इकाई 12 पदार्थों का चुंबकत्व - II

इकाई की रूपरेखा

12.1 प्रस्तावना

इस पाठ्यक्रम के खंड 2 में आपने बाह्य विद्युत-क्षेत्रों के अनुक्रिया (response) के फलस्वरूप उत्पन्न परावैद्युत पदार्थों के व्यवहार का अध्ययन किया। उसके अंतर्गत उन पदार्थों में विद्यमान प्राकृतिक और प्रेरित दोनों ही प्रकार के विद्युत-द्विध्रुवों एवं विद्युत-क्षेत्र में उनके पंक्तिबद्धता (lining up) के आधार पर उनके गुणधर्मों की जांच की गई है। इन पदार्थों के स्थूल गुणधर्मों (macroscopic properties) का अध्ययन ध्रुवण सदिश **P**-प्रति इकाई आयतन में विद्यमान विद्युत-द्विध्रुव आघूर्ण के आधार पर किया गया।

पदार्थों के चुंबकीय गुणधर्मों को भी इसी प्रकार की व्याख्या द्वारा समझा जा सकता है यद्यपि मुक्त चुंबकीय एकध्रुवों के न होने से वह अधिक जटिल रूप में होती है। इन पदार्थों में चुंबकीय द्विध्रुवों को ऐम्पियरी धारा लूपों (Amperian Current loops) के रूप में समझा जा सकता है जिसे सबसे पहले ऐम्पियर ने प्रस्तुत किया था।

एक अर्थ में सभी पदार्थ चुंबकीय होते हैं तथा भिन्न-भिन्न प्रकार के और भिन्न तीव्रताओं के चुंबकीय गुणधर्म प्रदर्शित करते हैं। जैसा कि आप जानते हैं, सभी पदार्थों को तीन मुख्य वर्गों में विभाजित किया जा सकता है, (i) प्रतिचुंबकीय (diamagnetic), (ii) अनुचुंबकीय (paramagnetic), और (iii) लोह-चुंबकीय (ferromagnetic)। इस इकाई में इन पदार्थों के स्थूल व्यवहार का अध्ययन किया जाएगा।

हमने परावैद्युत पदार्थों के स्थूल गुणधर्मों का अध्ययन करते समय इस तथ्य का उपयोग किया था कि इन पदार्थों के अणुओं और परमाणुओं में इलेक्ट्रॉन होते हैं जो गतिशील होते हैं और इन पदार्थों में विद्यमान प्राकृतिक और प्रेरित विद्युत-द्विध्रुवों के लिए उत्तरदायी होते हैं। इन पदार्थों का ध्रुवण, इन द्विध्रुवों के संरेखण (alignment) का सकल प्रभाव होता है। इसी प्रकार हम विभिन्न पदार्थों के चुंबकीय गुणधर्मों का वर्णन इन पदार्थों में स्थित चुंबकीय द्विध्रुवों के आधार पर करते हैं।

इकाई 11 में चुंबकीय द्विध्रुवों के आधार पर प्रति-चुंबकत्व और अनुचुंबकत्व की व्याख्या की जा चुकी है। इन इकाई में पहले लोह-चुंबकत्व के उद्‌गम का उल्लेख किया जाएगा। बाद में चुंबकीय पदार्थ के स्थूल गुणधर्मों का वर्णन किया जाएगा।

इकाई 12 के साथ ही हम चुंबकत्व का अध्ययन समाप्त करते हैं। आगामी खंड में उन स्थितियों पर विचार किया जाएगा जिनमें समय के साथ विद्युत क्षेत्र और चुंबकीय क्षेत्र दोनों में परिवर्तन होता

है। इसके फलस्वरूप अंत में चार अवकल समीकरण प्राप्त होंगे जिन्हें मैक्सवेल-समीकरण कहते हैं।

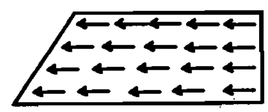
उद्देश्य

इस इकाई के अध्ययन के बाद आप,

- लोह-चुंबकत्व, ऐम्पियरी धारा, चुंबकन (magnetisation), चुंबकीय तीव्रता **H**, चुंबकीय प्रवृत्ति (magnetic susceptibility), चुंबकशीलता (magnetic permeability), आपेक्षिक चुंबकशीलता जैसे शब्दों को समझकर उनकी व्याख्या कर सकेंगे,
- चुबकन **M** (जिसे प्रयोग द्वारा माप सकते हैं) और पदार्थ में परमाणु-धाराओं (जिन्हें नहीं माप सकते) के बीच संबंध स्थापित कर सकेंगे,
- **M** और **H** के लिए अवकल-समीकरण और समाकल समीकरणों की व्युत्पत्ति कर उन्हें समझ सकेंगे और उनकी सहायता से साधारण स्थितियों के लिए क्षेत्र परिकलित कर सकेंगे,
- **B**, **H**, **M**, μ_0, μ और χ के परस्पर संबंध को स्थापित कर सकेंगे,
- अनेक चुंबकीय और अचुंबकीय पदार्थों के लिए **B** और **H** के बीच संबंध स्थापित कर सकेंगे, और
- चुंबकीय परिपथ के लिए ओम-नियम के अनुरूप समीकरण की व्युत्पत्ति कर सकेंगे।

12.2 लोह-चुंबकत्व

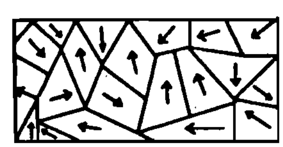
लोह-चुंबकीय पदार्थ उन पदार्थों को कहते हैं जो चुंबकीय क्षेत्रों की उपस्थिति में तीव्र अनुक्रिया करते हैं, ऐसे पदार्थों में परमाणुओं का चुंबकीय द्विध्रुव आघूर्ण, अयुग्मित (unpaired) इलेक्ट्रॉनों के चक्रणों (spins) के कारण उत्पन्न होता है। वे एक-दूसरे के समांतर पंक्तिबद्ध हो जाते हैं। यह पंक्तिबद्धता, पूरे पदार्थ में न होकर एक छोटे आयतन में ही होती है, जिसे डोमेन (domain) कहते हैं, जैसा कि चित्र 12.1 में दिखाया गया है। किन्तु ये आयतन परमाण्विक और आण्विक विमाओं की तुलना में बड़े होते हैं। इस प्रकार की पंक्तिबद्धता बाह्य चुंबकीय क्षेत्र की अनुपस्थिति में भी होती है। आपको यह आश्चर्य हो रहा होगा कि वे कौन-से बल हैं, जिनके कारण विभिन्न परमाणुओं के प्रचक्रण चुंबकीय आघूर्ण (spin magnetic moment) एक-दूसरे के समांतर पंक्तिबद्ध हो जाते हैं। इसकी व्याख्या केवल "विनिमय बलों" (exchange forces), जो कि एक क्वांटम यांत्रिक धारणा है, द्वारा की जा सकती है। यहां विनिमय बलों की विस्तृत चर्चा नहीं की जाएगी। उसका अध्ययन आप भौतिकी के अन्य पाठ्यक्रमों में करेंगे किन्तु उनके बारे में कुछ जानकारी हाशिये की टिप्पणी में दी गई है।



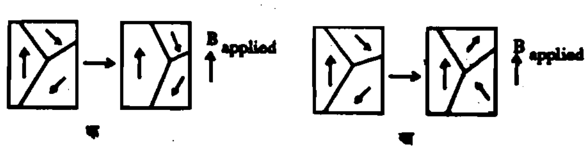
चित्र 12.1: डोमेन

माना एक-दूसरे के समीप स्थित परमाणुओं में दो इलेक्ट्रॉन हैं। यदि इलेक्ट्रॉन-प्रचक्रण समांतर हो, तो पाउली सिद्धांत के कारण वे एक-दूसरे से दूर रहते हैं जिससे उनकी प्रतिकर्षण (repulsion) की कूलॉम ऊर्जा कम हो जाती है। दूसरी ओर यदि ये प्रचक्रण प्रति-समांतर हों, तो इलेक्ट्रॉन एक-दूसरे के नजदीक आ सकते हैं और उनकी कूलॉम ऊर्जा अधिक होती है। इस प्रकार प्रचक्रणों को समांतर बनाकर इलेक्ट्रॉन अपनी ऊर्जा कम कर देते हैं।

किसी अचुंबकित लोह-चुंबकीय पदार्थ में विभिन्न डोमेन (domains) के चुंबकीय आघूर्ण यादृच्छिक रूप से अभिविन्यस्त रहते हैं और कुल मिलाकर पदार्थ का नेट चुंबकीय आघूर्ण शून्य होता है, जैसा कि चित्र में 12.2 में दिखाया गया है। किन्तु बाह्य चुंबकीय क्षेत्र की उपस्थिति में डोमेनों के चुंबकीय आघूर्ण इस प्रकार पंक्तिबद्ध हो जाते हैं कि पदार्थ का नेट चुंबकीय आघूर्ण क्षेत्र की दिशा



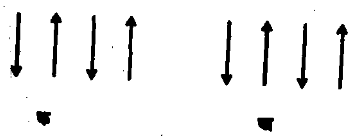
चित्र 12.2: अचुंबकित लोह-दंड में डोमेन। प्रत्येक डोमेन में तीर के निशान चुंबकीय आघूर्ण के संरेखण-दिशा को प्रदर्शित करते हैं।



चित्र 12.3: किसी लोह-चुंबकीय पदार्थ में नेट चुंबकीय आघूर्ण में होने वाले डोमेन-परिवर्तन (क) डोमेन-वृद्धि और (ख) डोमेन-संरेखण, द्वारा होते हैं।

की ओर इंगित करता है। इस क्रियाविधि के अंतर्गत अनुकूल दिशाओं में चुंबकीय आघूर्ण वाले डोमेनों का आकार बढ़ जाता है जबकि वे डोमेन जो बाह्य चुम्बकीय क्षेत्र के प्रतिकूल अभिविन्यस्त रहते हैं, वे आकार में घट जाते हैं, जैसा कि चित्र 12.3 (क) में दिखाया गया है। इसके अलावा संपूर्ण डोमेनों के चुंबकीय आघूर्णों का घूर्णन हो सकता है, जैसा कि चित्र 12.3 (ख) में दिखाया गया है। इस प्रकार पदार्थ चुम्बकित हो जाता है। इसके बाद यदि बाह्य चुंबकीय क्षेत्र को घटाकर शून्य कर दिया जाय तो भी पदार्थ में चुंबकत्व की पर्याप्त मात्रा शेष रह जाती है और पदार्थ स्थायी रूप से चुंबकित हो जाता है। परिवर्ती चुंबकीय क्षेत्रों की उपस्थिति में लोह-चुंबकीय पदार्थों का व्यवहार अत्यंत जटिल होता है और शैथिल्य (hysteresis) की परिघटना प्रदर्शित करता है। शैथिल्य का शाब्दिक अर्थ है – पीछे रह जाना। इसकी चर्चा भाग 12.5 में की जाएगी।

