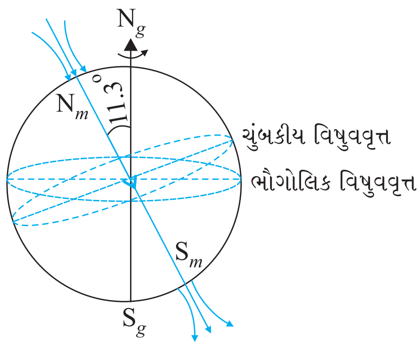


આકૃતિ 5.8 વિશાળ ચુંબકીય દ્વિ-ધ્રુવી તરીકે પૃથ્વી

ધ્રુવોના નામકરણમાં થોડીક દુવીધા છે. જો આપણે પૃથ્વીની ચુંબકીય ક્ષેત્ર રેખાઓ જોઈએ (આકૃતિ 5.8), તો જોઈ શકીએ કે, ગજિયા ચુંબકથી વિપરીત, ઉત્તર ચુંબકીય ધ્રુવ (N_m) પર (ચુંબકીય) ક્ષેત્ર રેખાઓ અંદર પ્રવેશે છે અને દક્ષિણ ચુંબકીય ધ્રુવ (S_m)માંથી બહાર આવે છે. આવી પ્રણાલી એટલા માટે પડી કે ચુંબકીય સોયનો ઉત્તર ધ્રુવ (પૃથ્વીના) ચુંબકીય ઉત્તર દિશા તરફ રહેતો હતો; ચુંબકનો ઉત્તર ધ્રુવ પણ ઉત્તર દિશા તરફ રહેતો (ઉત્તર દિશા દર્શાવતો) હોવાથી તેનું એ નામ પડ્યું. આમ, હકીકતમાં, પૃથ્વીની અંદર ઉત્તર ચુંબકીય ધ્રુવ જાણે કે પૃથ્વીની અંદરના ગજિયા ચુંબકના દક્ષિણધ્રુવની જેમ વર્તે છે અને તેથી ઊલટું પણ.

ઉદાહરણ 5.8

ઉદાહરણ 5.8 પૃથ્વીનું ચુંબકીયક્ષેત્ર વિષુવવૃત્ત પાસે લગભગ 0.4 G જેટલું છે. પૃથ્વીની દ્વિ-ધ્રુવી ચાકમાત્રા (ડાયપોલ મોમેન્ટ) શોધો.

ઉકેલ

સમીકરણ (5.7) પરથી, વિષુવવૃત્ત પાસે ચુંબકીયક્ષેત્ર

$$B_E = \frac{\mu_0 m}{4\pi r^3}$$

આપણને $B_E \sim 0.4$ G $= 4 \times 10^{-5}$ T આપેલ છે. r તરીકે આપણે પૃથ્વીની ત્રિજ્યા 6.4×10^6 m લઈ શકીએ. આથી,

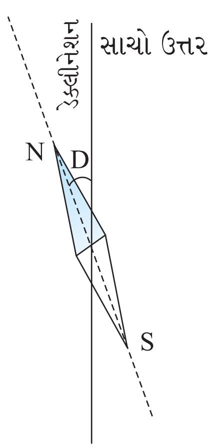
$$m = \frac{4\times10^{-5}\times(6.4\times10^6)^3}{\mu_0/4\pi} = 4\times10^2\times(6.4\times10^6)^3 \qquad (\mu_0/4\pi = 10^{-7})$$

$$= 1.05\times10^{23}\ \mathrm{A\,m^2}$$

જે ભૂચુંબકત્વ માટેના પુસ્તકોમાં દર્શાવેલ મૂલ્ય 8×10^{22} A m^2ની નજીક છે.

5.4.1 ચુંબકીય ડેક્લીનેશન (Declination-દિક્પાતકોણ) અને ડીપ (Dip-નમનકોણ) (Magnetic Declination and Dip)

પૃથ્વીની સપાટી પરનું કોઈ સ્થળ (બિંદુ) ધારો. આ બિંદુએ, રેખાંશ વર્તુળની દિશા ભૌગોલિક ઉત્તર-દક્ષિણ દિશા દર્શાવે છે, રેખાંશની ઉત્તર ધ્રુવ તરફની રેખા સાચી ઉત્તર દિશા છે. પૃથ્વીની ભ્રમણ અક્ષ અને રેખાંશ વૃત્તને સમાવતું ઉર્ધ્વ સમતલ ભૌગોલિક ધ્રુવતલ (મેરીડીયન) કહેવાય છે. તે જ રીતે આપણે તે સ્થાન અને પૃથ્વીના ઉત્તર-દક્ષિણ ધ્રુવોને જોડતી કાલ્પનિક રેખામાંથી પસાર થતા ઉર્ધ્વ સમતલને તે સ્થાનના ચુંબકીય ધ્રુવતલ (મેરીડીયન) તરીકે વ્યાખ્યાયિત કરી શકીએ. આ સમતલ પૃથ્વીની સપાટીને રેખાંશ જેવા વર્તુળમાં છેદશે. આથી, સમક્ષિતિજ સમતલમાં મુક્ત રીતે ફરી શકે તેમ લટકાવેલ ચુંબકીય સોય, ચુંબકીય ધ્રુવતલમાં રહેશે અને સોયનો ઉત્તરધ્રુવ (પૃથ્વીની) ચુંબકીય ઉત્તર ધ્રુવ તરફ ગોઠવાશે. ચુંબકીય ધ્રુવોને જોડતી રેખા પૃથ્વીની ભૌગોલિક અક્ષ સાથે થોડી ઢળતી (નમેલી) હોવાથી, ચુંબકીય ધ્રુવતલ ભૌગોલિક ધ્રુવતલ સાથે એક ખૂણો બનાવે છે. આમ, તે (ખૂણો) સાચા ભૌગોલિક ઉત્તર અને ચુંબકીય સોય વડે દર્શાવેલા ઉત્તર વચ્ચેનો કોણ છે. આ ખૂણાને ચુંબકીય ડેક્લીનેશન અથવા ફક્ત ડેક્લીનેશન કહે છે (આકૃતિ 5.9).



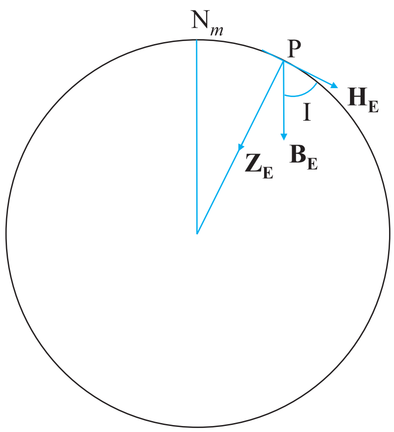
આકૃતિ 5.9 સમક્ષિતિજ સમતલમાં મુક્ત રીતે ફરી શકે તેવી ચુંબકીય સોય ચુંબકીય ઉત્તર-દક્ષિણ દિશા દર્શાવે છે.

મોટા અક્ષાંશ માટે ડેક્લીનેશન મોટું હોય છે. જ્યારે વિષુવવૃત્ત પાસે તે ઓછું હોય છે. ભારત માટે ડેક્લીનેશન ઓછું છે, જે દિલ્હી પાસે 0°41'E છે. જ્યારે મુંબઈ પાસે 0°58'W છે.

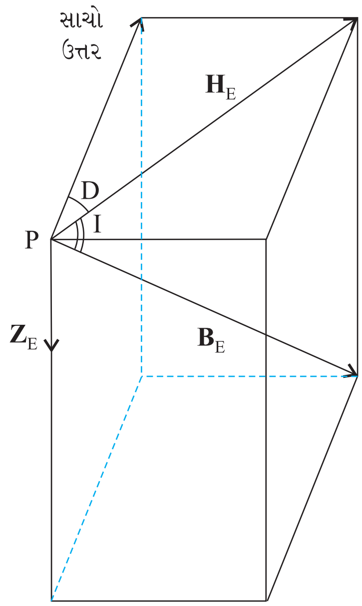
આમ, આ બંને સ્થાને ચુંબકીય સોય લગભગ સાચી ઉત્તર દિશા દર્શાવે છે.

એક બીજી રાશિ પણ જાણવી જરૂરી છે. જો ચુંબકીય સોયને ચુંબકીય ધ્રુવતલમાં સમક્ષિતિજ અક્ષ પર એવી રીતે સંતુલિત કરી હોય કે તે ચુંબકીય ધ્રુવતલમાં દોલન કરી શકે તો આ સોય સમક્ષિતિજ સાથે એક ખૂણો બનાવે છે (આકૃતિ 5.10). તેને નમનકોણ (Angle of Dip) કહે છે (જે નમન પણ કહેવાય છે). આમ, નમનકોણ એ પૃથ્વીના (તે સ્થાને) કુલ ચુંબકીયક્ષેત્ર $\mathbf{B}_E$ વડે પૃથ્વીની સપાટી સાથે બનતો કોણ છે. આકૃતિ 5.11 પૃથ્વીની સપાટી પર P બિંદુએ ચુંબકીય ધ્રુવતલ દર્શાવે છે. આ સમતલ પૃથ્વીમાંથી પસાર થતો છેદ છે. P બિંદુ પાસે કુલ ચુંબકીયક્ષેત્રને બે ભાગમાં વિભાજિત કરી શકાય. એક સમક્ષિતિજ ઘટક $\mathbf{H}_E$ અને બીજો ઉર્ધ્વ ઘટક $\mathbf{Z}_E$. $\mathbf{B}_E$ વડે $\mathbf{H}_E$ સાથે બનતો કોણ એ નમનકોણ I છે.

ઉત્તર ગોળાર્ધમાં મોટાભાગમાં નમન દર્શાવતી સોયનો ઉત્તર ધ્રુવ (છેડો) નીચે તરફ નમેલો (ઢળતો) હોય છે.



આકૃતિ 5.10 વર્તુળ એ મેગ્નેટીક મેરીડીયનને સમાવતો પૃથ્વીનો આડછેદ છે. $\mathbf{B}_E$ અને સમક્ષિતિજ ઘટક $\mathbf{H}_E$ વચ્ચેનો કોણ નમનકોણ (એન્ગલ ઓફ ડીપ) છે.



આકૃતિ 5.11 પૃથ્વીનું ચુંબકીયક્ષેત્ર $\mathbf{B}_E$, તેના સમક્ષિતિજ અને લંબ ઘટકો, $\mathbf{H}_E$ અને $\mathbf{Z}_E$. આ ઉપરાંત ડેક્લીનેશન D અને નમન અથવા નમનકોણ (એન્ગલ ઓફ ડીપ) I દર્શાવ્યા છે.

તે જ રીતે, દક્ષિણ ગોળાર્ધના મોટાભાગમાં નમન દર્શાવતી સોયનો દક્ષિણધ્રુવ નીચે તરફ ઢળતો હોય છે.

પૃથ્વીની સપાટી પર કોઈ બિંદુ પાસે ચુંબકીયક્ષેત્ર દર્શાવવા માટે આપણે ત્રણ રાશિઓ સ્પષ્ટ કરવી પડે : ડેક્લીનેશન D, નમનકોણ અથવા નમન I, અને પૃથ્વીના ક્ષેત્રનો સમક્ષિતિજ ઘટક H_E. આ બધાને પૃથ્વીના ચુંબકીયક્ષેત્રના તત્વો (Elements) કહે છે.

ઉર્ધ્વ ઘટકને Z_E વડે દર્શાવતાં,

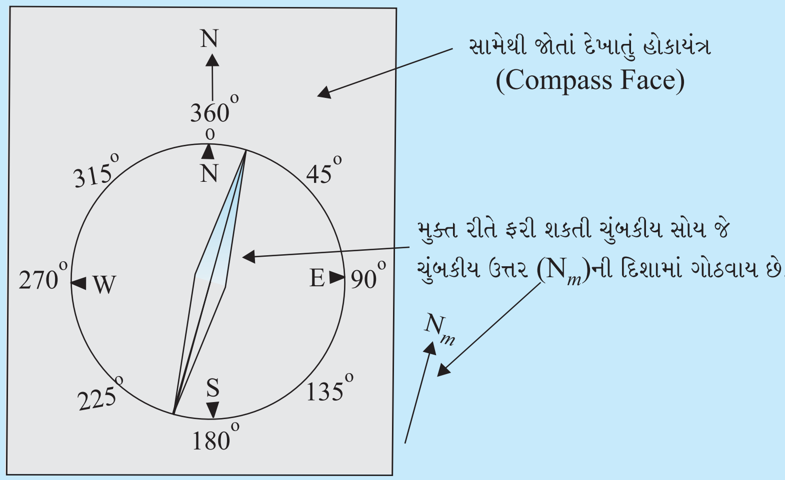
$$Z_E = B_E \sin I \qquad [5.10(a)]$$

$$H_E = B_E \cos I \qquad [5.10(b)]$$

જે પરથી, $\tan I = \dfrac{Z_E}{H_E}$ [5.10(c)]

ધ્રુવો પર મારી કંપાસ સોય (હોકાયંત્રની સોય) શું દર્શાવશે ?
(WHAT HAPPENS TO MY COMPASS NEEDLES AT THE POLES ?)

કંપાસ (હોકાયંત્રની) સોય એક ચુંબકીય સોયની બનેલી હોય છે જે એક અક્ષીય બિંદુ પર કિલકિત કરેલ છે. જ્યારે કંપાસ (હોકાયંત્ર)ને સમક્ષિતિજ રાખેલ હોય ત્યારે તે એ સ્થાન પાસે પૃથ્વીના સમક્ષિતિજ ઘટકની દિશામાં ગોઠવાય છે. આમ, કંપાસ સોય તે સ્થાને ચુંબકીય ધ્રુવતલમાં રહેશે. પૃથ્વી પર ઘણી જગ્યાએ ચુંબકીય ખનિજો પુષ્કળ પ્રમાણમાં હોય છે, જે કંપાસ (હોકાયંત્રની) સોયને ચુંબકીય ધ્રુવતલમાંથી વિચલિત કરે છે. ચુંબકીય ડેક્લીનેશન જાણતા હોઈએ તો આપણને કંપાસ (હોકાયંત્રની) સોય વડે દર્શાવેલી ત્રુટી સુધારીને સાચી ઉત્તર દિશા મળી શકે છે.



