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:** $B_{axial} = 2 \times B_{eq}$

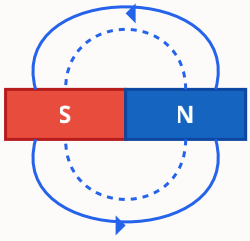
३. भू-चुंबकत्व के घटक (Earth's Magnetic Elements)

- 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: $\tan\delta = B_V / B_H$

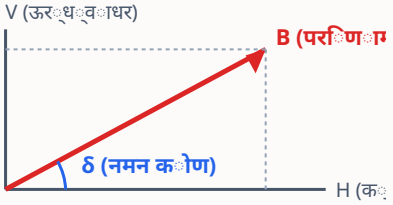
४. पदार्थों के चुंबकीय गुण सम्बंधी सूत्र

- 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)।