एक निश्चित ताप से अधिक ताप पर, जब तापीय विक्षोभ बल (forces of thermal agitation), "विनिमय" बलों पर प्रभावी हो जाते हैं, तो डोमेन अपने द्विध्रुव आघूर्णों को खो देते हैं और परिणामस्वरूप लोह-चुंबकीय पदार्थ अनुचुंबकीय पदार्थ की भांति व्यवहार करने लगता है। इस निश्चित ताप को "क्यूरी ताप" (Curie temperature) कहते हैं। पदार्थ को ठंडा करने पर वह पुन: लोह-चुंबकीय हो जाता है।



चित्र 12.4: (क) प्रतिलोह चुंबकीय पदार्थ एवं (ख) फेराइट में इलेक्ट्रॉन प्रचक्रणों का आपेक्षिक-अभिविन्यास

अंत में हम संक्षेप में दो अन्य प्रकार के चुंबकत्व का उल्लेख करते हैं जिनका लोह चुंबकत्व से घनिष्ठ संबंध है। ये हैं : प्रतिलोह चुंबकत्व (antiferromagnetism) और फेरी चुंबकत्व (ferrimagnetism) जिसे फेराइट (Ferrite) भी कहते हैं। इस पाठ्यक्रम में प्रतिलोह चुंबकत्व और फेरी चुंबकत्व की भौतिकी का विस्तृत अध्ययन नहीं किया जाएगा। इन पदार्थों का उल्लेख करने का मुख्य कारण यह है कि इनका प्रौद्योगिकी में अत्यंत महत्व है और इनका उपयोग चुंबकीय रिकार्डिंग टेपों, ऐन्टीना और कंप्यूटर-स्मृति (computer-memory) में किया जाता है।

प्रतिलोह चुंबकीय पदार्थों में, पूर्व उल्लिखित विनियम-बल, संलग्न परमाणुओं के समान चुंबकीय आघूर्णों को प्रति-समांतर संरेखण में सेट करने का काम करते हैं। अर्थात् संलग्न चुंबकीय आघूर्ण, विपरीत दिशाओं में सेट हो जाते हैं, जैसा कि चित्र 12.4 (क) में दिखाया गया है। ऐसे पदार्थ, अपने में विद्यमान चुंबकत्व का बहुत कम अथवा कोई भी प्रमाण प्रदर्शित नहीं करते हैं। किन्तु यदि इन पदार्थों को नील-ताप (Neel Temperature) से अधिक ताप तक गरम किया जाए तो विनियम बल का प्रभाव समाप्त हो जाता है और पदार्थ किसी भी अन्य अनुचुंबकीय पदार्थ की भांति व्यवहार करने लगता है।

फेरी चुंबकीय पदार्थों में (जिन्हें सामान्यतया फेराइट कहते हैं), विनिमय-युग्मन (exchange cou pling), पदार्थ में मौजूद परमाणुओं के चुंबकीय आघूर्णों को एक विशेष पैटर्न में व्यवस्थित कर देता है, जैसाकि चित्र 12.4 (ख) में दिखाया गया है। इस प्रकार के संरेखण का बाहरी प्रभाव लोह-चुंबकत्व और प्रतिलोह चुंबकत्व के मध्यवर्ती का होता है। इन पदार्थों में भी एक निश्चित ताप के ऊपर विनिमय युग्मन का प्रभाव समाप्त हो जाता है।

इस प्रकार हम देखते हैं कि पदार्थों में चुम्बकत्व का कारण उनमें स्थायी (और प्रेरित) चुंबकीय द्विध्रुवों का विद्यमान होना है। इन पदार्थों में चुंबकीय द्विध्रुव आघूर्णों का कारण है – परिसंचारी (circulating) विद्युत धाराएं जिन्हें परमाण्विक और आण्विक स्तरों पर ऐम्पियरी धाराएं कहते हैं। यह अपेक्षा की जाती है कि किसी पदार्थ में चुम्बकत्व और ऐम्पियरी धाराओं के बीच सही संबंध की जानकारी आपको होनी चाहिए। इसी के साथ ही चुंबकीय क्षेत्रों में चुंबकीय पदार्थों के व्यवहार और विद्युत-क्षेत्रों में परावैद्युतों (और चालकों) के व्यवहार में परस्पर मूल अंतर (और कभी-कभी समानताओं) का ज्ञान भी आपको होना चाहिए।

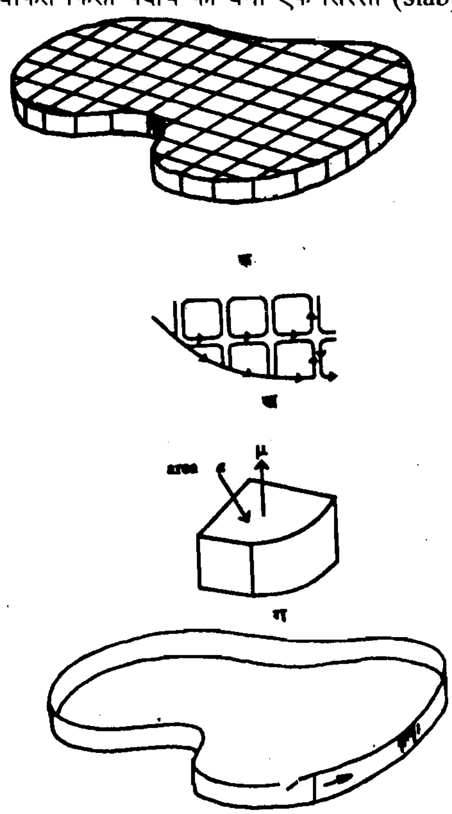
यद्यपि वैद्युत घटनाओं में अनुचुंबकीय और लोह-चुंबकीय पदार्थों की भौतिकी के समतुल्य देखने को मिलते हैं, किन्तु प्रतिचुंबकत्व, केवल चुंबकत्व की ही विशेषता है। छात्रों को सलाह दी जाती है कि वे इस इकाई की पाठ्य सामग्री को पढ़ने के बाद परावैद्युत पर लिखी गई इकाइयों को पढ़े और उसके आधार पर अनुरूपताओं और भिन्नताओं (यदि कोई हों) के बारे में जानकारी प्राप्त करें। आगामी भाग में स्थूल राशि M (जिसे प्रयोग द्वारा माप सकते हैं) और पदार्थ में मौजूद परमाण्विक धाराओं (जो सूक्ष्म राशि हैं तथा जिसे मापा नहीं जा सकता है) के बीच संबंध ज्ञात करेंगे। इस

संबंध की सहायता से उस चुंबकीय क्षेत्र को ज्ञात किया जा सकता है जिसे स्वयं चुंबकित पदार्थ उत्पन्न करता है।

12.3 चुंबकीय पदार्थ के कारण उत्पन्न चुंबकीय क्षेत्र

इकाई 5 में परावैद्युत पदार्थों के स्थूल गुणधर्मों का उल्लेख ध्रुवण (polarization) सदिश, **P**, के रूप में किया गया था। ध्रुवण सदिश की उत्पत्ति, पदार्थ में प्राकृतिक अथवा प्रेरित वैद्युत द्विध्रुवों के द्विध्रुव-आघूर्णों से होती है। चुंबकीय पदार्थों के अध्ययन के लिए भी इसी प्रकार की प्रक्रिया अपनाई जाएगी। आप यह कह सकते हैं कि चुंबकीय पदार्थों के लिए उन सभी समीकरणों का उपयोग हो सकता है जो परावैद्युतों के अध्ययन के दौरान प्राप्त हुए थे। यदि ऐसा होता है, तो विद्युत क्षेत्र सदिश **E** को **B** द्वारा प्रतिस्थापित करते हैं तथा उसके पश्चात् **P** को उसके अनुरूप-चुम्बकन सदिश (magnetization vector) **M** द्वारा प्रतिस्थापित करते हैं। **M**, प्रति इकाई आयतन में विद्यमान चुंबकीय द्विध्रुव आघूर्ण होता है। इसके बाद ध्रुवण आवेश घनत्व ρ_p, को चुंबकीय आवेश घनत्व ρ_m द्वारा प्रतिस्थापित करेंगे चाहे इसका अर्थ कुछ भी हो। इस प्रकार $\nabla . \mathbf{P} = -\rho_p$ की भांति हम $\nabla . \mathbf{M} = -\rho_m$ लिखेंगे। वास्तव में लोगों ने कुछ इसी तरह किया और विश्वास किया कि चुंबकीय आवेश अथवा एकध्रुव (monopole) का अस्तित्व होता है। इसी पूर्व धारणा के आधार पर उन्होंने विद्युत चुंबकत्व के पूरे सिद्धांत की रचना की है। अपितु हम जानते हैं कि दीर्घकालीन अनुसंधान के बावजूद अभी तक किसी भी प्रयोग में चुंबकीय आवेशों अथवा एकध्रुवों की पहचान नहीं हो पाई है। अब हमें ज्ञात है कि पदार्थ का चुम्बकन पदार्थों के अणुओं में परिसंचारी धाराओं के कारण होता है। यह विचार आरंभ में ऐम्पियर ने प्रस्तुत किया था इसलिए इन परिसंचारी धाराओं को ऐम्पियरी धारा लूप कहते हैं। इन धाराओं के उत्पन्न होने का कारण परमाणुओं में इलेक्ट्रॉनों की कक्षीय गति अथवा उनका प्रचक्रण है। चालन धाराओं (conduction current) की भांति इन धाराओं द्वारा, चुंबकीय पदार्थों में, बड़े पैमाने में आवेश का परिवहन नहीं होता है। इन धाराओं को चुम्बकन धारा भी कहते हैं। हम इन धाराओं का चुम्बकन सदिश **M** के साथ संबंध स्थापित करेंगे।

आइये, एकसमान रूप से चुंबकित किसी पदार्थ की बनी एक सिल्ली (slab) लें, जैसाकि चित्र 12.5 (क) में दिखाया गया है।



चित्र 12.5 : (क) एकसमान रूप से चुंबकित पदार्थ की पतली सिल्ली, जिसमें द्विध्रुव बहुत छोटे धारा-लूप (ख) और (ग) द्वारा व्यक्त किए गए हैं, सीमा के चारों ओर प्रवाहित हो रही धारा I (घ) के तुल्य होती है।