તો આપણે આ કંપાસને ચુંબકીય ધ્રુવ પર લઈ જઈએ તો શું થશે ? ધ્રુવો પર, ચુંબકીય ક્ષેત્રરેખાઓ લંબરૂપે ભેગી થતી કે વિખેરાતી હોય છે. આથી (ચુંબકીયક્ષેત્રનો) સમક્ષિતિજ ઘટક નહીંવત્ હોય છે. જો આ સોય ફક્ત સમક્ષિતિજ સમતલમાં ફરી શકે તેમ હોય, તો તે કોઈ પણ દિશા દર્શાવી શકે, જે દિશા-દર્શક તરીકે બિનઉપયોગી થઈ જાય. આ કિસ્સામાં નમન દર્શાવતી (ચુંબકીય) સોયનો ઉપયોગ કરવો જોઈએ જે (ચુંબકીય સોય ધરાવતો) એવો કંપાસ છે કે જેથી તે પૃથ્વીના ચુંબકીયક્ષેત્ર ધરાવતા ઉર્ધ્વ સમતલમાં ઘુમી શકે. આ કિસ્સામાં કંપાસની સોય ચુંબકીયક્ષેત્ર એ ઉર્ધ્વ સાથે બનાવેલો કોણ દર્શાવે છે. ચુંબકીય ધ્રુવો પર આ સોય સીધી નીચેની તરફની દિશા દર્શાવશે.

ઉદાહરણ 5.9 કોઈ સ્થાનના ચુંબકીય ધ્રુવતલમાં પૃથ્વીના ચુંબકીયક્ષેત્રનો સમક્ષિતિજ ઘટક 0.26 G છે અને નમન કોણ 60° છે. આ સ્થળે પૃથ્વીનું ચુંબકીયક્ષેત્ર કેટલું હશે ?

ઉકેલ $H_E = 0.26\,G$ આપેલું છે. આકૃતિ 5.11 પરથી,

$$\cos 60^\circ = \frac{H_E}{B_E}$$

$$B_E = \frac{H_E}{\cos 60^\circ}$$

$$= \frac{0.26}{(1/2)} = 0.52\,G$$

ઉદાહરણ 5.9

પૃથ્વીનું ચુંબકીયક્ષેત્ર (EARTH'S MAGNETIC FIELD)

એવું ધારી લેવું ન જોઈએ કે પૃથ્વીના પેટાળમાં ખૂબ મોટો ગજિયો ચુંબક રહેલો છે જેના કારણે પૃથ્વીને ચુંબકીયક્ષેત્ર છે. પૃથ્વીના અંદરના ભાગમાં લોખંડની ખનિજના મોટા ભંડાર રહેલા છે, પરંતુ એવું નથી કે લોખંડનો ખૂબ મોટો ઘન ટુકડો (Block) ચુંબકીય ઉત્તર ધ્રુવથી ચુંબકીય દક્ષિણધ્રુવ સુધી વિસ્તરેલો હોય. પૃથ્વીનું પેટાળ (ગર્ભ) ખૂબ ગરમ અને પિગળેલું છે, તથા આયર્ન અને નિકલના આયનો પૃથ્વીના ચુંબકત્વ માટે જવાબદાર છે. આ પૂર્વધારણા વધારે સંભવિત લાગે છે. ચંદ્રને પિગળેલું પેટાળ (ગર્ભ) નથી, તેથી તેને ચુંબકીયક્ષેત્ર નથી. શુક્ર ધીમેથી પરિભ્રમણ કરે છે અને તેનું ચુંબકીયક્ષેત્ર ઘણું નબળુ છે, જ્યારે ગુરુ, જેનો પરિભ્રમણ દર બીજા ગ્રહો કરતાં ઘણો ઝડપી છે તેને ઘણું પ્રબળ ચુંબકીયક્ષેત્ર છે. આમ છતાં, આ વર્તુળમાર્ગી (ઘૂમતા) પ્રવાહો અને તેમને ટકાવી રાખવા માટે જરૂરી ઊર્જા ક્યાંથી આવે છે તે બહુ સારી રીતે સમજી શકાયું નથી. આ બધા ઘણા જગજાહેર અને ખુલ્લા પ્રશ્નો છે જે સતત શોધખોળ માટેનું અગત્યનું ક્ષેત્ર છે.

સ્થળ સાથે પૃથ્વીના ચુંબકીયક્ષેત્રમાં થતો ફેરફાર એ પણ એક રસપ્રદ અભ્યાસનું ક્ષેત્ર છે. સૂર્યમાંથી ઉત્સર્જીત થયેલા સૌર પવનોમાં રહેલા વિદ્યુતભારિત કણો પૃથ્વી તરફ અને તેથી આગળ પણ ગતિ કરે છે. તેમની ગતિ પર પૃથ્વીનું ચુંબકીય ક્ષેત્ર અસર કરે છે, અને સામે તે પણ પૃથ્વીના ચુંબકીયક્ષેત્રની ભાત (રેખાઓ) પર અસર કરે છે. ધ્રુવો પાસે ચુંબકીયક્ષેત્રની ભાત પૃથ્વી પરના બીજા વિસ્તારોની ભાતની સરખામણીમાં ઘણી અલગ છે.

પૃથ્વીના ચુંબકીયક્ષેત્રમાં સમય સાથે થતો ફેરફાર પણ કંઇ ઓછો આકર્ષક નથી. તેમાં પણ સદીઓ સાથે ટૂંકા ગાળાના ફેરફારો થાય છે જ્યારે લાખો વર્ષોના ગાળા દરમિયાન મોટા ફેરફારો પણ થાય છે. ઇસ. 1580થી 1820ના 240 વર્ષના ગાળા દરમિયાનની જે માહિતી ઉપલબ્ધ છે, તે અનુસાર લંડન ખાતે મેગ્નેટીક ડેક્લીનેશનમાં 3.5°નો ફેરફાર થયો છે, જે દર્શાવે છે કે પૃથ્વીના ગર્ભમાં ચુંબકીય ધ્રુવો સમય સાથે સ્થાન બદલે છે. લાખો વર્ષોના સમયગાળામાં, પૃથ્વીના ચુંબકીયક્ષેત્રની દિશા ઉલટાતી હોવાનું માલુમ પડ્યું છે. બેસાલ્ટ, લોખંડ (આયર્ન) ધરાવે છે અને જ્વાળામુખી સક્રીય થાય ત્યારે બેસાલ્ટ બહાર ફેંકાય છે. જ્યારે બેસાલ્ટ ઠંડો પડતો હોય અને ઘન અવસ્થામાં ફેરવાઇ રહ્યો હોય તે દરમ્યાન તેમાં રહેલા લોખંડના નાના ચુંબકો, તે સ્થાનના પૃથ્વીના ચુંબકીયક્ષેત્રની દિશામાં ગોઠવાય છે. બેસાલ્ટના આવા ચુંબકત્વ ધરાવતા વિસ્તારોના ટુકડાઓના ભુસ્તરશાસ્ત્રીય અભ્યાસ દરમિયાન પૃથ્વીના ચુંબકીયક્ષેત્રની દિશા બદલાવાના પુરાવા ભૂતકાળમાં ઘણી વાર મળી આવ્યા છે.

5.5 મેગ્નેટાઇઝેશન અને મેગ્નેટિક તીવ્રતા (MAGNETISATION AND MAGNETIC INTENSITY)

પૃથ્વી જાતજાતના અને ભાતભાતના તત્વો અને સંયોજનોથી ભરેલી છે. આ ઉપરાંત આપણે પણ નવી મિશ્રધાતુઓ, સંયોજનો અને તત્વો કૃત્રિમ રીતે બનાવ્યા છે. આપણે આ દ્રવ્યોના ચુંબકીય ગુણધર્મોનું વર્ગીકરણ કરીએ. આ વિભાગમાં, આપણે આ અભ્યાસમાં મદદરૂપ થાય તેવી કેટલીક રાશિઓ (Terms)ને વ્યાખ્યાયિત કરીશું અને સમજીશું.

આપણે જોયું હતું કે પરમાણુમાં પરિભ્રમણ કરતા ઇલેક્ટ્રૉનને ચુંબકીય ચાકમાત્રા (મેગ્નેટીક મોમેન્ટ) હોય છે. દ્રવ્યના જથ્થામાં, આ બધી ચાકમાત્રા (મોમેન્ટ) સદિશ રીતે ઉમેરાય છે અને આપણને પરિણામી (ચોખ્ખી) અશૂન્ય એવી ચુંબકીય ચાકમાત્રા (મેગ્નેટીક મોમેન્ટ) આપી શકે છે. આપણે કોઇ નમુના (પદાર્થ)ના મેગ્નેટાઇઝેશન **M**ને તેના એકમ કદ દીઠ પરિણામી (ચોખ્ખી) ચુંબકીય ચાકમાત્રા (મેગ્નેટીક મોમેન્ટ) વડે વ્યાખ્યાયિત કરીએ છીએ.

$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{m}_{net}}{V} \qquad (5.11)$$

M એ સદિશ છે, જેના પરિમાણ $L^{-1}A$ છે, તથા તેનો એકમ $A\,m^{-1}$ છે.

એકમ લંબાઇ દીઠ n આંટા ધરાવતો અને વિદ્યુતપ્રવાહ I ધારિત એક લાંબો સૉલેનોઇડ ધ્યાનમાં લો. સૉલેનોઇડમાં અંદરના ભાગમાં ચુંબકીયક્ષેત્રનું મૂલ્ય અગાઉ બતાવ્યું હતું તે મુજબ,

$B_0 = \mu_0 nI$ (5.12)

જો સૉલેનોઇડના અંદરના ભાગમાં એવું દ્રવ્ય ભરવામાં આવે કે જેનું મેગ્નેટાઇઝેશન શૂન્ય ન હોય, તો સૉલેનોઇડની અંદર (ચુંબકીય) ક્ષેત્ર B_0થી વધુ હશે. સૉલેનોઇડના અંદરના ભાગમાં ચોખ્ખું ક્ષેત્ર **B** આ રીતે દર્શાવી શકાય.

$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_m$ (5.13)

જ્યાં, $\mathbf{B}_m$ એ ગર્ભ (કોર, અંદર)માં રહેલા દ્રવ્ય વડે મળતું ક્ષેત્ર છે. એ જાણવા મળ્યું છે કે વધારાનું આ ક્ષેત્ર $\mathbf{B}_m$ એ પદાર્થના મેગ્નેટાઇઝેશન **M**ના સમપ્રમાણમાં હોય છે, જે આ મુજબ દર્શાવાય છે

$\mathbf{B}_m = \mu_0 \mathbf{M}$ (5.14)

જ્યાં, μ_0એ બાયૉ-સાવરના નિયમમાં આવે છે તે જ અચળાંક (શૂન્યાવકાશની પરમિએબિલિટી) છે.

એક બીજું સદિશ ક્ષેત્ર **H** ઉમેરવાનું સગવડભર્યું છે, જેને ચુંબકીય તીવ્રતા કહે છે, અને તે નીચે મુજબ વ્યાખ્યાયિત થાય છે.

$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M}$ (5.15)

જ્યાં, **H**ના પરિમાણ **M** જેવા જ છે અને તેને $A\ m^{-1}$ના એકમમાં માપવામાં આવે છે. આથી, કુલ ચુંબકીયક્ષેત્ર **B** આ મુજબ લખી શકાય.

$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$ (5.16)

આપણે વ્યાખ્યાની પદ્ધતિ ફરીથી દર્શાવીએ. આપણે પદાર્થના નમુનાની અંદર કુલ ચુંબકીયક્ષેત્રમાં મળતા ફાળાને બે ભાગમાં વહેંચ્યો છે : એક; બાહ્ય પરિબળ જેમ કે સૉલેનોઇડમાં વહેતા વિદ્યુત પ્રવાહને લીધે છે તેને **H** વડે દર્શાવાય છે. બીજો એટલે કે **M** ચુંબકીય પદાર્થના વિશિષ્ટ ગુણધર્મને કારણે છે. આ બીજી રાશિ પર બાહ્ય પરિબળોની અસર થતી હોય છે. આ બાહ્ય અસરને ગાણિતીક રીતે આ મુજબ દર્શાવાય છે.

$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$ (5.17)

જ્યાં χ, એ પરિમાણ રહિત રાશી છે, જેને યોગ્ય રીતે જ ચુંબકીય (મેગ્નેટીક) સસેપ્ટિબિલીટી કહે છે. તે ચુંબકીય દ્રવ્ય બાહ્ય (ચુંબકીય) ક્ષેત્રને કેવો પ્રતિભાવ (Response) આપે છે તે દર્શાવે છે. કોષ્ટક 5.2માં કેટલાક તત્વો માટે χ ના મૂલ્યો દર્શાવ્યા છે. પેરામેગ્નેટિક તરીકે ઓળખાતા દ્રવ્યો માટે તેનું મૂલ્ય નાનું અને ધન હોય છે. ડાયોમેગ્નેટીક તરીકે ઓળખાતા દ્રવ્યો માટે તેનું મૂલ્ય નાનું અને ઋણ હોય છે. આ બીજા કિસ્સામાં **M** અને **H** વિરુદ્ધ દિશામાં હોય છે. સમીકરણો (5.16) અને (5.17) પરથી

$\mathbf{B} = \mu_0(1 + \chi)\mathbf{H}$ (5.18)

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

$= \mu \mathbf{H}$ (5.19)

જ્યાં, $\mu_r = 1 + \chi$ એ પરિમાણ રહિત રાશિ છે, જેને પદાર્થની સાપેક્ષ ચુંબકીય (મેગ્નેટીક) પરમિએબીલીટી કહે છે. તે સ્થિતવિદ્યુતશાસ્ત્રમાં આવતા ડાઇઇલેક્ટ્રીક અચળાંક સાથે સામ્યતા ધરાવે છે. પદાર્થની મેગ્નેટીક પરમિએબિલીટી μ છે અને તેના પરિમાણ અને એકમ પણ μ_0 જેવા જ છે :

$\mu = \mu_0 \mu_r = \mu_0(1 + \chi)$

ત્રણ રાશિઓ χ, μ_r અને μ એકબીજા સાથે સંકળાયેલી છે અને તેમાંથી કોઇ એક જ સ્વતંત્ર છે. જો એક આપેલ હોય તો બાકીની બેની સહેલાઈથી ગણતરી કરી શકાય છે.

