परिवर्तनशील चुंबकीय क्षेत्र द्वारा विद्युत क्षेत्र उत्पन्न किया जाता है।

वैज्ञानिक मैक्सवेल ने परिवर्तनशील धारा से जुड़े संधारित्र के बाहरी बिंदु पर चुंबकीय क्षेत्र ज्ञात करने के लिए एंपीयर का परिपथ नियम प्रयोग किया। तथा परिपथ के बाहर एक अतिरिक्त धारा के अस्तित्व की परिकल्पना की। इस धारा को विस्थापन धारा का नाम दिया गया।

विस्थापन धारा संबंधित प्रश्न

आकाश में 6×10^9 हर्ट्स आवृत्ति की विद्युत चुंबकीय तरंग की तरंगदैर्ध्य होगी?

हल - आकाश में विद्युत चुंबकीय तरंग प्रकाश की चाल से चलती है

तो तरंगदैर्ध्य का सूत्र $C = \nu\lambda$

तरंगदैर्ध्य $\lambda = \nu/C$

जहां ν तरंग की आवृत्ति है

तरंगदैर्ध्य $\lambda = 6 \times 10^9/3 \times 10^8$

तरंगदैर्ध्य $\lambda = 2 \times 10$

$\lambda =$ 20मीटर

अतः विद्युत चुंबकीय तरंग की तरंगदैर्ध्य 20 मीटर होगी।