इसमें पूरे आयतन में, समान रूप से वितरित बड़ी संख्या में परमाण्विक चुंबकीय द्विध्रुव हैं जो एक ही दिशा की ओर संकेत करते हैं। यदि प्रत्येक द्विध्रुव का चुंबकीय आघूर्ण μ हो तो चुम्बकन M का मान, μ और प्रति इकाई आयतन में अभिविन्यस्त द्विध्रुवों की संख्या का गुणनफल होता है। आपको ज्ञात होगा कि द्विध्रुवों को अल्प धारा-लूपों द्वारा व्यक्त किया जा सकता है। माना कि सिल्ली में अनेक अल्प-धारा-लूप हैं, जैसाकि चित्र 12.5 (ख) में दिखाया गया है। आइये, एक अल्प धारा-लूप पर विचार करें जिसके क्षेत्रफल a है और जिसे चित्र 12.5 (ग) में दिखाया गया है। इसके द्विध्रुव आघूर्ण μ को चुम्बकन **M** के रूप में इस प्रकार लिख सकते हैं :

$$\mu = Madz \tag{12.1}$$

जिसमें dz सिल्ली की मोटाई है।

यदि अल्प लूप में परिसंचारी धारा I हो, तो अल्प लूप के द्विध्रुव आघूर्ण को इस प्रकार व्यक्त किया जा सकता है :

$$\mu = Ia \tag{12.2}$$

समीकरण (12.1) और (12.2) को बराबर करने पर,

$$M = \frac{I}{dz} \text{ or } I = Mdz. \tag{12.3}$$

यहां हमने यह माना है कि चुंबकीय द्विध्रुवों के संगत धारा-लूप आकार में बहुत बड़े हैं, इसलिए दो संग्लन लूपों की चुम्बकन में बहुत अधिक अंतर नहीं होता है। इसलिए समीकरण (12.3) से प्रदर्शित होता है कि चित्र 12.5 (ख) के सभी धारा-लूपों में समान धारा प्रवाहित होती है। ध्यान दें कि सिल्ली के अंदर, विभिन्न लूपों में प्रवाहित होने वाली धाराएं निरस्त (cancel) हो जाती है, क्योंकि यदि किसी एक दिशा में धारा प्रवाहित हो रही है तो उसके ठीक विपरीत दिशा में भी एक अन्य सतत धारा प्रवाहित हो रही होती है। सिल्ली की सीमा पर निरस्त करने के लिए कोई संलग्न लूप नहीं होती है। अतः यह सिल्ली एक धारा-लूप के तुल्य होती है जिसमें धारा, I, सिल्ली के सीमा के चारों ओर प्रवाहित होती है जैसाकि चित्र 12.5 (घ) में दिखाया गया है।

इसलिए चुंबकित पदार्थ की पतली सिल्ली एक धारा-लूप के तुल्य होती है जिसमें धारा Mdz प्रवाहित हो रही हो। अतः सिल्ली के बाहर स्थित किसी भी बिन्दु पर चुंबकीय क्षेत्र का मान उतना ही होगा जितना कि धारा Mdz द्वारा उत्पन्न होता है।

यदि पदार्थ का असमान चुम्बकन हुआ हो, तो पदार्थ के अंदर सभी स्थानों पर ऐम्पियरी परिसंचारी धारा लूपों में परमाण्विक धाराओं का मान समान नहीं होता है। अतः स्पष्ट है कि ऐसे पदार्थों के अंदर धारायें एक-दूसरे को निरस्त नहीं कर पाती हैं। किन्तु फिर भी, हम पाते हैं कि चुंबकित पदार्थ, धारा विरतण $\mathbf{J} = \text{curl } \mathbf{M}$ के तुल्य होता है। आइये, ज्ञात करें कि यह संबंध कैसे प्राप्त हुआ ?

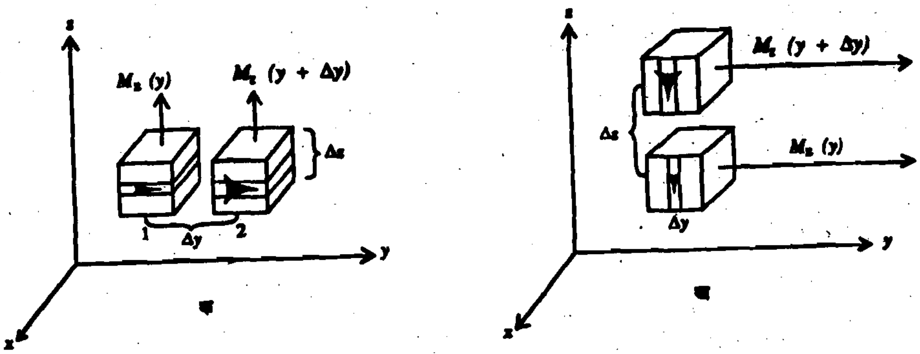
माना, असमान रूप से चुंबकित पदार्थ में दो छोटे ब्लॉक हैं जिनमें से प्रत्येक का आयतन $\Delta x \, \Delta y \, \Delta z$ है। वे घनाकार हैं और y-अक्ष पर एक-दूसरे के निकट स्थित है (देखिये चित्र 12.6 क)। माना इन ब्लॉकों का नाम 1 और 2 है। माना इन ब्लॉकों में **M** का z-घटक क्रमश : $M_z(y)$ और $M_z(y + \Delta y)$ हैं।

माना ब्लॉक "1" के चारों ओर $I(1)$ ऐम्पियर की धारा तथा ब्लॉक "2" के चारों ओर $I(2)$ धारा प्रवाहित हो रही है। समीकरण (12.3) का उपयोग करते हुए और चित्र 12.6 (क) की सहायता लेते हुए, हम लिख सकते हैं कि :

$$I_x(1) = M_z(y)\,\Delta z$$

तथा $$I_x(2) = M_z(y + \Delta y)\,\Delta z$$

दो ब्लॉकों के अंतरपृष्ठ पर दो धाराओं के योगदान से कुल धारा इस प्रकार प्राप्त होगी: ब्लॉक 1 द्वारा उत्पन्न ऋणात्मक x-दिशा में प्रवाहित होने वाली धारा $I(1)$ और ब्लॉक 2 द्वारा उत्पन्न धनात्मक x-दिशा में प्रवाहित होने वाली धारा $I(2)$। धनात्मक x-दिशा में प्रवाहित होने वाली नेट धारा इस प्रकार होगी :



चित्र 12.6: चुंबकित पदार्थ के दो संलग्न ब्लॉक, (क) में दाईं ओर और (ख) में ऊपर की ओर के बड़े तीर उस बिन्दु पर के अधिक चुम्बकन को व्यक्त करते हैं। जिस पृष्ठ पर वे मिलते हैं, वहां नेट धारा x-दिशा में होती है।

यदि पहले ब्लॉक में चुम्बकन $M(x, y, z)$ हो, तो दूसरे ब्लॉक में चुम्बकन का मान यह होगा:

$M(x, y, z) + \frac{\partial M}{\partial y} \Delta y +$ उच्चतर कोटि पद

$I_x(1)$ के रूप में पहले ब्लॉक के चुम्बकन के z-घटक को इस प्रकार लिख सकते हैं:

$M_z \Delta z = I_x(1)$

उसी प्रकार दूसरे ब्लॉक के चुम्बकन के z-घटक को इस प्रकार लिख सकते हैं।

$\left(M_z + \frac{\partial M_z}{\partial y} \Delta y \right) \Delta z = I_x(z)$

यहां उच्चतर कोटि पदों को नहीं लेते हैं क्योंकि प्रत्येक ब्लॉक के बहुत छोटे होने पर वे लुप्त हो जाते हैं।

$$I_x(2) - I_x(1) = \left[M_z(y + \Delta y) - M_z(y) \right] \Delta z$$

अथवा

$$\Delta I_x = + \frac{\partial M_z}{\partial y} \Delta y \, \Delta z \qquad (12.4)$$

M के z-घटक के रूप में, पदार्थ के x-अक्ष के किसी बिन्दु पर नेट धारा को समीकरण (12.4) की सहायता से प्राप्त किया जा सकता है। x-दिशा में, प्रति इकाई क्षेत्रफल में प्रवाहित धारा अर्थात् धारा घनत्व का मान निम्नलिखित है :

$$(J_m)_x = \frac{\Delta I_x}{\Delta y \, \Delta z}$$

जहां $\Delta y \, \Delta z$, ΔI_x धारा के लिए किसी भी ब्लॉक के अनुप्रस्थ काट का क्षेत्रफल है। इसलिए ,

$$(J_m)_x = + \frac{\partial M_z}{\partial y} \qquad (12.5)$$

उपर्युक्त समीकरणों में धाराओं के साथ x अंतसर्ग लगा है जो बतलाता है कि ब्लॉकों के अंतरापृष्ठ पर धारा x-अक्ष की ओर प्रवाहित हो रही है।

x-दिशा में प्रवाहित हो रही धारा को ज्ञात करने की एक अन्य विधि भी है। इसमें y-अक्ष पर एक-दूसरे के ऊपर दोनों ब्लॉकों को लिया जाता है, जैसाकि चित्र 12.6 (ख) में दिखाया गया है। तब हमें इस प्रकार का संबंध प्राप्त होता है :

$$(J_m)_x = - \frac{\partial M_y}{\partial z} \qquad (12.6)$$

इन दो स्थितियों के अध्यारोपण से,

$$(J_m)_x = \frac{\partial M_z}{\partial y} - \frac{\partial M_y}{\partial z} = (\nabla \times M)_x \qquad (12.7)$$

स्पष्ट है कि समीकरण (12.7), $\mathbf{J}_m$ और M के कर्ल को संबंधित करने वाले सदिश समीकरण का x-घटक है। इस y और z घटकों के साथ संयुक्त करने पर, हमें यह प्राप्त होता है :

$$\mathbf{J}_m = \nabla \times \mathbf{M} \qquad (12.8)$$

समीकरण (12.8) अधिक व्यापक व्यंजक है जो चुम्बकन और तुल्य धारा (equivalent current) के परस्पर संबंध को दर्शाता है। समीकरण (12.8) से ज्ञात होता है कि एकसमान रूप से चुंबकीय पदार्थ के अंदर, $\mathbf{J}_m = 0$ होता है यदि $\mathbf{M} =$ स्थिरांक हो तो यह सत्य है। देखिये समीकरण (12.8), धारा केवल पदार्थ के पृष्ठ पर है जहां चुम्बकन में असांतत्य (discontinuity) है (M का मान परिमित से शून्य हो जाता है)। असमान रूप से चुंबकित पदार्थ के अंदर $\mathbf{J}_m$ का मान शून्येतर (non-zero) होता है।

आगामी भाग में हम देखेंगे कि उपरोक्त समीकरणों में $\mathbf{J}_m$, जिसे पदार्थ में चुम्बकन के उद्‌गम की व्याख्या करने के लिए परिभाषित किया है, के स्थान पर चालन धारा घनत्व का अस्तित्व होता है, जो कि वास्तविक आवेश वाहक है और जिसे प्रयोग द्वारा मापा जा सकता है।

12.4 सहायक क्षेत्र H (चुंबकीय तीव्रता) Auxiliary Field H (Magnetic Intensity)