કોષ્ટક 5.2 300K તાપમાને કેટલાક તત્વોની મેગ્નેટીક સસેપ્ટિબિલીટી (MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF SOME ELEMENTS AT 300K)			
ડાયામેગ્નેટિક દ્રવ્ય	χ	પેરામેગ્નેટીક દ્રવ્ય	χ
બિસ્મથ	-1.66×10^{-5}	ઍલ્યુમિનિયમ	2.3×10^{-5}
તાંબુ	-9.8×10^{-6}	કેલ્શિયમ	1.9×10^{-5}
હીરો	-2.2×10^{-5}	ક્રોમીયમ	2.7×10^{-4}
સોનું	-3.6×10^{-5}	લિથિયમ	2.1×10^{-5}
સીસુ	-1.7×10^{-5}	મેગ્નેશિયમ	1.2×10^{-5}
પારો	-2.9×10^{-5}	નિઓબિયમ	2.6×10^{-5}
નાઈટ્રોજન (STP)	-5.0×10^{-9}	ઑક્સિજન (STP)	2.1×10^{-6}
ચાંદી	-2.6×10^{-5}	પ્લેટિનમ	2.9×10^{-4}
સિલિકોન	-4.2×10^{-6}	ટંગસ્ટન	6.8×10^{-5}

ઉદાહરણ 5.10 એક સૉલેનોઇડમાં ગર્ભમાંના (કોર) દ્રવ્યની સાપેક્ષ પરમિએબિલિટી 400 છે. સૉલેનોઇડના આંટા ગર્ભથી અવાહક વડે જુદા પાડેલા છે. આંટામાંથી 2A વિદ્યુતપ્રવાહ પસાર થાય છે. જો તેમાં એક મીટર દીઠ 1000 આંટા હોય, તો (a) H, (b) M, (c) B અને (d) મેગ્નેટાઇઝીંગ પ્રવાહ I_mની ગણતરી કરો.

ઉકેલ

(a) ક્ષેત્ર H, ગર્ભના દ્રવ્ય પર આધાર રાખે છે, અને તેનું મૂલ્ય

$H = nI = 1000 \times 2.0 = 2 \times 10^3$ A/m

(b) ચુંબકીયક્ષેત્ર Bનું મૂલ્ય

$$B = \mu_r \mu_0 H$$
$$= 400 \times 4\pi \times 10^{-7} (N/A^2) \times 2 \times 10^3 (A/m)$$
$$= 1.0\,T$$

(c) મેગ્નેટાઇઝેશન

$$M = (B - \mu_0 H)/\mu_0$$
$$= (\mu_r \mu_0 H - \mu_0 H)/\mu_0 = (\mu_r - 1)H = 399 \times H$$
$$\cong 8 \times 10^5 (A/m)$$

(d) મેગ્નેટાઇઝીંગ વિદ્યુત પ્રવાહ I_M એ કોરની ગેરહાજરીમાં સૉલેનોઇડના આંટાઓની અંદર પસાર કરવો જરૂરી વધારાનો વિદ્યુત પ્રવાહ છે જેથી કુલ વિદ્યુતપ્રવાહ કોરની હાજરીમાં મળતું Bનું મૂલ્ય આપે.

આથી $B = \mu_0 n (I + I_M)$

$I = 2A, B = 1\,T$ પરથી $I_M = 794 A$.

ઉદાહરણ 5.10

5.6 દ્રવ્યોના ચુંબકીય ગુણધર્મો (MAGNETC PROPERTIES OF MATERIALS)

આગળના પરિચ્છેદમાં કરેલી ચર્ચા દ્રવ્યોને ડાયામેગ્નેટીક, પેરામેગ્નેટીક અથવા ફેરોમેગ્નેટીક તરીકે વર્ગીકૃત કરવામાં આપણને મદદ રૂપ થશે. સસેપ્ટિબિલિટી χના સંદર્ભમાં, જો χ ઋણ હોય તો તે દ્રવ્ય ડાયામેગ્નેટીક, χ-ધન અને નાનું હોય તો-પેરા, અને જો χ મોટું તથા ધન હોય તો ફેરોમેગ્નેટીક છે.

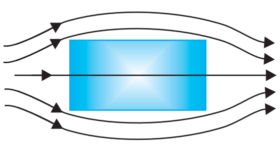
કોષ્ટક 5.3 જોતાં આપણને આ પદાર્થો વિષે ખ્યાલ આવશે. અહીં પેરામેગ્નેટીક પદાર્થોને જુદા પાડવામાં માટે એક નાની ધન સંખ્યા ϵ લેવામાં આવી છે. ત્યારબાદ આપણે આ પદાર્થોનો વિગતવાર અભ્યાસ કરીશું.

કોષ્ટક 5.3

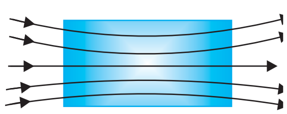
ડાયામેગ્નેટિક	પેરામેગ્નેટીક	ફેરોમેગ્નેટીક
$-1 \le \chi < 0$	$0 < \chi < \varepsilon$	$\chi >> 1$
$0 \le \mu_r < 1$	$1 < \mu_r < 1 + \varepsilon$	$\mu_r >> 1$
$\mu < \mu_0$	$\mu > \mu_0$	$\mu >> \mu_0$

5.6.1 ડાયામેગ્નેટીઝમ (Diamagnetism)

ડાયામેગ્નેટીક પદાર્થો એવા હોય છે કે જે બાહ્ય ચુંબકીયક્ષેત્રમાં મુકતાં પ્રબળથી નબળા ચુંબકીયક્ષેત્ર તરફ ગતિ કરવાનું વલણ ધરાવે છે. બીજા શબ્દોમાં, ચુંબક જેમ લોખંડને આકર્ષે છે તેનાથી વિપરિત તે ડાયામેગ્નેટીક પદાર્થને અપાકર્ષે છે.



(a)



(b)

આકૃતિ 5.12
(a) ડાયામેગ્નેટીક,
(b) પેરામેગ્નેટીક દ્રવ્ય પાસે ચુંબકીય ક્ષેત્ર રેખાઓની વર્તણુંક

આકૃતિ 5.12(a)માં બાહ્ય ચુંબકીયક્ષેત્રમાં મુકેલો ડાયામેગ્નેટીક પદાર્થનો ટુકડો દર્શાવ્યો છે. ક્ષેત્રરેખાઓ અપાકર્ષાય છે એટલે કે બહાર તરફ ધકેલાય છે અને દ્રવ્યમાં ક્ષેત્ર (ની તીવ્રતા) ઘટે છે. મોટા ભાગના કિસ્સાઓમાં, કોષ્ટક 5.2માં દર્શાવ્યા મુજબ, આ ઘટાડો 10^5માં એક ભાગ જેટલો થોડોક જ હોય છે. જો અનિયમિત ચુંબકીયક્ષેત્રમાં મુકીએ તો આ (ડાયામેગ્નેટીક) ટુકડો પ્રબળથી નબળા ક્ષેત્ર તરફ ખસશે.

ડાયામેગ્નેટીઝમની સૌથી સરળ સમજૂતી આ મુજબ છે. પરમાણુમાં ન્યુક્લિઅસની આસપાસ કક્ષીય ભ્રમણ કરતા ઈલેક્ટ્રૉન કક્ષીય કોણીય વેગમાન ધરાવે છે. કક્ષામાં ફરતા આ ઈલેક્ટ્રૉન વિદ્યુતપ્રવાહ ધારીત ગૂંચળાને સમતુલ્ય કહેવાય અને તેથી તે કક્ષીય ચુંબકીય ચાકમાત્રા (મેગ્નેટીક મોમેન્ટ) ધરાવે છે. ડાયામેગ્નેટીક પદાર્થો એવા છે કે જેમના માટે પરમાણુમાં પરિણામી ચુંબકીય ચાકમાત્રા (મેગ્નેટીક મોમેન્ટ) શૂન્ય હોય છે. ચુંબકીયક્ષેત્રની હાજરીમાં, જે ઈલેક્ટ્રૉનોની ચુંબકીય ચાકમાત્રા (મેગ્નેટીક મોમેન્ટ) તે જ દિશામાં હોય તે ધીમા પડે છે અને જેમની વિરુદ્ધ દિશામાં હોય તે ઝડપ પકડે છે. આવું લેન્ઝના નિયમ મુજબ પ્રેરિત વિદ્યુતપ્રવાહના કારણે થાય છે, જે તમે પ્રકરણ-6માં ભણશો. આમ, આ પદાર્થ આપેલ ક્ષેત્રની વિરુદ્ધ દિશામાં ચોખ્ખી (પરિણામી) ચુંબકીય ચાકમાત્રા (મેગ્નેટીક મોમેન્ટ) ઉત્પન્ન કરે છે અને તેથી અપાકર્ષાય છે.

બિસ્મથ, કોપર, લેડ (સીસુ), સિલિકોન, નાઈટ્રોજન (STP એ) પાણી અને સોડિયમ ક્લોરાઈડ એ કેટલાક ડાયામેગ્નેટીક પદાર્થો છે. બધાં જ દ્રવ્યોમાં ડાયામેગ્નેટીઝમ હાજર છે. પરંતુ મોટાભાગના કિસ્સાઓમાં આ અસર એટલી બધી નિર્બળ હોય છે કે પેરામેગ્નેટીઝમ અને ફેરોમેગ્નેટીઝમ વગેરે જેવી અન્ય અસરોથી ખસી જાય છે.

સુપર કંડક્ટર્સ અલગ પ્રકારના જ ડાયામેગ્નેટીક પદાર્થો છે. તે ખૂબ નીચા તાપમાનોએ ઠંડી કરેલી ધાતુઓ છે જે પૂર્ણતઃ (Perfect) વાહકતા અને પૂર્ણતઃ ડાયામેગ્નેટીઝમ એમ બંને દર્શાવે છે. અહીં ક્ષેત્ર રેખાઓ (દ્રવ્યની) સંપૂર્ણ બહાર ધકેલાય છે ! $\chi = -1$ અને $\mu_r = 0$. સુપર કંડક્ટર ચુંબકને અપાકર્ષે છે અને (ન્યૂટનના ત્રીજા નિયમ મુજબ) ચુંબક દ્વારા અપાકર્ષાય છે. સુપર કંડક્ટર્સમાં જોવા મળતી સંપૂર્ણ (Perfact) ડાયામેગ્નેટીઝમની અસરને તેના શોધકના નામ પરથી, મિઝનર (Meissner) અસર કહે છે. સુપર કંડક્ટર ચુંબકોનો ઘણી જગ્યાએ લાભદાયક ઉપયોગ કરી શકાય છે, જેમકે, ચુંબકત્વથી ઊંચકાઈને દોડતી અતિ ઝડપી (Superfast Trains) ટ્રેન.

5.6.2 પેરામેગ્નેટીઝમ (Paramagnetism)

પેરામેગ્નેટીક પદાર્થો એવા પદાર્થો છે કે જેને બાહ્ય ચુંબકીયક્ષેત્રમાં મૂકતાં નિર્બળ ચુંબકત્વ ધારણ કરે છે. તે નિર્બળ ચુંબકીયક્ષેત્રથી પ્રબળ ચુંબકીયક્ષેત્ર તરફ ગતિ કરવાનું વલણ ધરાવે છે, એટલે કે તેઓ ચુંબક તરફ નિર્બળ આકર્ષણ અનુભવે છે.

પેરામેગ્નેટિક દ્રવ્યના વ્યક્તિગત પરમાણુઓ (કે આયનો કે અણુઓ) તેમની પોતાની કાયમી ચુંબકીય દ્વિ-ધ્રુવી ચાકમાત્રા (મેગ્નેટીક ડાયપોલ મોમેન્ટ) ધરાવે છે. આ પરમાણુઓની સતત તાપીય અસ્તવ્યસ્ત ગતિના કારણે પરિણામી મેગ્નેટાઇઝેશન જોવા મળતું નથી. નીચા તાપમાને, પુરતા પ્રબળ એવા બાહ્ય ચુંબકીયક્ષેત્ર $\mathbf{B}_0$ની હાજરીમાં, આ દરેક વ્યક્તિગત પરમાણ્વીક દ્વિ-ધ્રુવી ચાકમાત્રા (ડાયપોલ મોમેન્ટ)ને $\mathbf{B}_0$ની દિશામાં ગોઠવાતી કરી શકાય છે. આકૃતિ 5.12(b)માં બાહ્ય ક્ષેત્રની હાજરીમાં રહેલો એક પેરામેગ્નેટીક દ્રવ્યનો ટુકડો દર્શાવ્યો છે. દ્રવ્યની અંદર ક્ષેત્રરેખાઓ સંકેન્દ્રિત (ભેગી) થવા માંડે છે અને અંદરનું ક્ષેત્ર પ્રબળ થાય છે. મોટા ભાગના કિસ્સાઓમાં, કોષ્ટક 5.2માં દર્શાવ્યું છે તે મુજબ, આ વધારો 10^5 માં એક ભાગ જેટલો થોડો હોય છે. જ્યારે આ ટુકડાને અનિયમિત ચુંબકીયક્ષેત્રમાં મુકવામાં આવે ત્યારે, તે નિર્બળથી પ્રબળ ક્ષેત્ર તરફ ગતિ કરવા પ્રયત્ન કરે છે.

ઍલ્યુમિનિયમ, સોડિયમ, કેલ્શિયમ, ઑક્સિજન (STP) અને કૉપર ક્લોરાઇડ વગેરે કેટલાંક પેરામેગ્નેટીક પદાર્થો છે. પ્રયોગો દ્વારા એ જાણવા મળ્યું છે કે પેરામેગ્નેટીક દ્રવ્યનું મેગ્નેટાઇઝેશન તેના નિરપેક્ષ તાપમાન (Absolute Temperature) Tના વ્યસ્ત પ્રમાણમાં છે,

$$M = C\frac{B_0}{T} \qquad [5.20(a)]$$

અથવા તેને સમતુલ્ય સમીકરણ (5.12) અને (5.17) પરથી

$$\chi = C\frac{\mu_0}{T} \qquad [5.20(b)]$$

આને તેના શોધક પિયરી ક્યુરી (Pieree Curie 1859-1906)ના માનમાં ક્યુરીનો નિયમ કહે છે. અચળાંક Cને ક્યુરીનો અચળાંક કહે છે. આમ, પેરામેગ્નેટીક દ્રવ્ય માટે χ અને μ_r બંને ફક્ત દ્રવ્ય પર આધાર રાખતા નથી, પરંતુ (સામાન્યતઃ) તેના તાપમાન પર પણ આધાર રાખે છે. જો ક્ષેત્ર વધારવામાં કે તાપમાન ઘટાડવામાં આવે તો મેગ્નેટાઇઝેશન તે સંતૃપ્ત મૂલ્ય M_s જેટલું પહોંચે ત્યાં સુધી વધતું જાય છે, કે જે બિંદુએ બધા જ ડાયપોલ બાહ્ય ક્ષેત્ર સાથે સંપૂર્ણ રીતે એક રેખસ્થ ગોઠવાઈ જાય છે. આનાથી આગળ ક્યુરીનો નિયમ [સમીકરણ (5.20)] લાગુ પડતો નથી.