अभी तक हमने पढ़ा कि चुंबकन का कारण परमाणु चुंबकीय आघूर्णों से संबद्ध धारा और इलेक्ट्रॉन के प्रचक्रण हैं। ऐसी धाराओं को बद्ध धारायें (bound current) अथवा चुंबकन ऐम्पियरी धारायें कहते हैं। समीकरण (12.3) में दिया गया धारा घनत्व पदार्थ के अंदर उत्पन्न बद्ध धारा है। माना आपके पास चुंबकित पदार्थ का एक टुकड़ा है। यह टुकड़ा किसी स्थान पर कितना चुम्बकीय क्षेत्र उत्पन्न करेगा ? इसका उत्तर यह है कि इस वस्तु द्वारा उत्पन्न क्षेत्र, उसमें स्थापित बद्ध धाराओं द्वारा उत्पन्न क्षेत्र के ही बराबर होगा। माना हम इस चुंबकीय पदार्थ के चारों ओर एक कुंडली लपेटते हैं और इस कुंडली में एक निश्चित धारा, I प्रवाहित करते हैं। इस व्यवस्था से उत्पन्न कुल क्षेत्र, बद्ध धाराओं के कारण उत्पन्न क्षेत्र और धारा I के कारण उत्पन्न क्षेत्र, के योग के बराबर होता है, धारा I को मुक्त धारा (free current) कहते हैं क्योंकि वह कुंडली में प्रवाहित होती है और कुंडली के साथ श्रेणी में आमीटर लगाकर उसे मापा जा सकता है। (यदि चुंबकीय पदार्थ कोई चालक हो, तो पदार्थ में प्रवाहित होने वाली धारा मुक्त धारा होगी।) स्मरण रहे कि मुक्त धारायें वे धारायें होती है, जो बाह्य वोल्टता स्रोतों द्वारा उत्पन्न होती हैं। जबकि आंतरिक धारायें, परमाणुओं में इलेक्ट्रॉनों की गति के कारण उत्पन्न होती हैं। धारा मुक्त होती है क्योंकि बैटरी में एक तार लगाकर इसे प्राप्त किया जाता है तथा स्विच द्वारा इसको प्रवाहित किया जाता है या इसका प्रवाहित होना बंद किया जा सकता है। इसलिए कुल धारा घनत्व $\mathbf{J}$ को इस प्रकार लिख सकते हैं :

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_f + \mathbf{J}_m \qquad (12.9)$$

जहां $\mathbf{J}_f$ मुक्त धारा घनत्व है।

आइये, चुंबकीय क्षेत्र ज्ञात करने के लिए ऐम्पियर नियम का उपयोग करें। अवकल रूप में इसे इस प्रकार लिख सकते हैं,

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \qquad (9.46)$$

(देखिये इकाई 9)

समीकरण (12.9) का उपयोग करने से एम्पियर नियम को इस प्रकार लिख सकते हैं :

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{J}_f + \mathbf{J}_m)$$

जैसाकि पहले बताया जा चुका है, $\mathbf{J}_m$ को प्रयोग द्वारा मापने की कोई विधि नहीं है किंतु हम उसे समीकरण (12.8) द्वारा चुम्बकन सदिश $\mathbf{M}$ के रूप में व्यक्त कर सकते हैं जिसे मापा जा सकता है। अतः हम इस प्रकार लिख सकते हैं :

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}_f + \mu_0 \nabla \times \mathbf{M}$$

अथवा

$$\nabla \times \left(\frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M} \right) = \mathbf{J}_f \qquad (12.10)$$

समीकरण (12.10) क्षेत्र $\left(\frac{\mathbf{B}}{\mu_0}-\mathbf{M}\right)$ के लिए एक अवकल समीकरण है। यह अवकल समीकरण मुक्त धारा घनत्व $\mathbf{J}_f$ के रूप में लिखा गया है जो कि क्षेत्र का स्रोत है। इस क्षेत्र सदिश को एक नये प्रतीक **H** द्वारा व्यक्त किया जाता है। अर्थात्

$$\frac{\mathbf{B}}{\mu_0}-\mathbf{M} = \mathbf{H} \tag{12.11}$$

सदिश **H** को चुंबकीय "तीव्रता" (Magnetic intensity) सदिश कहते हैं। जो वास्तव में **B** का नाम है किन्तु ऐतिहासिक कारणों से यह नाम **H** को दिया गया है। समीकरण (12.11) का उपयोग करने से समीकरण (12.10) इस प्रकार हो जाता है :

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_f \tag{12.12}$$

दूसरे शब्दों में **H** का संबंध मुक्त धारा के साथ उसी प्रकार का है, जिस प्रकार **B** का संबंध कुल धारा के साथ होता है। यहां कुल धारा का अर्थ है बद्ध धारा एवं मुक्त धारा। यहां आप निश्चय ही नये सदिश क्षेत्र **H** को प्रस्तुत करने के उद्देश्य के बारे में सोचने के लिए मजबूर होंगे। व्यावहारिक कारण से सदिश **H** बहुत उपयोगी है क्योंकि उसे केवल बाह्य धारा की जानकारी द्वारा परिकलित किया जा सकता है। जबकि **B** कुल धारा से संबंधित होता है जो कि ज्ञात नहीं है। समीकरण (12.12) को समाकल रूप में इस प्रकार भी लिख सकते हैं :

$$\int \mathbf{H}.d\mathbf{l} = I_f \tag{12.13}$$

जहां I_f बाईं ओर के रेखा समाकल के पथ द्वारा बद्ध पृष्ठ में प्रवाहित होने वाली चालन धारा हैं। यहां **H** का रेखा समाकल, बंद पथ के चारों ओर होता है जो पदार्थ से गुज़र भी सकता है और नहीं भी। उपर्युक्त समीकरण का उपयोग चुंबकीय पदार्थ की उपस्थिति में भी **H** को परिकलित करने के लिए किया जा सकता है।

बोध प्रश्न 1

चित्र 12.7 में लोहे के एक टुकड़े में एक कुंडली लपेटी गई है जिसमें 5A की धारा प्रवाहित हो रही है। पथ (1), (2) और (3) के लिए $\int \mathbf{H}\,.\,d\mathbf{l}$ मान ज्ञात कीजिए। यह भी बताइए कि किस पथ (पथों) के लिए $\mathbf{B} = \mathbf{H}$ और $\mathbf{B} \neq \mathbf{H}$ हैं।

चित्र 12.7   बोध प्रश्न 7

समीकरण (12.3) से हम देखते हैं कि **M** का मात्रक ऐम्पियर प्रति मीटर है। समीकरण (12.11) से ज्ञात होता है कि सदिश **H** के वही मात्रक हैं जो **M** के हैं, इसलिए **H** भी ऐम्पियर प्रति मीटर में मापा जाता है। विद्युत इंजीनियर जो विद्युत चुंबकों, ट्रॉसफ़ार्मरों आदि का काम करते हैं वे **H** के मात्रक के लिए ऐम्पियर फेरे प्रति मीटर का उपयोग करते हैं क्योंकि फेरे का तात्पर्य धारा वाही कुंडली में फेरों की संख्या से है, जो कि विमाहीन राशि है अत: आपको यह भ्रम नहीं होना चाहिए कि **H** के दोनों मात्रक भिन्न-भिन्न हैं।

पदार्थ के चुंबकीय गुणधर्म

अनुचुंबकीय और प्रतिचुंबकीय पदार्थों का चुम्बकन बाह्य चुम्बकीय क्षेत्र की उपस्थिति में ही देखने को मिलता है। जब क्षेत्र को हटा दिया जाता है, तो **M** लुप्त हो जाता है। वास्तव में, देखा गया है कि **M**, **B** के समानुपाती होता है बशर्ते क्षेत्र बहुत प्रबल न हो।

अत:

$$\mathbf{M} \propto \mathbf{B} \tag{12.14}$$

समीकरण (12.14) को **B** की अपेक्षा **H** के रूप में व्यक्त करने की प्रथा है, इस प्रकार

$$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H} \tag{12.15}$$

आनुपातिकता स्थिरांक χ_m को पदार्थ की चुंबकीय प्रवृत्ति (magnetic susceptibility) कहते हैं। यह विमाहीन राशि होती है जिसका मान प्रत्येक पदार्थ के लिए भिन्न-भिन्न होता है। χ_m की सहायता से किसी भी पदार्थ के चुंबकीय गुणधर्मों को व्यक्त किया जा सकता है। प्रतिचुंबकीय पदार्थों के लिए χ_m का मान ऋणात्मक और अनुचुंबकीय पदार्थों के लिए इसका मान धनात्मक होता है। इसका मान 1 से बहुत कम होता है अर्थात् $|\chi_m| << 1$ होता है। इसलिए निर्वात में χ_m का मान शून्य होता है क्योंकि **M** केवल चुंबकित पदार्थ में ही विद्यमान है। नीचे दी गई संक्षिप्त सारणी में सामान्य ताप पर प्रतिचुंबकीय और अनुचुंबकीय पदार्थों के लिए χ_m के मान दिए गए हैं।

	पदार्थ	χ_m
अनुचुंबकीय	ऐल्युमिनियम	2.10×10^{-5}
अनुचुंबकीय	सोडियम	0.84×10^{-5}
अनुचुंबकीय	टंगस्टन	7.60×10^{-5}
अनुचुंबकीय	ऑक्सीजन	190×10^{-5}
प्रतिचुंबकीय	बिस्मथ	-1.64×10^{-5}
प्रतिचुंबकीय	तांबा	-0.98×10^{-5}
प्रतिचुंबकीय	चांदी	-2.40×10^{-5}
प्रतिचुंबकीय	स्वर्ण	-3.50×10^{-5}

लोह चुंबकीय पदार्थों की प्रवृत्तियों के लिए कोई सारणी नहीं दी गई हैं क्योंकि इन पदार्थों के लिए χ_m केवल **H** पर ही नहीं बल्कि पदार्थ के पिछले चुंबकीय इतिहास पर भी निर्भर करता है।

समीकरण (12.11) का $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$ के रूप में उपयोग करने से हमें यह प्राप्त होता है :

$$\mathbf{B} = \mu_0(1 + \chi_m)\mathbf{H} \tag{12.16}$$

$$= \mu_0 K_m \mathbf{H}$$

$$\boxed{\therefore \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}} \tag{12.17}$$

जहां $\quad \mu = \mu_0 K_m = \mu_0(1 + \chi_m)$

$$\boxed{\therefore K_m = \frac{\mu}{\mu_0}} \tag{12.18}$$

μ को माध्यम की चुंबकशीलता (permeability of the medium) कहते हैं तथा K_m को आपेक्षिक चुंबकशीलक (relative permeability) कहते हैं। हम देखते हैं कि μ की वही विमा है जो μ_0 की है एवं K_m विमाहीन है। निर्वात में $\mu = \mu_0$ और $\chi_m = 0$ होता है। आपेक्षिक चुंबकशीलता, K_m का मान किंचित् भिन्न होता है क्योंकि $K_m = (1 + \chi_m)$ है। K_m का मान अनचुंबकीय पदार्थों के लिए एक से अधिक और प्रतिचुंबकीय पदार्थों के लिए एक से कम होता है।

यदि तीन राशियों चुंबकीय प्रवृत्ति, χ_m आपेक्षिक चुंबकशीलता, K_m अथवा चुंबकशीलता, μ में से कोई भी एक राशि ज्ञात हो तो पदार्थ के चुंबकीय गुणधर्मों को पूर्णयता सुनिश्चित किया जा सकता है।

उदाहरण

1 मीटर लंबे ऐल्युमिनियम के टोरॉइड (toroid) के चारों ओर एक तार के 100 फेरे लपेटे गये हैं। तार में 1A की अपरिवर्ती धारा प्रवाहित हो रही है। टोरॉइड में चुंबकीय क्षेत्र, **B**, का मान 1.2567×10^{-4} wbm^{-2} है। निम्नलिखित राशियों के मान ज्ञात कीजिए :

(i) H, (ii) χ_m और K_m (iii) टोरॉइड में M,) और (iv) तुल्य पृष्ठ चुम्बकन धारा I_m।

हल :

i) समीकरण (12.13) के अनुसार

धारा द्वारा उत्पन्न H, का मान ज्ञात करने के लिए हम टोरॉइड के अनुदिश एक वृत्तीय समाकलन-पथ की कल्पना कर लेते हैं। इस 1m लंबे पथ में H का मान सभी स्थानों पर समान है। इस समाकलन पथ से गुज़रने वाले तार-फेरों की संख्या 100 × 1A है। H की दिशा सर्वत्र वृत्तीय समाकलन-पथ के समांतर होता है, इसलिए

$$H \times 1 = 100 \times 1$$

अथवा $$H = \frac{100 \times 1\text{A}}{1\text{m}} = 100\ \text{A m}^{-1}$$

ii) समीकरण (12.16) से

$$B = \mu_0 K_m H$$

$$K_m = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{1256.7 \times 10^{7}}{4\pi \times 10^{-7}} \times \frac{1}{100} = 1.00005$$

और $(1 + \chi_m) = K_m$

$$\therefore \chi_m = K_m - 1 = 1.00005 - 1 = 5 \times 10^{-5}$$

iii) समीकरण (12.15) से

$$M = \chi_m H$$

$$= 5 \times 10^{-5} \times 100\ \text{A m}^{-1} = 5 \times 10^{-3}\ \text{Am}^{-1}$$

iv) $I_m = ML$

$$= 5 \times 10^{-3}\ \text{Am}^{-1} \times 1\text{m} = 5\text{mA}$$

ऊपर हमने यह माना है कि टोरॉइड के अनुप्रस्थ काट पर और टोरॉइड के अक्ष पर B, H और M का मान एकसमान रहता है।

निम्नलिखित बोध प्रश्न को हल करने का प्रयत्न कीजिए।

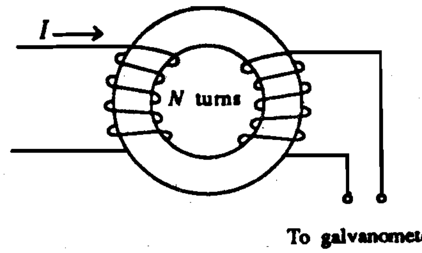
बोध प्रश्न 2

एक ऐसा वायु-क्रोड (air-core) परिनालिका (solenoid) लीजिए जिसमें प्रति सेन्टीमीटर 20 फेरे, हों और 0.18 A की धारा प्रवाहित हो रही हो। परिनालिका के केन्द्र में H और B का मान ज्ञात कीजिए। यदि एक लोहे की क्रोड जिसकी निरपेक्ष चुंबकशीलता 6×10^{-3} है, परिनालिका में प्रविष्ट किया जाय तो इस स्थिति में H और B का मान ज्ञात कीजिए। ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \text{Hm}^{-1}$)

12.5 चुंबकीय पदार्थ के लिए B और H के बीच संबंध

इस भाग में **M** और **B** की विशिष्ट निर्भरता पर विचार किया जाएगा। **M** और **B** के बीच संबंध अथवा **B** और **H** के बीच संबंध चुंबकीय पदार्थ के स्वभाव पर निर्भर करता है और उन्हें प्राय: प्रयोग द्वारा ज्ञात किया जाता है।

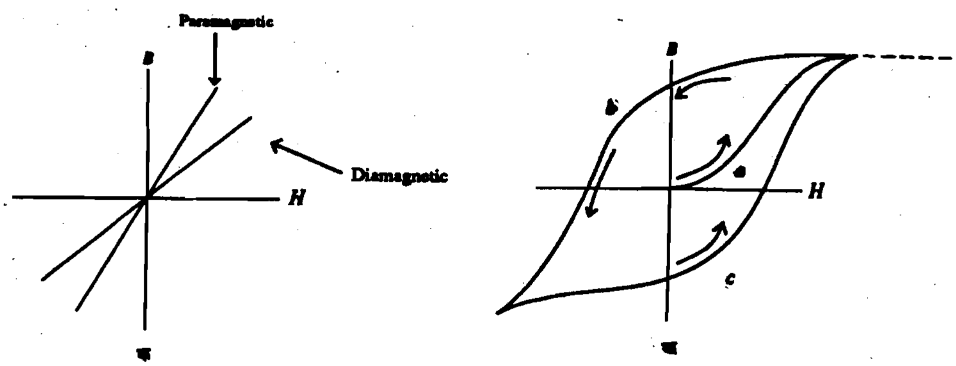
एक सरल प्रायोगिक व्यवस्था में एक टोरॉइड होता है जिसके अंदर कोई भी चुंबकीय पदार्थ होता है। टोरॉइड के चारों ओर प्राथमिक और द्वितीयक दो कुंडलियां लपेटी हुई होती हैं, जैसाकि चित्र 12.8 में दिखाया गया है।



चित्र 12.8: किसी चुंबकीय पदार्थ में B और M अथवा B और H के बीच संबंध ज्ञात करने की व्यवस्था।

यदि हम यह मान लें कि स्वयं टोरॉइड की त्रिज्या की तुलना में टोरॉइड के फेरों के अनुप्रस्थ काट की त्रिज्या कम हो तो टोरॉइड के अंदर चुंबकीय क्षेत्र को लगभग एकसमान माना जा सकता है। प्राथमिक कुंडली से प्रवाहित होने वाली धारा H स्थापित करती है। प्राथमिक कुंडली में धारा के स्थापित होने से विद्युत वाहक बल (वि. वा. ब.) प्रेरित होता है। प्रेरित वोल्टता को मापकर हम चुंबकीय पदार्थ के अंदर फ्लक्स Φ में हो रहे परिवर्तन और इस प्रकार B को ज्ञात कर सकते हैं। यदि हम H को स्वतंत्र चर के रूप में मान लें और $B = 0$ से आरंभ कर B में होने वाले परिवर्तनों को आरेख के रूप में प्राप्त करें तो H के किसी विशेष मान के लिए B का मान ज्ञात किया जा सकता है। इस प्रकार विभिन्न प्रकार के चुंबकीय पदार्थ के लिए B-H वक्र प्राप्त किया जा सकता है।

ऊपर वर्णित प्रयोग को प्रतिचुंबकीय और अनुचुंबकीय पदार्थों के लिए भी प्रयुक्त किया जा सकता है। इसके लिए $I = 0$ से आरंभ करते हैं और धीरे-धीरे I का मान बढाकर B और H के मान ज्ञात कर लेते हैं। इन पदार्थों के लिए B एवं H का आरेख चित्र 12.9 (क) में दिखाया गया है।



चित्र 12.9: विभिन्न प्रकार के चुंबकीय पदार्थों के लिए आंतरिक चुम्बकीय क्षेत्र (B) तथा प्रयुक्त चुंबकीय क्षेत्र (H) के बीच वक्र। (क) प्रतिचुंबकीय और अनुचुंबकीय में रैखिक संबंध होता है। (ख) लोह चुंबकीय पदार्थों लिए संबंध, प्रयुक्त क्षेत्र की प्रबलता और पदार्थ के पिछले इतिहास पर निर्भर करता है। (ख) में क्षैतिज अक्ष की अपेक्षा ऊर्ध्वाधर-अक्ष में क्षेत्र प्रबलतायें बहुत अधिक होती हैं। तीर उस दिशा की ओर संकेत करते हैं जिसमें क्षेत्रों का परिवर्तन होता है।

हम देखते हैं कि आरेख एक सीधी रेखा है, जैसाकि निम्नलिखित संबंध से प्रकट होता है,

$$B = \mu_0 (1 + \chi_m) H \tag{12.16}$$

जहां μ_0 और χ_m स्थिरांक हैं। आरेख की प्रवणता, $\mu_0 (1 + \chi_m)$ के बराबर होती है। इसमें से χ_m का मान नीचे गये समीकरण द्वारा ज्ञात किया जा सकता है।

$$\chi_m = \frac{\text{ढाल}}{\mu_0} - 1.$$

प्रतिचुंबकीय पदार्थों के लिए क्योंकि ढाल $< \mu_0$ होता है, अतः $\chi_m < 0$ होता है। अनुचुंबकीय पदार्थों के लिए ढाल $> \mu_0$ होता है जिससे कि $\chi_m > 0$ होता है।

यदि उपर्युक्त प्रयोग में लोहे जैसा किसी लोहचुंबकीय पदार्थ का उपयोग किया जाए तो एक विशिष्ट प्रकार का *B-H* वक्र प्राप्त होता है, जैसा कि चित्र 12.9 (ख) में दिखाया गया हैं।

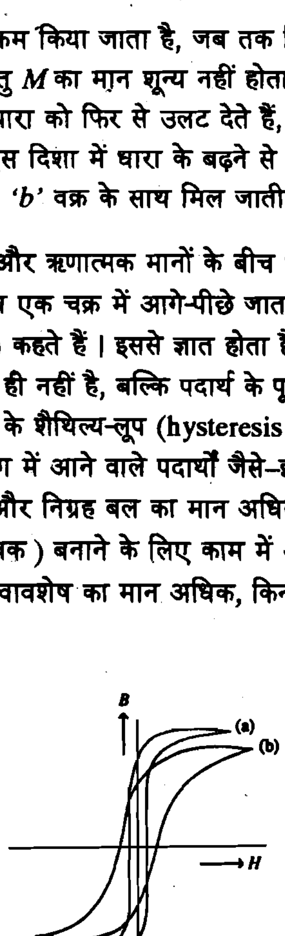
i) $I = 0$ पर अर्थात् जब $H = 0$ हो, तो B का मान शून्य होता है। यदि I को बढ़ाया जाये तो B और H का निर्धारण I के बढ़ते मानों के लिये किया जाता है। सबसे पहले, H के साथ B में वृद्धि वक्र "a" के अनुसार होती है। H के एक अधिक मान पर वक्र, रैखिक हो जाता है (जिसे चित्र में डैश रेखा द्वारा दिखाया गया है) जो यह दर्शाता है कि H के इस मान के बाद M में वृद्धि नहीं होती है तथा सभी डोमेन द्विध्रुव आघूर्ण के एक ही दिशा में होने की वजह से पदार्थ संतृप्त हो गया है।

ii) यदि संतृप्त अवस्था में पहुंचने के बाद कुंडली में धारा को घटाकर H का मान पुनः शून्य कर दिया जाए तो *B-H* वक्र का स्वरूप *b* वक्र के जैसा होता है। जब H शून्य हो जाता है फिर भी, कुछ B शेष रह जाता है जो इस बात को व्यक्त करता है कि $I = 0$ हो जाने पर भी पदार्थ में कुछ B अथवा चुम्बकन शेष रह जाता है अर्थात् पदार्थ स्थायी रूप से चुंबकित हो जाता है। $H = 0$ के लिए B का मान **चुंबकत्वावशेष** (remanence) कहलाता है।

iii) यदि प्राथमिक कुंडली में धारा की दिशा को उलट दिया जाये और उसका मान बढ़ाया जाय तो *B-H* वक्र *'b'* वक्र के अनुसार होता है, जब तक कि H के एक निश्चित मान पर B शून्य न हो जाय। H के इस मान को निग्रह बल (coercive force) कहते हैं। यदि धारा का मान ऋणात्मक दिशा में बढ़ाते रहें तो वक्र *'b'* जैसा होता है, जब तक कि संतृप्ति अवस्था पुनः प्राप्त न हो जाए।

iv) अब धारा को कम किया जाता है, जब तक कि वह फिर से शून्य न हो जाय। इस अवस्था में $H = 0$ है, किन्तु M का मान शून्य नहीं होता है, अपितु चुम्बकन विपरीत दिशा में होता है। इस स्थिति में धारा को फिर से उलट देते हैं, जिससे कुंडली में धारा फिर से धनात्मक दिशा में हो जाती है। इस दिशा में धारा के बढ़ने से वक्र *'C'* वक्र के अनुसार बढ़ता है और संतृप्ति की अवस्था पर *'b'* वक्र के साथ मिल जाती है।