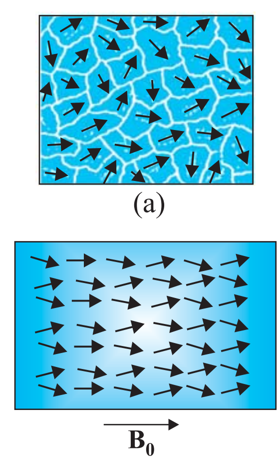
5.6.3 ફેરોમેગ્નેટીઝમ (Ferromagnetism)

ફેરોમેગ્નેટીક પદાર્થો એવા પદાર્થો છે, કે જેમને બાહ્ય ચુંબકીયક્ષેત્રમાં મૂકતાં પ્રબળ ચુંબકત્વ ધારણ કરે છે. તેઓ નિર્બળ ક્ષેત્રથી પ્રબળ ક્ષેત્ર તરફ જવાનું પ્રબળ વલણ ધરાવે છે, એટલે કે તેઓ ચુંબક પ્રત્યે પ્રબળ આકર્ષણ અનુભવે છે.

ફેરોમેગ્નેટીક દ્રવ્યમાં વ્યક્તિગત પરમાણુઓ (કે આયનો કે અણુઓ), પેરામેગ્નેટીક પદાર્થની જેમ દ્વિ-ધ્રુવી ચાકમાત્રા (ડાયપોલ મોમેન્ટ) ધરાવે છે. આમ છતાં, તેઓ એકબીજા સાથે એવી રીતે આંતરક્રિયા કરે છે, કે જેથી એક સ્થૂળ વિસ્તાર જેને ડોમેઇન (પ્રભાવક્ષેત્ર-Domain) કહે છે તેમાં રહેલા આ ડાયપોલ તત્કાલ એક રેખસ્થ ગોઠવાઈ જાય છે. આ સહકારી અસરની સમજુતી માટે ક્વૉન્ટમ યંત્રશાસ્ત્રનો ઉપયોગ કરવો પડે અને તે આ પુસ્તકના કાર્યક્ષેત્રની બહાર છે. દરેક ડોમેઇન એક ચોખ્ખું મેગ્નેટાઇઝેશન ધરાવે છે. લાક્ષણિક ડોમેઇનનું પરિમાણ 1 mm જેવું છે અને આ ડોમેઇન લગભગ 10^{11} પરમાણુઓ ધરાવે છે. શરૂઆતમાં, અલગ અલગ ડોમેઇનનું મેગ્નેટાઇઝેશન અસ્તવ્યસ્ત બદલાતું હોય છે અને તેથી સમગ્ર જથ્થાને કોઈ મેગ્નેટાઇઝેશન હોતું નથી. આ હકીકત આકૃતિ 5.13(a)માં દર્શાવી છે. જ્યારે આપણે બાહ્ય ચુંબકીયક્ષેત્ર $\mathbf{B}_0$ લગાડીએ, ત્યારે ડોમેઇન્સ $\mathbf{B}_0$ની દિશામાં ગોઠવાય છે અને તે જ વખતે $\mathbf{B}_0$ની દિશામાં ગોઠવાયેલ ડોમેઇનની સાઇઝ (કદ) વધવા લાગે છે. ડોમેઇનોનું અસ્તિત્વ અને $\mathbf{B}_0$માં તેમની ગતિ

PHYSICS

Magnetic materials, domain, etc. :
http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Physics/MagneticMatls.htm



(b)

આકૃતિ 5.13 (a) જુદી જુદી દિશાઓમાં ગોઠવાયેલા ડોમેઇન, (b) એક રેખસ્થ ડોમેઇન

ખાલી અનુમાન (કાલ્પનિક) નથી. ફેરોમેગ્નેટીક પદાર્થની ભૂકીના કલીલ દ્રાવણ (Suspension)નો છંટકાવ કરીને માઇક્રોસ્કોપ દ્વારા તેમને જોઇ શકાય છે. કલીલ દ્રાવણની ગતિ પણ જોઇ શકાય. આકૃતિ 5.12(b) આ ડોમેઇનો એક રેખસ્થ અને મિશ્રિત થઇને એક 'વિરાટ' ડોમેઇન બનાવે ત્યારની સ્થિતિ દર્શાવે છે.

આમ, ફેરોમેગ્નેટીક દ્રવ્યમાં ક્ષેત્રરેખાઓ ખૂબ જ સંકેન્દ્રિત (ગીચ) હોય છે. અનિયમિત ચુંબકીયક્ષેત્રમાં, આ પદાર્થ પ્રબળ ક્ષેત્રના વિસ્તાર તરફ જવા પ્રયત્ન કરે છે. જ્યારે બાહ્ય ક્ષેત્ર દૂર કરવામાં આવે ત્યારે શું થાય છે તે જોઇને આપણને નવાઇ લાગે. કેટલાક ફેરોમેગ્નેટીક પદાર્થોમાં ચુંબકત્વ (મેગ્નેટાઇઝેશન) ટકી રહે છે. આવા પદાર્થોને સખત ચુંબકીય દ્રવ્યો (Hard Magnetic Materials) કે હાર્ડ ફેરોમેગ્નેટસ કહે છે. એલ્નિકો (Alnico), એક મિશ્ર ધાતુ છે, જે લોખંડ, ઍલ્યુમિનિયમ, નિકલ, કોબાલ્ટ અને તાંબામાંથી બને છે, તે આ પ્રકારનું (ફેરોમેગ્નેટીક) દ્રવ્ય છે. કુદરતી રીતે મળી આવતો લોડસ્ટોન (Lodestone) બીજો આવો પદાર્થ છે. આવા પદાર્થો કાયમી ચુંબકો બનાવે છે, જે કંપાસની સોય અને તેવા અન્ય સાધનોમાં વપરાય છે. બીજી બાજુ, એવા ફેરોમેગ્નેટીક દ્રવ્યોનો વર્ગ પણ છે કે જેમાં બાહ્ય ક્ષેત્ર દૂર કરતાં મૅગ્નેટાઇઝેશન અદૃશ્ય થઈ જાય છે. નરમ લોખંડ એક આવો પદાર્થ છે. યોગ્ય રીતે આવા પદાર્થોને નરમ ફેરોમેગ્નેટીક પદાર્થો કહે છે. એવા ઘણા તત્વો છે જે ફેરોમેગ્નેટીક છે, જેમકે, લોખંડ, કોબાલ્ટ, નિકલ, ગૅડોલિનિયમ વગેરે. તેમની સાપેક્ષ પરમિએબિલિટી > 1000 હોય છે !

ફેરોમેગ્નેટીક ગુણધર્મ તાપમાન પર આધાર રાખે છે. પુરતા ઊંચા તાપમાને, ફેરોમેગ્નેટ પેરામેગ્નેટ બને છે. ડોમેઇન માળખું તાપમાન (વધવા) સાથે વિખેરાઇ (વિભાજિત થઈ) જાય છે. તાપમાન સાથે મેગ્નેટાઇઝેશનનું આમ લુપ્ત થવું ક્રમશઃ હોય છે ! આ અવસ્થા ફેરફાર આપણને ઘન સ્ફટીકના પિગલનની યાદ કરાવે છે. ફેરોમેગ્નેટીઝમથી પેરામેગ્નેટીઝમની સંક્રાન્તિ વખતના તાપમાનને ક્યુરી તાપમાન T_c કહે છે. કોષ્ટક 5.4માં કેટલાક ફેરોમેગ્નેટસનું ક્યુરી તાપમાન દર્શાવ્યું છે. ક્યુરી તાપમાનથી ઉપરના તાપમાને, એટલે કે, પેરામેગ્નેટીક અવસ્થામાં સસેપ્ટિબિલીટી આ મુજબ દર્શાવાય છે,

$$\chi = \frac{C}{T - T_c} \qquad (T > T_c) \qquad (5.21)$$

કોષ્ટક 5.4 કેટલાક ફેરોમેગ્નેટીક દ્રવ્યોનું ક્યુરી તાપમાન T_C

દ્રવ્ય	T_c(K)
કોબાલ્ટ	1394
આયર્ન (લોખંડ)	1043
Fe_2O_3	893
નિકલ	631
ગૅડોલિનિયમ	317

Hysterisis in magnetic materials :
http://hyperphysics.phy_astr.gsiu.edu/hbase/solids/hyst.html

PHYSICS

ઉદાહરણ 5.11 ફેરોમેગ્નેટીક આયર્ન(લોખંડ)માં એક ડોમેઇન સમઘન આકારનું છે જેની બાજુઓ 1 μm લંબાઈની છે. આ ડોમેઇનમાં રહેલા આયર્ન પરમાણુઓની સંખ્યા, ડોમેઇનની મહત્તમ શક્ય એવી ડાયપોલ મોમેન્ટ અને ડોમેઇનનું મેગ્નેટાઇઝેશન શોધો. આયર્નનું પરમાણ્વીય દળ 55 g/mole અને તેની ઘનતા 7.9 g/cm^3 છે. દરેક આયર્ન પરમાણુની ડાયપોલ મોમેન્ટ $9.27 \times 10^{-24}\ Am^2$ છે તેમ ધારો.

ઉદાહરણ 5.11

ઉકેલ સમઘન ડોમેઇનનું કદ

$V = (10^{-6} m)^3 = 10^{-18} m^3 = 10^{-12} cm^3$

તેનું દળ = કદ × ઘનતા = $7.9 \, g \, cm^{-3} \times 10^{-12} cm^3 = 7.9 \times 10^{-12} g$

એવોગેડ્રો અંક 6.02×10^{23} તથા આયર્ન પરમાણુઓનું દળ 55 g/mole છે. આથી, ડોમેઇનમાં રહેલા પરમાણુઓની સંખ્યા

$$N = \frac{7.9 \times 10^{-12} \times 6.023 \times 10^{23}}{55} = 8.65 \times 10^{10} \text{ પરમાણુઓ.}$$

જ્યારે બધી જ પરમાણ્વીક ચાકમાત્રા (મોમેન્ટ) પૂર્ણતઃ એક રેખસ્થ થાય (જે વાસ્તવિક નથી) ત્યારે મહત્તમ શક્ય દ્વિ-ધ્રુવી ચાકમાત્રા (ડાયપોલ મોમેન્ટ) m_{max} મળે. આથી,

$m_{max} = (8.65 \times 10^{10}) \times (9.27 \times 10^{-24}) = 8.0 \times 10^{-13} \, A m^2$

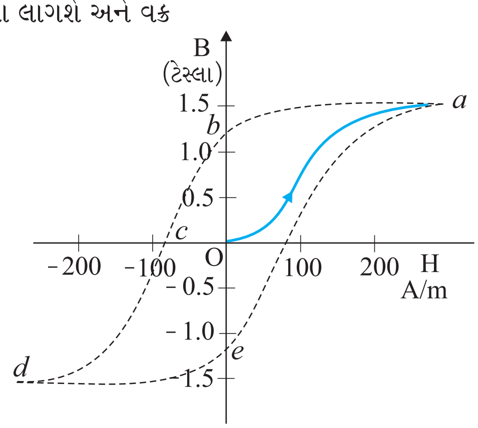
પરિણામી મેગ્નેટાઇઝેશન

$M_{max} = m_{max}$/ડોમેઇનનું કદ

$= 8.0 \times 10^{-13} \, A m^2 / 10^{-18} m^3 = 8.0 \times 10^5 \, A m^{-1}$

ઉદાહરણ 5.11

ફેરોમેગ્નેટીક પદાર્થોમાં **B** અને **H** વચ્ચેનો સંબંધ જટિલ છે. તે ઘણીવાર રેખીય નથી હોતો અને તે ફક્ત આપેલ (ફેરોમેગ્નેટીક) નમૂનાના ચુંબકીય ભૂતકાળ (તે સમય પહેલાં કેવું અને કેટલું ચુંબકત્વ ધરાવતો હતો તેના) પર આધાર રાખે છે. આકૃતિ 5.14માં આવા દ્રવ્ય મેગ્નેટાઇઝ કરવાના એક ચક્ર દરમિયાન તેની વર્તણૂક દર્શાવી છે. ધારોકે શરૂઆતમાં આ દ્રવ્ય મેગ્નેટાઇઝડ નથી. આપણે આ દ્રવ્યને સૉલેનોઇડમાં મુકીએ અને સૉલેનોઇડમાં વિદ્યુતપ્રવાહ વધારીએ. આ દ્રવ્યમાં ચુંબકીય ક્ષેત્ર B વધવા લાગશે અને વક્ર Oaમાં દર્શાવ્યા મુજબ સંતૃપ્ત થશે. આ વર્તણુંક દર્શાવે છે કે ડોમેઇન એક રેખસ્થ થતા જાય છે અને જ્યાં સુધી વધવું શક્ય હોય ત્યાં સુધી એકબીજામાં ભળતા જાય છે. આનાથી આગળ વિદ્યુતપ્રવાહ (અને તેથી ચુંબકીય (મેગ્નેટીક) તીવ્રતા H પણ) વધારવાનો કંઈ અર્થ નથી. ત્યારબાદ, આપણે H ઘટાડી અને શૂન્ય સુધી લઇ જઇએ. H = 0 પાસે B ≠ 0 જે વક્ર ab વડે દર્શાવ્યું છે. H = 0 પાસે Bના મૂલ્યને રિટેન્ટિવિટી (Retentivity કે Remanence) કહે છે. આકૃતિ 5.14માં, $B_R \sim 1.2$ T, જ્યાં R રિટેન્ટિવિટી દર્શાવે છે. બાહ્ય ચાલક ક્ષેત્ર દૂર કર્યું (શૂન્ય) હોવા છતાં ડોમેઇન્સ સંપૂર્ણપણે અસ્તવ્યસ્ત થઈ જતા નથી. ત્યાર બાદ, સૉલેનોઇડમાં વિદ્યુતપ્રવાહ (ની દિશા) ઉલટાવવામાં આવે છે અને ધીમે ધીમે વધારવામાં આવે છે. જ્યાં સુધી અંદરનું પરિણામી ક્ષેત્ર શૂન્ય ન થાય ત્યાં સુધી કેટલાક ડોમેઇન ઉલટાઇ જાય છે. આ હકીકત વક્ર bc વડે દર્શાવી છે. c પાસે Hનું આ મૂલ્ય કોઅર્સિવિટી (Coercivity) કહેવાય છે. આકૃતિ 5.14માં $H_c \sim 90 \, A m^{-1}$. ઉલટાવેલા (વિરુદ્ધ દિશાના) વિદ્યુતપ્રવાહનું મૂલ્ય વધતું જાય ત્યારે ફરીથી સંતૃપ્ત સ્થિતિ મળે છે. આ સ્થિતિ વક્ર cd વડે દર્શાવી છે. સંતૃપ્ત ચુંબકીયક્ષેત્ર $B_s \sim 1.5$ T છે. ત્યાર બાદ, વિદ્યુતપ્રવાહ ઘટાડવામાં આવે છે (વક્ર de) અને (ત્યારબાદ) ઉલટાવવામાં આવે છે (વક્ર ea). આ ચક્ર ફરીથી પુનરાવર્તન પામે છે. નોંધો કે H ઘટાડીએ તો પણ વક્ર Oa ફરીથી રચાતો નથી. Hના આપેલ મૂલ્ય માટે Bનું મૂલ્ય અનન્ય મળતું નથી પરંતુ તે પદાર્થના અગાઉના ઇતિહાસ (આગળના મૂલ્ય B) પર આધાર રાખે છે. આ ઘટના હિસ્ટરીસિસ કહેવાય છે. હિસ્ટરીસિસ શબ્દનો અર્થ પાછળ પડવું (ઇતિહાસ નહીં).