यदि बृहत् धनात्मक और ऋणात्मक मानों के बीच धारा को बढ़ाया एवं घटाया जाये, तो *B-H* वक्र *'b'* और *'c'* के साथ एक चक्र में आगे-पीछे जाता है। इस चक्रीय वक्र को शैथिल्य वक्र (Hystersis curve) कहते हैं। इससे ज्ञात होता है कि B, H का एकल मान फलन (single valued function) ही नहीं है, बल्कि पदार्थ के पूर्ववर्ती अवस्था पर भी निर्भर करता है। एक पदार्थ से दूसरे पदार्थ के शैथिल्य-लूप (hysteresis loop) में बहुत भिन्नता होती है। स्थायी चुंबक बनाने के लिए उपयोग में आने वाले पदार्थों जैसे–इस्पात, ऐल्निको आदि के फैले हुए (wide) शैथिल्य-लूप होते हैं और निग्रह बल का मान अधिक होता है (देखिए चित्र 12.10)। किंतु विद्युत चुंबक (अस्थायी चुम्बक) बनाने के लिए काम में आने वाले पदार्थ जैसे —नर्म लोहा, परमेलॉय आदि के लिए चुंबकत्वावशेष का मान अधिक, किन्तु निग्रह बल का मान बहुत कम होता है। वे



चित्र 12.10: कुछ पदार्थों के शैथिल्य वक्र। वक्र (क) और (ख) क्रमशः नर्म लोहा और इस्पात के लिए हैं।

लोहचुंबक पदार्थ जैसे – आयरन – सिलिकन (0.8 - 4.8 प्रतिशत) मिश्रधातु आदि जो ट्रांसफॉर्मरों की क्रोडों में प्रयुक्त होते हैं, उनका शैथिल्य-लूप संकरा होता है।

12.6 चुंबकीय परिपथ (Magnetic Circuits)

किसी विद्युत मशीन अथवा विद्युत उपकरण में चुंबकन बल द्वारा चुंबकीय फ्लक्स जिस बंद पथ का अनुसरण करती है, उसे चुंबकीय परिपथ कहते हैं। (चुंबकन बल, धारा कुंडली अथवा स्थायी चुंबक के कारण हो सकता है।)

चुंबकीय परिपथ और विद्युत परिपथ के बीच समानता का अध्ययन करने के लिए हम चुंबकीय परिपथ के लिए ओम-नियम के संगत एक संबंध को विकसित करते हैं। आइये, एक लोहे के वलय पर विचार करें (चित्र 12.11) जिसे उसके ऊपर लपेटी हुई कुंडली में प्रवाहित विद्युत-धारा द्वारा चुंबकित किया गया हो। माना,

I = कुंडली में प्रवाहित होने वाली धारा,

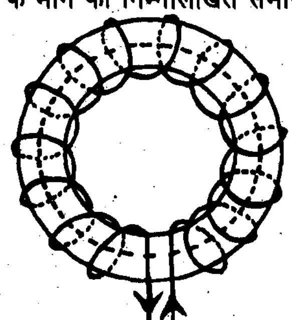
N = कुंडली में फेरों की संख्या,

l = चुंबकीय परिपथ की लंबाई (वलय की माध्य परिधि)

A = वलय के अनुप्रस्थ काट का क्षेत्रफल,

μ = लोहे की चुंबकशीलता।

इस स्थिति में संपूर्ण उत्पन्न चुंबकीय फ्लक्स लोहे के वलय के अंदर तक ही सीमित रहता है और फ्लक्स का क्षरण (leakage) बहुत कम होता है (इसका कारण बाद में बताया जाएगा)। हम पहले देख चुके हैं कि वलय के अंदर **H** के मान को निम्नलिखित समीकरण द्वारा व्यक्त किया जाता है :



चित्र 12.11: चुंबकीय परिपथ

$$\int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = NI \qquad \text{ऐम्पियर नियम से}$$

जहां समाकलन-पथ, वलय के अनुदिश है। क्योंकि किसी विद्युत परिपथ के लिए विद्युत क्षेत्र **E** का रेखा-समाकल विद्युतवाहक बल (वि. वा. ब.) के बराबर होता है, अतः उसी प्रकार चुंबकीय क्षेत्र **H** के रेखा-समाकल को चुंबकत्व वाहक बल (magnetomotive force–M.M.F.) कहते हैं।

$$\therefore \text{M.M.F.} = \int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = NI$$

वलय में इस पथ के प्रत्येक बिन्दु पर

$$H = \frac{B}{\mu} \quad \text{होता है।}$$

इसके अतिरिक्त यदि चुंबकीय फ्लक्स $\Phi = BA$ हो, तो $H = \Phi/\mu A$ होगा, इसलिए

$$\text{M.M.F.} = \int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \Phi \int \frac{dl}{\mu A} = NI \qquad (12.19)$$

जहां Φ को हमने समाकल के बाहर लिया है, क्योंकि इसका मान वलय के सभी अनुप्रस्थ काटों पर स्थिर होता है। समीकरण (12.19) को देखने से उसी के समान विद्युत परिपथ के लिए निम्नलिखित समीकरण का स्मरण होता है :

$$\text{e.m.f.} = \text{धारा} \times \text{परिपथ} = I\int \frac{\rho dl}{A} \tag{12.20}$$

समीकरण (12.19) और (12.20) से ज्ञात होता है कि,

i) चुंबकत्व वाहक बल ($\int \mathbf{H}.d\mathbf{l}$), वि. वा. ब. ($\int \mathbf{E} . d\mathbf{l}$) के अनुरूप है,

ii) चुंबकीय फ्लक्स Φ ओम-नियम की धारा I के अनुरूप है,

iii) चुंबकीय प्रतिरोध जिसे प्रतिष्टम्भ (reluctance) $\left(\int \frac{dl}{\mu A}\right)$ कहते हैं, विद्युत प्रतिरोध $\left(\int \frac{\rho dl}{A}\right)$ के अनुरूप होता है।

$$\therefore \text{M.M.F.} = \text{फ्लक्स} \times \text{प्रतिष्टम्भ}$$

$$\text{अथवा कुल फ्लक्स } \Phi = \frac{\text{M.M.F.}}{\text{प्रतिष्टम्भ}} = \frac{NI}{\int \frac{dl}{\mu A}} \tag{12.21}$$

यदि μ का मान संपूर्ण वलय के लिए स्थिर मान लिया जाय, तो प्रतिष्टम्भ

$$\mathfrak{R} = \int \frac{dl}{\mu A} = \frac{L}{\mu A} \tag{12.22}$$

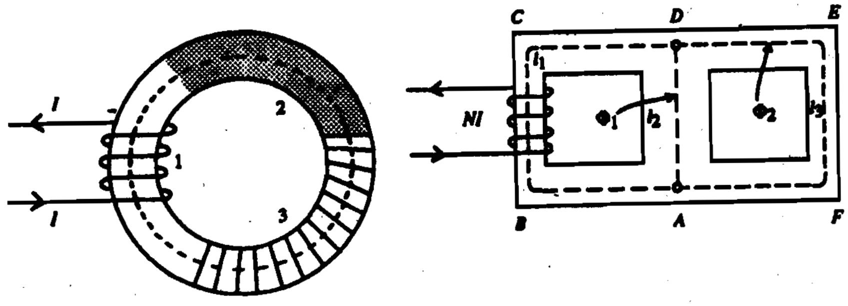
जहां L वलय लंबाई है। किन्तु विद्युत परिपथ और चुंबकीय परिपथ के बीच महत्वपूर्ण अंतर हैं :

i) विद्युत-परिपथ के प्रतिरोध में ऊर्जा का लगातार क्षय होता है जबकि चुंबकीय परिपथ के प्रतिष्टम्भ में ऊर्जा-ह्रास नहीं होता है।

ii) विद्युत-धारा में इलेक्ट्रॉनों का प्रवाह होता है किन्तु चुंबकीय फ्लक्स में ऐसे किसी भी कणों का प्रवाह नहीं होता है।

iii) किसी निश्चित ताप पर, प्रतिरोधकता, ρ धारा पर निर्भर नहीं करती है। जबकि प्रतिष्टम्भ में उसके संगत राशि $\frac{1}{\mu}$ चुंबकीय फ्लक्स Φ के अनुसार परिवर्तित होती है।

श्रेणी-क्रम में प्रतिष्टम्भ: आइए, हम यह मान लें कि टोरॉइड एक से अधिक लोह चुंबकीय पदार्थों का बना है जिनमें से प्रत्येक का अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल A है किन्तु उनकी चुम्बकशीलताएं भिन्न अर्थात् $\mu_1, \mu_2, \ldots\ldots$ हैं।



चित्र 12.12: (क) अनेक पदार्थों से बना चुंबकीय परिपथ : श्रेणी-क्रम में प्रतिष्टम्भ। (ख) दो लूपों वाला चुंबकीय परिपथ: समांतर क्रम में प्रतिष्टम्भ।

तो पहले की भांति (देखिये चित्र 12.12 क)

$$NI = \int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}$$

$$= \int_1 \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} + \int_2 \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} + \ldots\ldots \text{ होगा}$$

जिसमें दाईं ओर के समाकलों को क्रमशः पदार्थों 1,2, ... में अक्षीय पथों के अनुदिश लिया जाता है। इसलिए,

$$\text{M.M.F.} = \int_1 \frac{\Phi}{\mu A} dl + \int_2 \frac{\Phi}{\mu A} dl + \ldots$$

$$= \Phi \int_1 \frac{dl}{\mu_1 A} + \Phi \int_2 \frac{dl}{\mu_2 A} + \ldots\ldots$$

$$= \Phi \left[\frac{L_1}{\mu_1 A} + \frac{L_2}{\mu_2 A} + \ldots\ldots \right]$$

$$= \Phi (\mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_2 + \ldots\ldots) = \Phi \mathfrak{R}$$

इसलिए दिए गए चुंबकीय परिपथ का कुल प्रतिष्टम्भ इस प्रकार होगा:

$$\mathfrak{R} = \mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_2 + \ldots\ldots \tag{12.23}$$

समांतर क्रम में प्रतिष्टम्भ: अब हम एक ऐसे चुंबकीय परिपथ का उदाहरण देंगे जिसमें प्रतिष्टमभ समांतर क्रम में होते हैं। चित्र 12.12 (ख) में ऐसा ही चुंबकीय परिपथ दिखाया गया है। धारावाही कुंडलियों के N फेरे हैं। जिनमें से प्रत्येक में I ऐम्पियर की धारा प्रवाहित हो रही है। कुंडली से गुज़रने वाले चुंबकीय फ्लक्स Φ दो पथों में विभक्त हो जाते हैं: एक पथ में फ्लक्स Φ_1 और दूसरे Φ_2 में है, जैसाकि चित्र में दिखाया गया है। स्पष्ट है कि $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$ है। हम मान लेते हैं कि परिपथ में सब जगह अनुप्रस्थ काट का क्षेत्रफल A स्थिर है।

माना चित्र में दिए गए पथों $ABCD$, DA और $DEFA$ की लंबाइयां क्रमशः L, L_1, L_2 हैं। $ABCDA$ पथ के लिए

$$NI = \int_{ABCD} \frac{\Phi}{\mu A} dl + \int_{DA} \frac{\Phi}{\mu A} dl$$

$$= \frac{\Phi}{\mu A} L + \frac{\Phi_1}{\mu_1 A} L_1 \tag{12.24}$$

इसी प्रकार, बंद पथ $ADEFA$ के लिए,

$$0 = -\int_{AD} \frac{\Phi}{\mu A} dl + \int_{DEFA} \frac{\Phi}{\mu A} dl$$

$$= -\frac{\Phi_1}{\mu_1 A} L_1 + \frac{\Phi_2}{\mu_2 A} L_2 \tag{12.25}$$

यहां पर ध्यान दें कि हमने पथों AD और $DEFA$ के लिए μ_1 और μ_2 का उपयोग किया है। ऐसा इसलिए है क्योंकि इन पथों के लिए Φ के मान भिन्न है। इसलिए $\mathbf{H}$ के मान भी भिन्न होंगे। अत: इन पथों के लिए μ के मान भिन्न होंगे। $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$ और समीकरण (12.25) का उपयोग करते हुए, हम लिख सकते हैं :

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_1 \frac{\mu_2}{\mu_1} \cdot \frac{L_1}{L_2}$$

$$= \Phi_1 \left(1 + \frac{\mu_2}{\mu_1} \cdot \frac{L_1}{L_2} \right)$$

उपर्युक्त समीकरण से Φ_1 के मान को समीकरण (12.24) में प्रतिस्थापित करने पर हम लिखते हैं:

$$NI = \frac{\Phi}{\mu A} L + \Phi \left(\frac{\frac{L_1}{\mu_1 A} \cdot \frac{L_2}{\mu_2 A}}{\frac{L_1}{\mu_1 A} \cdot \frac{L_2}{\mu_2 A}} \right)$$

$$NI = \Phi \left(\Re + \frac{\Re_1 \Re_2}{\Re_1 \Re_2} \right) \qquad (12.26)$$

इससे प्रकट होता है कि *DA* और *DEFA* पथों के प्रतिष्टम्भ समांतर होते हैं क्योंकि इन पथों में चुंबकीय फ्लक्स Φ क्रमशः Φ_1 और Φ_2 में विभक्त हो जाता है। इन पथों के संयुक्त प्रतिष्टम्भ $\Re_{\|}$ को अलग-अलग प्रतिष्टम्भों $\Re_1$ और $\Re_2$ के रूप में इस प्रकार व्यक्त किए जा सकते हैं :

$$\frac{1}{\Re_{\|}} = \frac{1}{\Re_1} + \frac{1}{\Re_2} \qquad (12.27)$$

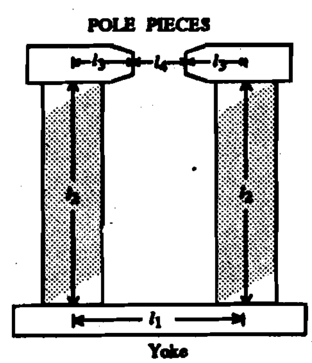
ध्यान देने की बात है कि समीकरण (12.24), (12.25) और $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$ चुंबकीय परिपथों के लिए किरचोफ नियमों (Kirchoff's law) के कथन हैं।

अब हमें ज्ञात होता हैं। कि वायु में चुंबकीय फ्लक्स का क्षरण क्यों नहीं होता है। वायु, फ्लक्स के लिए समांतर पथ बनाता है। वायु के लिए $\mu = \mu_0$ और लोह चुंबकीय पदार्थ के लिए $\mu \approx 10^4 \mu_0$, होता है इसलिए लोह चुंबकीय पदार्थ की तुलना में वायु-पथख अत्यंत अधिक प्रतिष्टम्भ वाला पथ होता है। चुंबकीय फ्लक्स सबसे कम प्रतिष्टम्भ वाला पथ का अनुसरण करेगा, जैसाकि विद्युत-परिपथ में भी होता है।

चुंबकीय परिपथ से संबंधित सूत्रों का उपयोग विद्युत-इंजीनियरों द्वारा विद्युत-चुंबकों, मोटरों और डायनमों संबंधी परिकलनों में किया जाता है। प्रायः यह ज्ञात किया जाता है कि कुंडली में तार के फेरों की संख्या और उनमें प्रवाहित हो रही विद्युत धारा का मान क्या हो, जो कि विद्युत-चुंबक के वायु-अंतराल (air-gap) में एक निश्चित फ्लक्स घनत्व उत्पन्न कर सकें। परिपथ का प्रतिष्टम्भ ज्ञात होने पर, निम्नलिखित संबंध द्वारा M.M.F. परिकलित किया जाता है :

M.M.F. = फ्लक्स × प्रतिष्टम्भ

क्योंकि M.M.F. का मान *NI* के बराबर होता है (देखिए समीकरण 12.19)। अतः ऐम्पियर फेरों की संख्या परिकलित की जा सकती है। आइए, किसी विद्युत-चुंबक के चुंबकीय परिपथ का अध्ययन कर इसे स्पष्ट करें।



चित्र 23.13: विद्युत-चुंबक का चुंबकीय रपरिपथ

विद्युत-चुंबक का चुंबकीय परिपथ

विद्युत-चुंबक का चुंबकीय परिपथ एक योजक (yoke) जो चुंबक का आधार है, किनारे (limbs) जिन पर कुंडली लेपटी हुई हैं, ध्रुव भाग (pole pieces) और वायु-अंतराल से बना होता है (देखिए चित्र 12.13)। माना योजक की प्रभावी लंबाई l और अनुप्रस्थ काट का क्षेत्रफल a है। यदि लोहे की चुंबकशीलता μ_1 हो तो योजक का प्रतिष्टम्भ $\frac{l_1}{\mu_1 a_1}$ होगा। इसी प्रकार प्रत्येक किनारे का प्रतिष्टम्भ $\frac{l_2}{\mu_2 a_2}$ और प्रत्येक ध्रुव का प्रतिष्टम्भ $\frac{l_3}{\mu_3 a_3}$ है जबकि वायु अंतराल का प्रतिष्टम्भ $\frac{l_4}{\mu_0 a_4}$ है। (क्योंकि $\mu_{air} \approx \mu_0$)। इसलिए चुंबकीय क्षेत्र का कुल प्रतिष्टम्भ इस प्रकार होगा :

$$\frac{l_1}{\mu_1 a_1} + \frac{2l_2}{\mu_2 a_2} + \frac{2l_3}{\mu_3 a_3} + \frac{l_4}{\mu_0 a_4}$$

यदि चुंबकीय परिपथ के सभी हिस्सों में समान फ्लक्स हो तो समीकरण (12.19) के अनुसार ऐम्पियर-फेरों की संख्या इस प्रकार होगी :

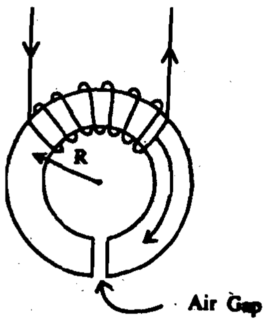
$$\Phi \left(\frac{l_1}{\mu_1 a_1} + \frac{2l_2}{\mu_2 a_2} + \frac{2l_3}{\mu_3 a_3} + \frac{l_4}{\mu_0 a_4} \right) \qquad (12.28)$$

आइए, चित्र 12.14 के टोरॉइड के वायु-अंतराल में चुंबकीय क्षेत्र B को परिकलित करने का एक अन्य उदाहरण लें। इसमें टोरॉइड एक लोहचुंबकीय पदार्थ (नर्म लोहे) का बना होता है जिसमें d चौड़ाई वाला एक छोटा-सा वायु-अंतराल होता है जो टोरॉइड की लंबाई L की तुलना में काफी छोटा होता है। इस उदारहण में,

$$NI = \Phi\left[\frac{(L-d)}{\mu A} + \frac{d}{\mu_0 A}\right]$$ चुंबकीय परिपथ में से प्रवाहित होने वाला फ्लक्स है।

$$= \frac{B}{\mu\mu_0}\left[\mu_0(L-d) + \mu d\right]$$

अथवा
$$B = \frac{NI\,\mu\mu_0}{\mu_0 L + (\mu - \mu_0)\,d} \qquad (12.29)$$



चित्र 12.14: वायु-अंतराल में चुंबकीय क्षेत्र

यह वायु-अंतराल में चुंबकीय क्षेत्र का मान है। निम्नलिखित उदाहरण का अध्ययन कीजिए जो यह प्रदर्शित करता है कि वायु-अंतराल की वजह से टोरॉइड की लंबाई कैसे बढ़ जाती है।

उदाहरण 2

एक संपूर्ण टोरॉइड की लंबाई L है और इसे N फेरों वाली कुंडली से लपेटा गया है। प्रत्येक फेरे में I ऐम्पियर की धारा प्रवाहित हो रही है। एक अन्य टोरॉइड की लंबाई $(L-d)$ है जिसमें कि $d\,(d << L)$ लंबाई वाला एक वायु-अंतराल हैं। इन दोनों उदाहरणों की तुलना कीजिए। सिद्ध कीजिए कि वायु-अंतराल के प्रभाव से टोरॉइड की लंबाई $(K_m - 1)\,d$, से बढ़ जाती है जहां K_m आपेक्षित चुंबकशीलता है।

हल :

बिना वायु-अंतराल वाले संपूर्ण टोरॉइड के उदारहण में, $B = NI/\left(\frac{L}{\mu}\right)$ है। d लंबाई वाले वायु-अंतराल के उदाहरण में, समीकरण (12.29) के अनुसार

$$B = \frac{NI\,\mu\mu_0}{\mu_0 L + (\mu - \mu_0)\,d}$$

अंश और हर दोनों को $\mu\mu_0$ से भाग करने पर,

$$B = \frac{NI}{\frac{L}{\mu} + \left(\frac{1}{\mu_0} - \frac{1}{\mu}\right)d} = \frac{NI}{\frac{1}{\mu}\left[(L-d) + \frac{d}{\mu_0}\right]}$$

$$= \frac{NI}{\frac{1}{\mu}\left[(L-d) + \frac{\mu}{\mu_0}d\right]} = \frac{NI}{\frac{1}{\mu}\left[(L-d) + K_m d\right]}$$

अर्थात्

$$B. = \frac{NI}{\frac{1}{\mu}\left[L + (K_m - 1)\,d\right]}$$

यदि इस सूत्र की, संपूर्ण टोरॉइड के लिए लिखे गए सूत्र के साथ तुलना की जाय तो हम देखते हैं कि L का मान $(K_m - 1)\,d$ बढ़ जाता है।