આકૃતિ 5.14 ફેરોમેગ્નેટિક પદાર્થો માટે મેગ્નેટીક હિસ્ટરિસિસ લૂપ એ B–H વક્ર છે.

5.7 કાયમી ચુંબકો અને વિદ્યુતચુંબકો (PERMANENT MAGNETS AND ELECTROMAGNETS)

જે દ્રવ્યો ઓરડાના તાપમાને લાંબા સમય ગાળા સુધી ફેરોમેગ્નેટીક ગુણધર્મ જાળવી રાખતા હોય તે કાયમી ચુંબકો કહેવાય છે. કાયમી ચુંબકો ઘણી રીતે બનાવી શકાય છે. કોઇ આયર્ન (લોખંડ)ના સળીયાને

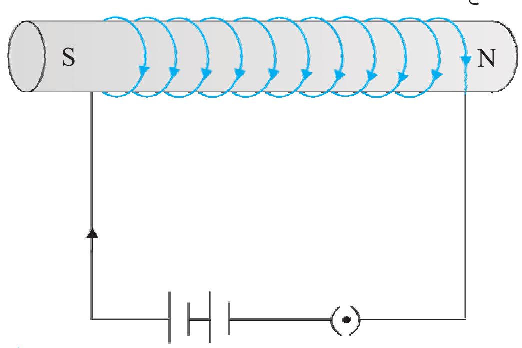
આકૃતિ 5.15 એક લુહાર ઉત્તર-દક્ષિણ દિશામાં રાખેલ લાલઘુમ (ગરમ) લોખંડને હથોડીથી વારંવાર ઠપકારીને કાયમી ચુંબક બનાવી રહ્યો છે. આ આકૃતિ વિલિયમ ગિલ્બર્ટ નામના લેખક દ્વારા ડી-મૅગ્નેટ નામના ઇ.સ. 1600માં પ્રસિદ્ધ કરેલ લેખમાં આપેલ ઉદાહરણ પરથી લેવામાં આવેલ છે, જે ઈંગ્લેન્ડના રાણી એલિઝાબેથના વડા ડૉક્ટર (Court Physician) હતા.

ઉત્તર-દક્ષિણ દિશામાં રાખીને વારંવાર ટીપે (ઠપકારે) તો કાયમી ચુંબક બને. આ પદ્ધતિ આકૃતિ 5.15માં દર્શાવી છે. આ ઉદાહરણ 400 વર્ષ જૂના પુસ્તકમાંથી એમ દર્શાવવા માટે લીધું છે કે કાયમી ચુંબકો બનાવવા એ બહુ જુની કળા (કારીગરી) છે. જો કોઇ લોખંડના ટુકડાને પકડી રાખવામાં આવે અને તેના એક છેડા પર ગજિયા ચુંબકને ઘણી વખત એક જ દિશામાં ઘસવામાં આવે તો કાયમી ચુંબક બને.

કાયમી ચુંબક બનાવવાનો એક કાર્યક્ષમ (ઉત્તમ) ઉપાય એ છે કે, ફેરોમેગ્નેટીક સળીયાને સૉલોનોઇડમાં મુકીને વિદ્યુતપ્રવાહ પસાર કરવો. સૉલેનોઇડનું ચુંબકીયક્ષેત્ર સળીયાને ચુંબકીત કરે છે.

હિસ્ટરિસિસ વક્ર (આકૃતિ 5.14) પરથી આપણને કાયમી ચુંબકો બનાવવા માટે યોગ્ય દ્રવ્યો શોધવામાં અનુકુળતા થાય. આવા દ્રવ્યને વધુ (ઊંચી) રીટેન્ટીવીટી હોવી જોઇએ કે જેથી ચુંબક પ્રબળ બને અને વધુ (મોટી) કોઅર્સિવિટી હોવી જોઇએ કે જેથી બાહ્ય ચુંબકીયક્ષેત્રોના ફેરફારો, તાપમાનના ફેરફારો કે નાના યાંત્રિક ભંગાણના કારણે તેનું મેગ્નેટાઇઝેશન ભૂંસાઇ (નાબૂદ) ન થઇ જાય. ઉપરાંત આ દ્રવ્યને મોટી પારગમ્યતા (પરમિએબિલિટી) હોવી જોઇએ. સ્ટીલ એક જાણીતો અનુકુળ વિકલ્પ છે. નરમ લોખંડની સરખામણીમાં તેની રીટેન્ટિવિટી થોડીક જ ઓછી છે પરંતુ તે નરમ લોખંડની ખૂબ નાની કોઅર્સિવિટીની સરખામણીમાં ખૂબ મોટી કોઅર્સિવિટી ધરાવે છે. કાયમી ચુંબકો બનાવવા માટે બીજા યોગ્ય દ્રવ્યો અલ્નીકો (Alnico), કોબાલ્ટ સ્ટીલ અને ટીકોનાલ (Ticonal) છે.

વિદ્યુત ચુંબકોના ગર્ભ (કોર) ફેરોમેગ્નેટીક દ્રવ્યોના બનેલા હોય છે, જે મોટી પરમિએબિલીટી અને ઓછી રીટેન્ટિવિટી ધરાવે છે. વિદ્યુત ચુંબક માટે નરમ લોખંડ યોગ્ય દ્રવ્ય છે. સૉલેનોઇડમાં નરમ લોખંડનો સળીયો મુકી અને વિદ્યુતપ્રવાહ પસાર કરતાં આપણે સૉલેનોઇડનું ચુંબકત્વ હજાર ગણું વધારી શકીએ. જ્યારે આપણે સૉલેનોઇડમાંથી પસાર થતો વિદ્યુતપ્રવાહ બંધ કરી દઇએ ત્યારે તેનું ચુંબકત્વ પણ શૂન્ય થઇ જાય છે. કારણ કે નરમ લોખંડને ઓછી રીટેન્ટિવિટી હોય છે. આ વ્યવસ્થા આકૃતિ 5.16માં દર્શાવી છે.



આકૃતિ 5.16 સૉલેનોઇડના કોરમાં આવેલું નરમ લોખંડ વિદ્યુત ચુંબક તરીકે વર્તે છે.

કેટલાક ઉપયોગોમાં, દ્રવ્ય લાંબા સમય સુધી ચુંબકીકરણના ac ચક્રમાંથી પસાર થાય છે. આવું ટ્રાન્સફોર્મરના ગર્ભમાં (કોરમાં) અને ટેલીફોનના ડાયાફ્રામમાં થાય છે. આવા દ્રવ્યોના હિસ્ટરીસિસ વક્ર સાંકડા હોવા જોઇએ, પરિણામે ઊર્જાનો વ્યય અને તાપમાનનો વધારો ઓછો થાય છે. દ્રવ્યને વધુ (મોટી) અવરોધકતા (Resistivity) હોવી જોઇએ કે જેથી ઘૂમરી પ્રવાહ (Eddy Current)ને લીધે વ્યય ઓછો થાય. ઘૂમરી પ્રવાહ વિશે તમે પ્રકરણ-6માં ભણશો.

વિદ્યુત ચુંબકો વિદ્યુત બેલ (ઘંટડી)માં, લાઉડસ્પિકરમાં અને ટેલિફોન ડાયાફ્રામમાં વપરાય છે. મોટા ઈલેક્ટ્રૉ મેગ્નેટસ, ક્રેઇનમાં મોટા યંત્રો તથા મોટા જથ્થામાં લોખંડ અને સ્ટીલ ઊંચકવા માટે વપરાય છે.

India's Magnetic Field :
http://iigs.iigm.res.in

PHYSICS

ભારતના ચુંબકીયક્ષેત્રનો નકશો બનાવવો (MAPPING INDIA'S MAGNETIC FIELD)

ધરતીમાં ખનિજની ખાણની શોધખોળ માટે, દૂર સંચાર (સંદેશાવ્યવહાર) અને વહાણના દિશા સૂચનમાં ઉપયોગી હોવાથી મોટા ભાગના દેશો દ્વારા પૃથ્વીના ચુંબકીયક્ષેત્રનો નકશો બનાવવાનું કામ ભૌગોલિક નકશાના કામ જેટલી ચોકસાઈથી કરવામાં આવે છે. ભારતમાં દક્ષિણમાં ત્રિવેન્દ્રમ (અત્યારનું તિરુવનન્તપુરમ) થી શરૂ કરીને ઉત્તરમાં ગુલમર્ગ સુધી લગભગ ડઝન જેટલી વેધશાળાઓ કાર્યરત છે. આ વેધશાળાઓ (Observatories) કોલાબા, મુંબઈમાં આવેલા ઈન્ડીયન ઈન્સ્ટીટ્યુટ ઓફ જીઓમેગ્નેટીઝમ (IIG)નાં તાબા હેઠળ કામ કરે છે. IIG એ કોલાબા અને અલીબાગ વેધશાળાઓમાંથી વિકસી હતી અને 1971માં વિધિવત્ સ્થપાઈ હતી. જમીન પર, સમુદ્રમાં અને અવકાશમાં ભૂચુંબકીયક્ષેત્રો અને તેમના ફેરફારોની સતત દેખરેખ રાખવાનું કાર્ય IIG (દેશભરમાં ફેલાયેલી વેધશાળાઓ મારફતે) કરે છે. ઓઈલ એન્ડ નેચરલ ગેસ કોર્પોરેશન (ONGC), નેશનલ ઈન્સ્ટીટયુટ ઓફ ઓસનોલોજી (NIO) અને ઈન્ડીયન સ્પેસ રીસર્ચ ઓર્ગેનાઈઝેશન (ISRO)ને તે સેવા પૂરી પાડે છે. તે વૈશ્વિક નેટવર્કનો એક ભાગ છે. જે સતત ભૂચુંબકીય માહિતી સાથે અદ્યતન (Update) રહે છે. હવે ભારત પાસે એક કાયમી સ્થળ ગંગોત્રી છે.

સારાંશ

1. ચુંબકત્વનું વિજ્ઞાન ઘણું જૂનું છે. જુના જમાનાથી એ જાણીતું છે કે ચુંબકીય પદાર્થો ઉત્તર-દક્ષિણ દિશા બતાવે છે; સજાતીય ચુંબકીય-ધ્રુવો અપાકર્ષે છે અને વિજાતીય આકર્ષે છે; તથા ગજિયા ચુંબકના બે ટુકડા કરતાં, આપણને બે નાના સ્વતંત્ર ચુંબક મળે છે. ચુંબકીય ધ્રુવો જુદા પાડી શકાતા નથી.
2. જ્યારે દ્વિ-ધ્રુવી ચાકમાત્રા (ડાયપોલ મોમેન્ટ) $\mathbf{m}$ ધરાવતા ગજિયા ચુંબકને નિયમિત ચુંબકીયક્ષેત્ર $\mathbf{B}$માં મુકવામાં આવે છે ત્યારે,
   (a) તેના પર લાગતું બળ શૂન્ય હોય છે,
   (b) તેના પર લાગતું ટૉર્ક $\mathbf{m}\times\mathbf{B}$ હોય છે,
   (c) તેની સ્થિતિઊર્જા $-\mathbf{m}\cdot\mathbf{B}$ હોય છે, જ્યાં આપણે એવું નક્કી કર્યું છે કે $\mathbf{m}$ એ $\mathbf{B}$ને લંબરૂપે ગોઠવાયેલ હોય ત્યારે ઊર્જા શૂન્ય છે.
3. l લંબાઈ અને દ્વિ-ધ્રુવી ચાકમાત્રા (મેગ્નેટીક મોમેન્ટ) $\mathbf{m}$ ધરાવતો ગજિયો ચુંબક ધારો. તેના મધ્યબિંદુથી r અંતરે, જ્યાં $r >> l$, ગજિયા ચુંબક વડે ઉદ્ભવતું ચુંબકીયક્ષેત્ર $\mathbf{B}$

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \mathbf{m}}{2\pi r^3} \quad \text{(અક્ષ પર)}$$

$$= -\frac{\mu_0 \mathbf{m}}{4\pi r^3} \quad \text{(વિષુવરેખા પર)}$$

4. ચુંબકત્વ માટે ગૉસનો નિયમ દર્શાવે છે કે કોઇ પણ બંધ પૃષ્ઠમાંથી પસાર થતું ચોખ્ખું ફ્લક્સ શૂન્ય હોય છે.

$$\phi_B = \sum_{\substack{\text{બધા ક્ષેત્રફળ} \\ \text{ખંડો } \Delta \mathbf{S} \text{ પર}}} \mathbf{B}\cdot\Delta\mathbf{S} = 0$$

5. પૃથ્વીનું ચુંબકીયક્ષેત્ર, તેના કેન્દ્રમાં રહેલા (કાલ્પનિક) ચુંબકીય દ્વિ-ધ્રુવી (ડાયપોલ)ના ક્ષેત્ર જેવું હોય છે. ભૌગોલિક ઉત્તરધ્રુવ પાસે આવેલા (ચુંબકીય) ધ્રુવને ઉત્તર ચુંબકીય ધ્રુવ કહે છે. તે જ રીતે, ભૌગોલિક દક્ષિણધ્રુવ પાસે આવેલા (ચુંબકીય) ધ્રુવને દક્ષિણ ચુંબકીય ધ્રુવ કહે છે. આ ડાયપોલ પૃથ્વીની ભ્રમણ અક્ષ સાથે નાનો ખૂણો બનાવતી દિશામાં ગોઠવાયેલો છે. પૃથ્વીની સપાટી પર ચુંબકીયક્ષેત્રનું માન $\approx 4\times10^{-5}$ T છે.