इकाई को समाप्त करने से पहले निम्नलिखित बोध प्रश्न का उत्तर दीजिए।

बोध प्रश्न 3

एक नर्म लोहे के वलय में 1.00 से. मी. का वायु-अंतराल है। उसमें 500 फेरे वाली कुंडली लपेटी गई है जिसमें 2A की धारा प्रवाहित हो रही है। लोहे के वलय की माध्य लम्बाई 50 से. मी. है, उनका अनुप्रस्थ काट से. मी.^{2} और चुंबकशीलता 2500 μ_0 है। वायु-अंतराल में चुंबकीय प्रेरण

परिकलित कीजिए। लोहे के वलय में B और H के मान भी परिकलित कीजिए।

इस इकाई में हमने जो कुछ पढ़ा, आइये उसे संक्षेप में दोहरायें।

12.7 सारांश

- स्थायी चुंबकत्व और शैथिल्य (Hysteresis) की परिघटना के कारण लोह-चुंबकीय पदार्थों का व्यवहार जटिल हो जाता है। इस व्यवहार की व्याख्या इन पदार्थों में डोमेनों की उपस्थिति के आधार पर की जा सकती है। प्रत्येक डोमेन में द्विध्रुव आघूर्ण, विनिमय अन्योन्यक्रिया के कारण, समांतर रहते हैं। किन्तु अचुंबकित अवस्था में विभिन्न डोमेनों की चुंबकन दिशायें यादृच्छिक होती है जिससे नेट चुम्बकन शून्य होता है। दो अन्य प्रकार के चुंबकीय पदार्थ भी होते हैं : प्रतिलोह चुंबकीय और फेरी चुंबकीय।
- असमान चुम्बकन की स्थिति में चुंबकित पदार्थ, एक धारा वितरण $\mathbf{J} =$ कर्ल $\mathbf{M}$ के तुल्य होता है जिसमें $\mathbf{M}$ प्रति इकाई आयतन चुम्बकन अथवा चुंबकीय आघूर्ण है।
- चुंबकित पदार्थ द्वारा उत्पन्न चुंबकीय क्षेत्र, ऐम्पियर नियम द्वारा ज्ञात किया जाता है, जो इस प्रकार है :

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{J}_f + \mathbf{J}_m$$

जहां $\mathbf{J}_f$ पदार्थ में प्रवाहित होने वाली मुक्त धारा घनत्व है और $\mathbf{J}_m$ चुम्बकन से संबद्ध धारा घनत्व है। इसके अनुसार

$$\nabla \times \left(\frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M} \right) = \mathbf{J}_f$$

जहां $\mathbf{H} \left(= \dfrac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M} \right)$ एक नया क्षेत्र सदिश है।

- अनुचुम्बकत्व और प्रतिचुंबकत्व में $\mathbf{B}$, $\mathbf{M}$ और $\mathbf{H}$ का परस्पर रैखिक संबंध होता है किन्तु लोह चुंबकत्व में ये शैथिल्य प्रदर्शित करते हैं जो कि अरैखिक व्यवहार है।
- विद्युत-चुंबकों, मोटरों और डायनमों के अध्ययन में धारावाही कुंडलियों पर विचार किया जाता है जिनमें लोह चुंबक पदार्थ होते हैं अर्थात् उसमें चुंबकीय परिपथों का अध्ययन किया जाता है। हम चुंबकीय परिपथों की बात तब करते हैं जब विद्यमान संपूर्ण चुंबकीय फ्लक्स सुनिश्चित पथ अथवा पथों में सीमित रहता है।
- चुंबकीय परिपथ के लिए सूत्र यह है :

चुंबकत्व वाहक बल (M.M.F.) = फ्लक्स × प्रतिष्टम्भ। M.M.F., NI के बराबर भी होता है जहां N चुंबकीय पदार्थ पर लपेटी गई कुंडली में फेरों की संख्या है और I प्रत्येक कुंडली में प्रवाहित होने वाली धारा है।

- प्रतिष्टम्भ $\Re = \dfrac{l}{\mu a}$

जहां l, a और μ क्रमशः पदार्थ की लंबाई, अनुप्रस्थ काट का क्षेत्रफल और चुंबकशीलता है। प्रतिष्टम्भों के संयोग उन्ही नियमों का पालन करते हैं जिनके द्वारा प्रतिरोधों का संयोग होता है।

12.8 अंत में कुछ प्रश्न

1) निम्नलिखित उदाहरणों में चुम्बकन क्षेत्र H और चुंबकीय फ्लक्स घनत्व B ज्ञात कीजिए।

   (क) एक लंबे, सीधे तार से 105 mm दूर स्थित बिन्दु पर, जबकि तार में 15 A की धारा प्रवाहित हो रही हो।

(ख) 0.24m लंबी और 2000 फेरों वाली परिनालिका के केंद्र में जिसमें 1.6A की धारा प्रवाहित हो रही है। ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\, H\, m^{-1}$)

2) 0.5 m की माध्य परिधि के टोरॉइड मे 500 फेरे हैं और प्रत्येक फेरे में 0.15 A की धारा प्रवाहित हो रही है। (क) यदि टोरॉइड में वायु-क्रोड हो, तो H और B ज्ञात कीजिए। यदि क्रोड मे 5000 आपेक्षिक चुंबकशीलता का लोहा भरा हो तो B और चुम्बकन M ज्ञात कीजिए।

3) 1500 फेरे वाले एक टोरॉइड को लोहे के वलय में लपेटा गया है जिसका अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल 360 mm^2, माध्य परिधि 0.75 m और आपेक्षित चुंबकशीलता 1500 है। यदि तार में 0.24 A धारा प्रवाहित हो रही हो तो निम्नलिखित का मान ज्ञात कीजिए : (क)चुम्बकन क्षेत्र H, (ख) M.M.F. , (ग) चुंबकीय प्रेरण B, (घ) चुंबकीय फ्लक्स और (च) परिपथ का प्रतिष्टम्भ

12.9 हल और उत्तर

बोध प्रश्न

1) पथ (1) से परिबद्ध I का मान 5A है।

पथ (2) के लिए $\int \mathbf{H} . d\mathbf{l} = 7I = 35A$

पथ (3) के लिए $\int \mathbf{H} . d\mathbf{l} = 2I = 10A$

पथ (1) के लिए $\mathbf{B} = \mathbf{H}$

पथ (1) और (3) के लिए $\mathbf{B} \neq \mathbf{H}$ क्योंकि ये पथ लोहे से गुज़रते हैं।

2) $H = nI = (2000\, m^{-1})(0.18A) = 360\, Am^{-1}$

$B = \mu_0 H = (4\pi \times 10^{-7}\, Hm^{-1})(360 Am^{1}) = 0.45\, mT$

यदि $6 \times 10^{-3}\, Hm^{-1}$ के निरपेक्ष चुंबकशीलता वाले लोहे के क्रोड को परिनालिका में प्रविष्ट किया जाए, तो H में कोई परिवर्तन नहीं होता है, अर्थात्

$H = 360\, Am^{-1}$ (अपरिवर्तित)

और $B = \mu H = (6 \times 10^{-3}\, H m^{-1})(360\, A\, m^{-1}) = 2.16\, T$

3) वायु-अंतराल में चुंबकीय प्रेरण का व्यंजक है,

$$B = \frac{NI\mu}{[L + (K_m - 1)d]}$$

प्रश्न में दिए गए मानों को प्रतिस्थापित करने पर

$$B = \frac{500 \times 2 \times 2000 \times 4\pi \times 10^{-7}}{0.50 + (2500 - 1)\, 0.01}$$

$$= \frac{10^3 \times 10^4 \times \pi \times 10^{-7}}{0.50 + 25} = \frac{\pi}{25.5} = 0.123\ Wbm^{-2}$$

लोहे के वलय में B का वही मान है, जो वायु में होता है किन्तु लोहे में H का मान इस प्रकार है

$$H = \frac{B}{K_m \mu}$$

$H = 0.123/2500 \times 4\pi \times 10^{-7}$

$= 39.1\, Am^{-1}$

1) (क) $H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \times \frac{I}{\mu_0} = \frac{I}{2\pi r} = \frac{15}{(2\pi)(0.105)} = 22.7\ \mathrm{A\,m^{-1}}$

$$H = nI = \frac{2000}{0.24} \times 1.6 = 13.333\ \mathrm{Am^{-1}}$$

$$B = \frac{4\pi}{10^7} \times \left(\frac{2000}{0.24}\right) 1.6 = 0.0168\mathrm{T}$$

2) टोरॉइड के लिए $H = nI$, और हम उपयोग करते हैं $B = (4\pi/10^7)(K_m H) = \mu H$.

इस प्रकार,

क) $H = \frac{500}{0.5\mathrm{m}} 0.15\ \mathrm{A} = 150\ \mathrm{Am^{-1}}$ फेरे और

$$B = (4\pi \times 10^{-7}\ \mathrm{H\,m^{-1}})(150\mathrm{A\,m^{-1}}) = 0.188\mathrm{mT}$$

ख) $B = 5000\,(0.188\ \mathrm{mT}) = 0.94\mathrm{T}$

$B/\mu_0 = H + M$ का उपयोग करने पर,

$$\frac{0.94}{4\pi \times 10^{-7}} = 150 + M \qquad M = 7.5 \times 10^5\ \mathrm{Am^{-1}}$$

3) क) $H = nI = \frac{1500}{0.75} = 0.24 = 480\ \mathrm{Am^{-1}}$

ख) M.M.F. $= \mathrm{Hl} = (480\ \mathrm{A\,m^{-1}})(0.75\ \mathrm{m}) = 360\ \mathrm{A}$

ग) $B = \frac{4\pi K_m H}{10^7} = \frac{4\pi}{10^7}(1500)(480) = 0.905\mathrm{T}$

घ) $\Phi = BA = (0.905\ \mathrm{Wb\,m^{-2}})\frac{360\ \mathrm{m^2}}{10^6} = 3.26 \times 10^{-4}\ \mathrm{Wb}.$

ङ.) प्रतिष्टम्भ $= \frac{\mathrm{m.m.f.}}{\Phi} = \frac{360}{3.26 \times 10^{-4}} = 1.1 \times 10^6\ \mathrm{H^{-1}}$

$= 1.1\ \mu\mathrm{H^{-1}}.$

12.10 शब्दावली

अनुचुम्बकीय	Paramagnetism
क्षरण	Leakage
चुम्बकत्व वाहक बल	Magneto motive force
चुम्बकत्वाशेष	Remanace
चुम्बकन	Magnetisation
चुम्बकशीलता	Permeability
चुंबकित पदार्थ	Magnetised material
निग्रह बल	Coercive force
प्रति चुम्बकीय	Diamagnetism
प्रतिलोह चुम्बकीय	Antiferromagnetic

प्रतिष्टम्भ	Reluctance
फेरी चुम्बकीय	Ferrrimagnetic
बद्ध धारा	Bound current
मुक्त धारा	Free current
लोह चुम्बकीय	Feriomagnetic
वायु अंतराल	Air gap
विद्युत चुम्बक	Electromagnet
विनिमय बल	Exchange force
शैथिल्य वक्र	Hysteresis curve
संतृप्त	Saturation