6. પૃથ્વીની સપાટી પાસે ચુંબકીયક્ષેત્ર દર્શાવવા ત્રણ રાશિઓની જરૂર પડે છે – સમક્ષિતિજ ઘટક, ચુંબકીય ડેક્લીનેશન, અને ચુંબકીય ડીપ (નમનકોણ). આ બધા પૃથ્વીના ચુંબકીયક્ષેત્રના તત્વો (ઘટકો) કહેવાય છે.
7. બાહ્ય ચુંબકીયક્ષેત્ર $\mathbf{B}_0$માં મુકેલ એક પદાર્થ ધારો. ચુંબકીય તિવ્રતા આ રીતે વ્યાખ્યાયિત થાય છે.
   $\mathbf{H} = \mathbf{B}_0/\mu_0$
   પદાર્થનું મેગ્નેટાઈઝેશન **M** એટલે એકમ કદ દીઠ દ્વિ-ધ્રુવી ચાકમાત્રા (ડાયપોલ મોમેન્ટ). પદાર્થમાં ચુંબકીયક્ષેત્ર **B**
   $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$ છે.
8. રેખીય દ્રવ્ય માટે $\mathbf{M} = \chi\mathbf{H}$. આથી $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$ અને χને દ્રવ્યની ચુંબકીય સસેપ્ટિબિલિટી કહે છે. ત્રણ રાશિઓ χ, સાપેક્ષ ચુંબકીય પારગમ્યતા (પરમિએબિલિટી) μ_r, અને ચુંબકીય પરમિએબિલિટી μ, આ રીતે સંકળાયેલા છે :
   $\mu = \mu_0\mu_r$
   $\mu_r = 1 + \chi$
9. ચુંબકીય પદાર્થોને સામાન્ય રીતે ત્રણ ભાગમાં વહેંચવામાં આવે છે : ડાયામેગ્નેટીક, પેરામેગ્નેટીક અને ફેરોમેગ્નેટીક.
   ડાયામેગ્નેટીક પદાર્થો માટે χ ઋણ અને નાનું હોય છે જ્યારે પેરામેગ્નેટીક પદાર્થો માટે તે ધન અને નાનું હોય છે. ફેરોમેગ્નેટીક પદાર્થો માટે χનું મૂલ્ય મોટું હોય છે અને **B** અને **H** વચ્ચેના અરેખીય સંબંધ વડે તેમની વિલક્ષણતા રજૂ થાય છે.
10. જે દ્રવ્યો, ઓરડાના તાપમાને, તેમના ફેરોમેગ્નેટીક ગુણધર્મને લાંબા સમયગાળા સુધી જાળવી રાખે તેમને કાયમી ચુંબકો કહેવાય.

ભૌતિક રાશિ	સંજ્ઞા	પ્રકાર	પરિમાણ	એકમ	નોંધ
મુક્ત અવકાશની પારગમ્યતા (પરમિએબિલિટી)	μ_0	અદિશ	$[MLT^{-2}A^{-2}]$	$T\,m\,A^{-1}$	$\mu_0/4\pi = 10^{-7}$
ચુંબકીયક્ષેત્ર, ચુંબકીય ઇન્ડક્શન (પ્રેરણ) ચુંબકીય ફ્લક્સ ઘનતા	**B**	સદિશ	$[MT^{-2}A^{-1}]$	T (tesla)	10^4 G (gauss) = 1 T
ચુંબકીય ચાકમાત્રા	**m**	સદિશ	$[L^{-2}A]$	$A\,m^2$	
ચુંબકીય ફ્લક્સ	ϕ_B	અદિશ	$[ML^2T^{-2}A^{-1}]$	W (weber)	$W = T\,m^2$
મેગ્નેટાઈઝેશન	**M**	સદિશ	$[L^{-1}A]$	$A\,m^{-1}$	$\frac{\text{ચુંબકીય ચાકમાત્રા}}{\text{કદ}}$
ચુંબકીય તીવ્રતા, ચુંબકીયક્ષેત્ર પ્રબળતા	**H**	સદિશ	$[L^{-1}A]$	$A\,m^{-1}$	$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$
ચુંબકીય સસેપ્ટિબિલિટી	χ	અદિશ	-	-	$\mathbf{M} = \chi\mathbf{H}$
સાપેક્ષ ચુંબકીય પારગમ્યતા (પરમિએબિલિટી)	μ_r	અદિશ	-	-	$\mathbf{B} = \mu_0\mu_r\mathbf{H}$
ચુંબકીય પારગમ્યતા (પરમિએબિલિટી)	μ	અદિશ	$[MLT^{-2}A^{-2}]$	$T\,m\,A^{-1}$ $N\,A^{-2}$	$\mu = \mu_0\mu_r$ $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$

ગહન વિચારણાના મુદ્દાઓ

1. ઈ.સ. 1800 પછી ગતિ કરતા વિદ્યુતભારો/વિદ્યુતપ્રવાહોના પદમાં ચુંબકીય ઘટના વિશે સંતોષજનક સમજણ મળી હતી. પરંતુ ચુંબકોના દિશા સૂચક ગુણધર્મનો ઉપયોગ તો વૈજ્ઞાનિક સમજણ સ્થાપિત થઈ તેના પહેલાં 2000 વર્ષથી થતો હતો. આમ ઇજનેરી ઉપયોગો માટે વૈજ્ઞાનિક સમજણ હોવી જ જોઈએ એમ જરૂરી નથી. આદર્શ રીતે, વિજ્ઞાન અને એન્જિનિયરીંગ (ઇજનેરી), એક બીજાથી આગળ રહી મદદ કરતા એમ સાથે-સાથે જ ચાલે છે.
2. ચુંબકીય એક ધ્રુવી અસ્તિત્વ ધરાવતી નથી. જો તમે ચુંબકના બે અડધા ભાગ કરો, તો તમને બે નાના ચુંબકો મળે, બીજી બાજુ, અલગ કરેલા ધન અને ઋણ વિદ્યુતભારો અસ્તિત્વ ધરાવે છે. વિદ્યુતભારનો નાનામાં નાનો એકમ અસ્તિત્વ ધરાવે છે, જે ઇલેક્ટ્રૉનનો વિદ્યુતભાર છે જેનું મૂલ્ય $|e| = 1.6 \times 10^{-19}$ C છે. બીજા બધા વિદ્યુતભારો આ નાનામાં નાના એકમ વિદ્યુતભારના પૂર્ણાંક ગુણકના રૂપમાં હોય છે. બીજા શબ્દોમાં વિદ્યુતભાર ક્વૉન્ટમીકૃત છે. આપણે જાણતા નથી કે શા માટે ચુંબકીય એકધ્રુવીઓ અસ્તિત્વ ધરાવતી નથી અથવા શા માટે વિદ્યુતભાર ક્વૉન્ટાઇઝ્ડ હોય છે.
3. ચુંબકીય એક ધ્રુવી અસ્તિત્વ ધરાવતી ન હોવાની હકીકતનું એક પરિણામ એ છે કે ચુંબકીય ક્ષેત્રરેખાઓ સતત હોય છે અને બંધ ગાળા રચે છે. આની વિરુદ્ધ, સ્થિત વિદ્યુતની બળ રેખાઓ ધન વિદ્યુતભારમાંથી નીકળે છે અને ઋણ વિદ્યુતભારમાં અંત પામે છે. (અથવા અનંત તરફ જતાં ક્ષય પામતી જાય છે.)
4. પૃથ્વીનું ચુંબકીયક્ષેત્ર તેમાં રહેલા ખૂબ મોટા ગજિયા ચુંબકના કારણે નથી. પૃથ્વીનું અંદરનું ગર્ભ (કોર) ગરમ અને પિગળેલું છે. કદાચ આ કોરમાં સંવાહી પ્રવાહો પૃથ્વીના ચુંબકીયક્ષેત્ર માટે કારણભૂત હોઈ શકે. કઈ 'ડાઇનેમો' અસર આ પ્રવાહોને જાળવી રાખે છે, અને શા માટે પૃથ્વીનું ચુંબકીયક્ષેત્ર લાખો વર્ષોના ગાળામાં ઉલટાઈ જતું હોય છે તે આપણે જાણતા નથી.
5. મેગ્નેટીક સસેપ્ટિબિલીટી χના મૂલ્યમાં બહુ થોડો તફાવત, પણ સંપૂર્ણ રીતે અલગ પ્રકારની વર્તણૂંક ઉપજાવે છે : ડાયામેગ્નેટિક વિરુદ્ધ પેરામેગ્નેટીક. ડાયામેગ્નેટીક પદાર્થો માટે $\chi = -10^{-5}$ જ્યારે પેરામેગ્નેટીક પદાર્થો માટે $\chi = +10^{-5}$.
6. સંપૂર્ણ ડાયામેગ્નેટનું અસ્તિત્વ છે, જેને સુપર કંડક્ટર્સ કહે છે. આ બહુ નીચા તાપમાનોએ રહેલી ધાતુઓ છે. આ કિસ્સામાં $\chi = -1$, $\mu_r = 0$, $\mu = 0$. બાહ્ય ચુંબકીયક્ષેત્ર સંપૂર્ણ રીતે બહાર ધકેલાય છે. રસપ્રદ વાત એ છે કે આ પદાર્થ સંપૂર્ણ વાહક છે. આમ છતાં કોઈ પ્રચલિત સિદ્ધાંત અસ્તિત્વમાં નથી કે જે આ બંને ગુણધર્મોને સાંકળતો હોય. બાર્ડીન, કુપર અને શ્રીફર (Bardeen, Copper and Schriffer (BCS Theory)) એ આપેલો ક્વોન્ટમ યંત્રશાસ્ત્રનો સિદ્ધાંત આ અસરોને સમજાવે છે. BCS સિદ્ધાંત 1957માં રજૂ કરવામાં આવ્યો હતો જેને 1970માં ભૌતિકવિજ્ઞાનના નૉબેલ પારિતોષિક દ્વારા સન્માન પ્રાપ્ત થયું હતું.
7. મેગ્નેટીક હિસ્ટરીસિસની ઘટના, પદાર્થોના તે જ પ્રકારના સ્થિતિસ્થાપક ગુણધર્મોને લગતી વર્તણૂંકને મળતી આવે છે. વિકૃતિ (સ્ટ્રેઇન) એ પ્રતિબળ (સ્ટ્રેસને) સપ્રમાણ ન પણ હોઇ શકે : અહીં, **H** અને **B** (કે **M**) રેખીય રીતે સંકળાયેલા નથી. પ્રતિબળ-વિકૃતિ (સ્ટ્રેસ-સ્ટ્રેઇન) વક્ર હિસ્ટરિસીસની ઘટના દર્શાવે છે અને તેના વડે ઘેરાયેલું ક્ષેત્રફળ એકમ કદ દીઠ ઊર્જાનો વ્યય દર્શાવે છે. તે જ પ્રકારનું અર્થઘટન B–H મેગ્નેટીક હીસ્ટરિસીસ વક્ર માટે આપી શકાય.
8. ડાયામેગ્નેટીઝમ સાર્વત્રિક છે. તે બધા પદાર્થોમાં હાજર હોય છે. પરંતુ જો પદાર્થ પેરા-કે ફેરોમેગ્નેટીક પ્રકારનો હોય તો તે નબળું અને પરખવું (Detect) અઘરું હોય છે.
9. આપણે પદાર્થોને ડાયામેગ્નેટીક, પેરામેગ્નેટીક અને ફેરોમેગ્નેટીક એમ વર્ગીકૃત કર્યા છે. આમ છતાં, બીજા અનેક પ્રકારના મેગ્નેટીક પદાર્થો પણ અસ્તિત્વ ધરાવે છે જેમકે ફેરોમેગ્નેટીક, એન્ટી-ફેરોમેગ્નેટીક, સ્પીન ગ્લાસ વગેરે, જેમના ગુણધર્મો વિચિત્ર અને ગહન (ગૂઢ) છે.

સ્વાધ્યાય

5.1 પૃથ્વીના ચુંબકત્વ અંગે નીચેના પ્રશ્નોના જવાબ આપો :

(a) સદિશને સંપૂર્ણ રીતે દર્શાવવા માટે ત્રણ રાશિઓ (મૂલ્યો)ની જરૂર પડે છે. પૃથ્વીના ચુંબકીયક્ષેત્રને દર્શાવવા રૂઢિગત રીતે વપરાતી ત્રણ સ્વતંત્ર રાશિઓના નામ આપો.

(b) દક્ષિણ ભારતમાં આવેલા એક સ્થળ પાસે ડીપ કોણ (નમનકોણ) લગભગ 18^{o} છે. બ્રિટનમાં ડીપ કોણ મોટો કે નાનો હશે ?

(c) જો તમે ઓસ્ટ્રેલિયાના મેલબોર્ન પાસે ચુંબકીય ક્ષેત્ર રેખાઓનો નકશો બનાવો તો શું ત્યાં આ રેખાઓ જમીનમાં જતી કે બહાર નીકળતી હશે ?

(d) ભૂચુંબકીય ઉત્તર કે દક્ષિણ ધ્રુવ પર જ ઉર્ધ્વ સમતલમાં મુક્ત રીતે ફરી શકતી ચુંબકીય સોય રાખીએ તો તે કઈ દિશામાં રહેશે ?

(e) એવું માનવામાં આવે છે કે પૃથ્વીનું ચુંબકીયક્ષેત્ર, તેના કેન્દ્ર પર મુકેલા 8×10^{22} J T^{-1} જેટલી મેગ્નેટીક મોમેન્ટ ધરાવતા ડાયપોલ વડે મળતા ક્ષેત્ર જેટલું છે. આ સંખ્યાના માપક્રમની કોઈ રીતે ખરાઈ (Check) કરો.

(f) ભૂવિજ્ઞાનીઓ દર્શાવે છે કે મુખ્ય ચુંબકીય N–S ધ્રુવો સિવાય, પૃથ્વીની સપાટી પર જુદી જુદી દિશામાં રહેલા બીજા બધા સ્થાનિક ધ્રુવો પણ અસ્તિત્વ ધરાવે છે. આવું કેવી રીતે શક્ય બને ?

5.2 નીચેના સવાલોના જવાબ આપો :

(a) અવકાશમાં જુદા જુદા બિંદુઓએ પૃથ્વીનું ચુંબકીયક્ષેત્ર જુદું જુદું હોય છે. શું તે સમય સાથે પણ બદલાય છે ? જો તેમ હોય, તો કયા સમય અંતરાલમાં તેમાં ગણના પાત્ર ફેરફાર થાય છે ?

(b) પૃથ્વીના કોર (ગર્ભ)માં લોખંડ (આયર્ન) છે તે જાણીએ છીએ. આમ છતાં ભૂસ્તરશાસ્ત્રીઓ તેને પૃથ્વીના ચુંબકીયક્ષેત્રનું ઉદ્‌ગમ માનતા નથી. શા માટે ?

(c) પૃથ્વીના કોરની બહારના વાહક વિસ્તારમાંના વિદ્યુતપ્રવાહો પૃથ્વીના ચુંબકીયક્ષેત્ર માટે જવાબદાર માનવામાં આવે છે. આ પ્રવાહોને જાળવી રાખવા કઈ 'બૅટરી' (એટલે કે ઊર્જા સ્રોત) હશે ?

(d) પૃથ્વીએ તેના ક્ષેત્રની દિશા 4થી 5 અબજ ($= 10^{9}$) વર્ષના તેના ઈતિહાસ દરમિયાન કેટલીય વખત ઉલટાવી હશે. ભૂસ્તરશાસ્ત્રીઓ પૃથ્વીના ક્ષેત્રના આવા દૂરના ભૂતકાળ વિશે કેવી રીતે જાણી શક્યા હશે ?

(e) પૃથ્વીનું ચુંબકીયક્ષેત્ર ઘણા લાંબા અંતરે (આશરે 30000 kmથી વધુ), તેના ડાયપોલ આકારથી ઘણું જુદું પડે છે. કયા કારણો આ ફેરફારો માટે જવાબદાર છે ?

(f) તારાઓ વચ્ચેના અવકાશમાં 10^{-12} Tના ક્રમનું ઘણું નબળુ ચુંબકીયક્ષેત્ર હોય છે. શું આ નબળુ ક્ષેત્ર કોઈ અર્થપૂર્ણ પરિણામ આપી શકે ? સમજાવો.

[**નોંધ :** સ્વાધ્યાય 5.2નો ઉદ્દેશ્ય ફક્ત તમારી ઉત્સુકતા વધારવાનો છે. ઉપરના ઘણા પ્રશ્નોના જવાબો કામચલાઉ અને અજ્ઞાત છે. જ્યાં શક્ય છે ત્યાં અંતમાં જવાબો આપ્યા છે. વધુ માહિતી માટે તમે ભૂચુંબકત્વના કોઈ સારા પુસ્તકનો અભ્યાસ કરી શકો.]

5.3 એક નાના ગજિયા ચુંબકને તેની અક્ષ, 0.25 Tના નિયમિત બાહ્ય ચુંબકીયક્ષેત્ર સાથે 30^{o} કોણ બનાવે તે રીતે મુકતાં તે 4.5×10^{-2} J જેટલું ટૉર્ક અનુભવે છે. ચુંબકની મેગ્નેટીક મોમેન્ટનું મૂલ્ય કેટલું હશે ?

5.4 મેગ્નેટીક મોમેન્ટ m = 0.32 J T^{-1} ધરાવતા નાના ગજિયા ચુંબકને 0.15 Tના નિયમિત ચુંબકીયક્ષેત્રમાં મુક્યો છે. જો ગજિયો ચુંબક આ ક્ષેત્રના સમતલમાં મુક્ત ભ્રમણ કરી શકે તેમ હોય તો તેની કઈ દિશામાંની ગોઠવણી,

(a) સ્થિર, અને

(b) અસ્થિર સંતુલન દર્શાવશે ? દરેક કિસ્સામાં આ ચુંબકની સ્થિતિઊર્જા કેટલી હશે ?

5.5 ખૂબ નજીક વીંટાળેલા 800 આંટા વાળા અને 2.5×10^{-4} m^2 આડછેદનું ક્ષેત્રફળ ધરાવતા સૉલેનોઇડમાંથી 3.0 A વિદ્યુતપ્રવાહ પસાર થાય છે. સૉલેનોઇડ કઇ રીતે ગજિયા ચુંબકની જેમ વર્તશે તે સમજાવો. તેની સાથે સંકળાયેલી મેગ્નેટીક મોમેન્ટ કેટલી હશે ?

5.6 સ્વાધ્યાય 5.5માં દર્શાવેલ સૉલેનોઇડ શિરોલંબ દિશામાં મુક્ત ભ્રમણ કરી શકે તેમ હોય અને સમક્ષિતિજ દિશામાં 0.25 T જેટલું નિયમિત ચુંબકીયક્ષેત્ર લગાડવામાં આવે, તો જ્યારે સૉલેનોઇડની અક્ષ, આપેલ ક્ષેત્ર સાથે 30^{o} કોણ બનાવતી હોય ત્યારે તેના પર કેટલું ટૉર્ક લાગતું હશે ?

5.7 મેગ્નેટીક મોમેન્ટ 1.5 J T^{-1} ધરાવતો એક ગજિયો ચુંબક નિયમિત ચુંબકીયક્ષેત્ર 0.22 T સાથે એક રેખસ્થ રહેલો છે.

(a) બાહ્ય ટૉર્ક દ્વારા કેટલું કાર્ય કરવું પડે કે જેથી તેની મેગ્નેટીક મોમેન્ટ (i) ક્ષેત્રની દિશામાં, (ii) ક્ષેત્રની દિશાથી વિરુદ્ધ, ગોઠવાય ?

(b) કિસ્સાઓ (i) અને (ii)માં ચુંબક પર લાગતું ટૉર્ક કેટલું હશે ?

5.8 2000 આંટા અને 1.6×10^{-4} m^2 જેટલું આડછેદનું ક્ષેત્રફળ ધરાવતા એક સૉલેનોઇડમાંથી 4.0 A વિદ્યુતપ્રવાહ પસાર થાય છે, અને તેને કેન્દ્રમાંથી એવી રીતે લટકાવેલ છે કે જેથી તે સમક્ષિતિજ સમતલમાં ભ્રમણ કરી શકે.

(a) સૉલેનોઇડ સાથે સંકળાયેલી મેગ્નેટીક મોમેન્ટ કેટલી હશે ?

(b) જો સૉલેનોઇડની અક્ષ સાથે 30^{o} કોણ બનાવતી દિશામાં 7.5×10^{-2} T જેટલું નિયમિત સમક્ષિતિજ ચુંબકીયક્ષેત્ર ઉત્પન્ન કરવામાં આવે તો સૉલેનોઇડ પર લાગતા બળ અને ટૉર્કના મૂલ્ય કેટલા હશે ?

5.9 16 આંટા અને 10 cm ત્રિજ્યા ધરાવતું એક વર્તુળાકાર ગૂંચળુ 0.75 A વિદ્યુતપ્રવાહ ધરાવે છે અને 5.0×10^{-2} T મૂલ્ય ધરાવતા બાહ્ય ચુંબકીયક્ષેત્રને લંબરૂપે સ્થિર રહેલું છે. ક્ષેત્રની દિશાને લંબ અને ગૂંચળાના સમતલમાં રહેલી અક્ષને અનુલક્ષીને ગૂંચળુ મુક્ત ભ્રમણ કરી શકે છે. જ્યારે ગૂંચળાને થોડુંક ઘુમાવીને છોડી દેવામાં આવે, ત્યારે તે તેની સ્થિર સંતુલિત સ્થિતિની આસપાસ 2.0 s^{-1} આવૃત્તિથી આંદોલન કરે છે. ગૂંચળાની તેની ભ્રમણ અક્ષને અનુલક્ષીને જડત્વની ચાકમાત્રા કેટલી હશે ?

5.10 મેગ્નેટીક મેરીડીયનને સમાંતર ઉર્ધ્વ સમતલમાં મુક્ત ભ્રમણ કરી શકે તેવી એક ચુંબકીય સોયની અણી સમક્ષિતિજ સાથે નીચે તરફ 22^{o} કોણ બનાવતી દિશામાં છે. આ સ્થળે પૃથ્વીના ચુંબકીયક્ષેત્રનો સમક્ષિતિજ ઘટક 0.35 G જેટલો આપેલ છે. આ સ્થળે પૃથ્વીના ચુંબકીયક્ષેત્રનું માન શોધો.

5.11 આફ્રિકામાં કોઇ સ્થળે, ચુંબકીય કંપાસ ભૌગોલિક ઉત્તરથી 12^{o} પશ્ચિમ તરફ (દિશા) દર્શાવે છે. નમન વર્તુળની (ડીપ દર્શાવતી) ચુંબકીય સોયના ઉત્તરધ્રુવની અણીને મેગ્નેટીક મેરીડીયનના સમતલમાં રાખતાં તે સમક્ષિતિજ સાથે ઉત્તર તરફ 60^{o} કોણ દર્શાવે છે. પૃથ્વીના ક્ષેત્રનો સમક્ષિતિજ ઘટક આ સ્થળે 0.16 G છે. આ સ્થળે પૃથ્વીના (ચુંબકીય) ક્ષેત્રની દિશા અને મૂલ્ય દર્શાવો.

5.12 એક નાના ગજિયા ચુંબકની મેગ્નેટીક મોમેન્ટ 0.48 J T^{-1} છે. ચુંબકના કેન્દ્રથી 10 cm અંતરે

(a) ચુંબકની અક્ષ પર,

(b) તેની વિષુવરેખા (લંબ દ્વિભાજક) પર, ચુંબક વડે ઉત્પન્ન થયેલા ચુંબકીયક્ષેત્રની દિશા અને મૂલ્ય શોધો.

5.13 સમક્ષિતિજ સમતલમાં મુકેલા એક નાના ગજિયા ચુંબકની અક્ષ ચુંબકીય ઉત્તર-દક્ષિણ દિશા સાથે એક રેખસ્થ છે. ચુંબકની અક્ષ પર તેના કેન્દ્રથી 14 cm અંતરે તટસ્થ બિંદુઓ (Null Points) મળે છે. આ સ્થળે પૃથ્વીનું ચુંબકીયક્ષેત્ર 0.36 G છે અને ડીપ કોણ શૂન્ય છે. ચુંબકના કેન્દ્રથી તેના લંબ દ્વિભાજક પર આટલા જ અંતરે (એટલે કે, 14 cm) કુલ ચુંબકીયક્ષેત્રનું મૂલ્ય કેટલું હશે ? (તટસ્થ બિંદુએ ચુંબક વડે ઉદ્ભવતું ચુંબકીયક્ષેત્ર પૃથ્વીના ચુંબકીયક્ષેત્રના સમક્ષિતિજ ઘટક જેટલું જ અને વિરુદ્ધ દિશામાં હોય છે.)

5.14 જો સ્વાધ્યાય 5.13ના ગજિયા ચુંબકને 180^{o} જેટલો ઘુમાવવામાં આવે તો હવે નવા તટસ્થ બિંદુઓ ક્યાં (કેટલા અંતરે) મળશે ?

5.15 5.25×10^{-2} J T^{-1} મેગ્નેટીક મોમેન્ટ ધરાવતા નાના ગજિયા ચુંબકને તેની અક્ષ પૃથ્વીના ચુંબકીયક્ષેત્રની દિશાને લંબ રહે તે રીતે રાખવામાં આવ્યો છે. ચુંબકના કેન્દ્રથી

(a) તેના લંબ દ્વિભાજક પર, અને

(b) તેની અક્ષ પર, કેટલા અંતરે પરિણામી ક્ષેત્ર પૃથ્વીના ચુંબકીયક્ષેત્ર સાથે 45° કોણ બનાવતું હશે ? આ સ્થળે પૃથ્વીનું ચુંબકીયક્ષેત્ર 0.42 G છે. અહીં ગણતરીમાં આવતા અંતરોની સરખામણીમાં ચુંબકની લંબાઇ અવગણો.

વધારાના સ્વાધ્યાય

5.16 નીચેના પ્રશ્નોના જવાબ આપો :

(a) જ્યારે પેરામેગ્નેટીક પદાર્થને ઠંડો પાડવામાં આવે ત્યારે (તે જ ચુંબકીયક્ષેત્ર માટે) શા માટે તે વધુ મેગ્નેટાઇઝેશન દર્શાવે છે ?

(b) તેથી વિરુદ્ધ, શા માટે ડાયામેગ્નેટીઝમ તાપમાનથી લગભગ સ્વતંત્ર છે ?

(c) જો ટૉરોઇડના કોર (ગર્ભ) માટે બિસ્મથનો ઉપયોગ કરવામાં આવે તો આ કોરમાં ચુંબકીયક્ષેત્ર, ખાલી કોરની સરખામણીમાં (થોડુંક) વધારે કે (થોડુંક) ઓછું હશે ?

(d) શું ફેરોમેગ્નેટીક પદાર્થની પરમિએબિલિટી (પારગમ્યતા) ચુંબકીય ક્ષેત્રથી સ્વતંત્ર છે ? જો ના, તો ઓછા કે વધારે કયા ક્ષેત્ર માટે તે વધુ હોય છે ?

(e) ચુંબકીયક્ષેત્ર રેખાઓ હંમેશાં ફેરોમેગ્નેટની સપાટી પર દરેક બિંદુએ લંબરૂપે હોય છે. [આ હકીકત સ્થિત વિદ્યુતક્ષેત્રરેખાઓ સાથે સામ્યતા ધરાવે છે જે દરેક બિંદુએ વાહકની સપાટીને લંબરૂપે હોય છે.] શા માટે ?

(f) શું પેરામેગ્નેટીક પદાર્થના મહત્તમ શક્ય મેગ્નેટાઇઝેશનનું મૂલ્ય ફેરોમેગ્નેટીક પદાર્થના મહત્તમ મેગ્નેટાઇઝેશન જેટલા માનના ક્રમનું હોય છે ?

5.17 નીચેના પ્રશ્નોના જવાબ આપો :

(a) ફેરોમેગ્નેટના મેગ્નેટાઇઝેશન વક્રમાં અપ્રતિવર્તીપણું ડોમેઇન ચિત્રના આધારે ગુણાત્મક રીતે સમજાવો.

(b) નરમ લોખંડના ટુકડાના હિસ્ટરીસીસ લૂપનું ક્ષેત્રફળ તેટલા જ કાર્બન સ્ટીલના ટુકડા કરતાં ઘણું નાનું હોય છે. જો આ પદાર્થને મેગ્નેટાઇઝેશનના ચક્રમાંથી વારે ઘડીએ પસાર કરવામાં આવે તો કયો ટુકડો વધુ ઉષ્મા ઊર્જાનો વ્યય (Dissipate) કરશે ?

(c) ‘હિસ્ટરીસીસ લૂપ દર્શાવતું ફેરોમેગ્નેટ જેવું તંત્ર, એ મેમરી (સ્મૃતિ) સંગ્રહ કરવાનું સાધન છે’ આ વિધાનનો અર્થ સમજાવો.

(d) કેસેટ પ્લેયરની મેગ્નેટીક ટેપના કોટીંગ (આવરણ) માટે, કે આધુનિક કૉમ્પ્યુટરના મેમરી (સ્મતિ) સંગ્રહ માટે કયા પ્રકારના ફેરોમેગ્નેટીક પદાર્થ વપરાય છે ?

(e) અવકાશના અમુક વિસ્તારને મેગ્નેટીક ક્ષેત્રથી અલગ (Shield) કરવો છે. કોઇ પદ્ધતિ જણાવો.

5.18 એક લાંબો સીધો તાર પશ્ચિમથી દક્ષિણ તરફ 10°થી, પૂર્વથી ઉત્તર તરફ 10°ની દિશામાં 2.5 A વિદ્યુતપ્રવાહનું વહન કરે છે. આ સ્થળે મેગ્નેટીક મેરીડીયન ભૌગોલિક મેરીડીયનથી 10° પશ્ચિમ તરફ છે. આ સ્થળે પૃથ્વીનું ચુંબકીયક્ષેત્ર 0.33 G છે, અને ડીપ કોણ શૂન્ય છે. તટસ્થ બિંદુઓ (Neutral Point) દર્શાવતી રેખાનું સ્થાન શોધો. (તારની જાડાઇ અવગણો) ? [તટસ્થ બિંદુઓએ, વિદ્યુતપ્રવાહ ધારિત તાર વડે ઉદ્ભવતું ચુંબકીયક્ષેત્ર પૃથ્વીના ચુંબકીયક્ષેત્રના સમક્ષિતિજ ઘટક જેટલું જ અને વિરુદ્ધ દિશામાં હોય છે.]

5.19 એક સ્થળે આવેલ ટેલીફોનના કેબલમાં ચાર લાંબા સીધા અને સમક્ષિતિજ તાર જે (દરેક)માંથી એક જ દિશામાં 1.0 A વિદ્યુતપ્રવાહ પૂર્વથી પશ્ચિમ વહે છે. આ સ્થળે પૃથ્વીનું ચુંબકીયક્ષેત્ર 0.39 G છે, અને ડીપ કોણ 35^o છે. મેગ્નેટીક ડેકિલનેશન લગભગ શૂન્ય છે. આ કેબલની નીચે 4.0 cm અંતરે પરિણામી ચુંબકીયક્ષેત્રના મૂલ્ય કેટલા હશે ?

5.20 સમક્ષિતિજ સમતલમાં મુક્ત રીતે ભ્રમણ કરી શકે તેવી ચુંબકીય સોયના કંપાસને 30 આંટા અને 12 cm ત્રિજ્યા ધરાવતા વર્તુળાકાર ગૂંચળાની મધ્યમાં મૂકેલ છે. આ ગુંચળુ શિરોલંબ સમતલમાં મેગ્નેટીક મેરીડિયન સાથે 45^o કોણ બનાવતી દિશામાં રાખેલું છે. જ્યારે ગૂંચળામાં પસાર થતો વિદ્યુતપ્રવાહ 0.35 A હોય, ત્યારે આ સોય પશ્ચિમથી પૂર્વ તરફ રહે છે.

(a) આ સ્થળે પૃથ્વીના ચુંબકીયક્ષેત્રનો સમક્ષિતિજ ઘટક શોધો.

(b) ગૂંચળામાં વહેતો પ્રવાહ ઉલટાવવામાં આવે છે અને ગૂંચળાને શિરોલંબ અક્ષની સાપેક્ષે ઉપરથી જોતાં વિષમ ઘડી દિશામાં 90^o કોણે ઘુમાવવામાં આવે છે. ચુંબકીય સોયની દિશા શોધો. આ સ્થળે મેગ્નેટીક ડેક્લિનેશન શૂન્ય ધારો.

5.21 એક મેગ્નેટીક ડાયપોલ બે ચુંબકીયક્ષેત્રોની અસર હેઠળ રહેલો છે. આ ક્ષેત્રોની રેખાઓ વચ્ચેનો કોણ 60^o છે અને તેમાંથી એક ક્ષેત્રનું મૂલ્ય 1.2×10^{-2} T છે. જો ડાયપોલ આ ક્ષેત્ર સાથે 15^o કોણ બનાવતી દિશામાં સ્થિર સંતુલનમાં આવે, તો બીજા ક્ષેત્રનું મૂલ્ય કેટલું હશે ?

5.22 સમક્ષિતિજ દિશામાં ગતિ કરતો અને એક સરખી ઊર્જા (18 keV – Monoenergetic) ધરાવતો ઇલેક્ટ્રૉન બીમ (કિરણપૂંજ) તેની (ગતિની) દિશાને લંબરૂપે સમક્ષિતિજ સમતલમાં 0.04 G જેટલું ચુંબકીયક્ષેત્ર અનુભવે છે. 30 cm પછી આ બીમનું ઉપર કે નીચે તરફનું કોણાવર્તન શોધો ($m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ gm). [નોંધ : આ સ્વાધ્યાયના મૂલ્યો, એ ધ્યાનમાં રાખીને આપવામાં આવ્યા છે કે તમને TVમાં ઇલેક્ટ્રૉન ગનમાંથી ઉત્સર્જીત થઇને તેના સ્ક્રિન પર આપાત થતા ઇલેક્ટ્રૉન પર થતી પૃથ્વીના ચુંબકીયક્ષેત્રની અસર સમજાવે]

5.23 પેરામેગ્નેટીક મીઠા (Salt)નો એક ટુકડો 2.0×10^{24} પરમાણ્વીક ડાયપોલ ધરાવે છે. જે દરેકની ડાયપોલ મોમેન્ટ 1.5×10^{-23} J T^{-1} છે. આ ટુકડાને 0.64 T જેટલા નિયમિત (સમાંગ) ચુંબકીયક્ષેત્રમાં મુકેલો છે અને તેને 4.2 K સુધી ઠંડો પાડવામાં આવે છે. તેમાં 15 % જેટલું મેગ્નેટીક સેચ્યુરેશન (સંતૃપ્તતા) મળે છે. 2.8 K તાપમાને 0.98 T જેટલા ચુંબકીયક્ષેત્ર માટે આ ટુકડાની કુલ ડાયપોલ મોમેન્ટ કેટલી હશે ? (ક્યુરીનો નિયમ ધારો)

5.24 15 cm જેટલી સરેરાશ ત્રિજ્યાની રોલેન્ડ (Rowland) રીંગના, 800 જેટલી સાપેક્ષ પરમિએબિલીટી ધરાવતા કોર પર તારના 3500 આંટા વિંટાળવામાં આવેલ છે. 1.2 A જેટલા મેગ્નેટાઇઝીંગ વિદ્યુતપ્રવાહ માટે કોરમાં ચુંબકીયક્ષેત્ર B કેટલું હશે ?

5.25 એક ઇલેક્ટ્રૉનના સ્પિન કોણીય વેગમાન S અને કક્ષિય (Orbital) કોણીય વેગમાન l સાથે સંકળાયેલા મેગ્નેટીક મોમેન્ટ સદિશો અનુક્રમે μ_s અને μ_l ક્વૉન્ટમ સિદ્ધાંત દ્વારા અનુમાનીત કરાય છે (અને પ્રાયોગિક રીતે ઊંચી ચોકસાઈથી ચકાસેલ પણ છે) જેમના સૂત્રો આ મુજબ છે :

$\mu_s = -(e/m)\mathbf{S}$,

$\mu_l = -(e/2m)\boldsymbol{l}$

આ બેમાંથી કયું પરિણામ પ્રચલિત ભૌતિકશાસ્ત્ર મુજબ ધારેલ પરિણામને મળતું આવે છે ? પ્રચલિત યંત્રશાસ્ત્રનું પરિણામ સાધિત કરો.

પ્રકરણ ૬

વિદ્યુતચુંબકીય પ્રેરણ (ELECTROMAGNETIC INDUCTION)

6.1 પ્રસ્તાવના (INTRODUCTION)

વિદ્યુત અને ચુંબકત્વને ઘણા લાંબા સમય સુધી અલગ-અલગ અને એકબીજા સાથે સંબંધિત નહોય તેવી ઘટનાઓ ગણવામાં આવતી હતી. ઓગણીસમી સદીના પ્રારંભિક દાયકામાં, ઓર્સ્ટેડ, ઍમ્પિયર અને અન્ય કેટલીક વ્યક્તિઓએ વિદ્યુતપ્રવાહ પરના પ્રયોગો દ્વારા એ હકીકત પ્રસ્થાપિત કરી કે વિદ્યુત અને ચુંબકત્વ આંતર-સંબંધી છે. તેમણે શોધી કાઢ્યું કે ગતિમાન વિદ્યુતભારોને લીધે ચુંબકીયક્ષેત્રો ઉત્પન્ન થાય છે. ઉદાહરણ તરીકે, વિદ્યુતપ્રવાહ તેની નજીકમાં મૂકવામાં આવેલ હોકાયંત્રની ચુંબકીય સોયમાં કોણાવર્તન ઉત્પન્ન કરે છે. કુદરતી રીતે જ આ ઘટના કેટલાક પ્રશ્નો ઊભા કરે છે જેવાકે : શું આનાથી ઊલટી પ્રક્રિયા શક્ય છે ? શું ગતિમાન ચુંબકો વિદ્યુતપ્રવાહ ઉત્પન્ન કરી શકે છે ? શું કુદરત (પ્રકૃતિ) વિદ્યુત અને ચુંબકત્વ વચ્ચેના આવા સંબંધને મંજૂરી આપે છે ? જવાબ હા છે ! 1830ની આસપાસ ઇંગ્લેન્ડમાં માઇકલ ફેરેડે અને USAમાં જોસેફ હેનરી દ્વારા કરવામાં આવેલા પ્રયોગોએ દર્શાવ્યું કે બદલાતા ચુંબકીયક્ષેત્રોની અસર નીચે બંધ ગૂંચળાઓમાં વિદ્યુતપ્રવાહ પ્રેરિત થાય છે. આ પ્રકરણમાં, આપણે બદલાતાં ચુંબકીયક્ષેત્રો સાથે સંકળાયેલ ઘટનાઓનો અભ્યાસ કરીશું અને અંતર્ગત સિદ્ધાંતોને સમજીશું. એ ઘટના કે જેમાં બદલાતાં ચુંબકીયક્ષેત્રો દ્વારા વિદ્યુતપ્રવાહ ઉત્પન્ન થાય છે તેને યોગ્ય રીતે વિદ્યુતચુંબકીય પ્રેરણ (Electromagnetic Induction) કહે છે.

જ્યારે ફેરેડેએ સૌ પ્રથમ તેમની શોધ જાહેર કરી કે ગજિયો ચુંબક અને વાયર લૂપ (તારનો બંધ ગાળો) વચ્ચેની સાપેક્ષ ગતિ એ બંધ ગાળામાં સૂક્ષ્મ વિદ્યુતપ્રવાહ ઉત્પન્ન કરે છે, ત્યારે તેમને પૂછવામાં આવ્યું કે, ‘‘આનો ઉપયોગ શું છે ?’’ તેમનો જવાબ હતો : ‘‘કોઈ નવજાત શિશુનો ઉપયોગ શું છે ?’’ વિદ્યુતચુંબકીય પ્રેરણની ઘટના માત્ર સૈદ્ધાંતિક અથવા શૈક્ષણિક રસ ધરાવવા પૂરતી નથી પરંતુ તેની

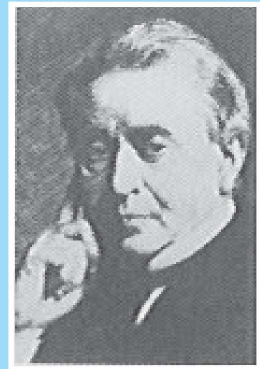
વ્યાવહારિક ઉપયોગીતા પણ છે. એવા વિશ્વની કલ્પના કરો કે જ્યાં વીજળી નથી - ના કોઈ વિદ્યુત પ્રકાશ, ના કોઈ ટ્રેન, ના કોઈ ટેલિફોન અને ના કોઈ પર્સનલ કમ્પ્યૂટર. ફેરેડે અને હેન્રીના પ્રારંભિક પ્રયોગોનો આધુનિક સમયના જનરેટર્સ અને ટ્રાન્સફોર્મર્સના વિકાસમાં સીધો જ ફાળો રહ્યો છે. આજની સભ્યતાની પ્રગતિમાં વિદ્યુતચુંબકીય પ્રેરણની શોધનો મહત્ત્વનો ફાળો છે.

6.2 ફેરેડે અને હેન્રીના પ્રયોગો (The Experiments of Faraday and Henry)

વિદ્યુતચુંબકીય પ્રેરણની શોધ અને સમજ ફેરેડે અને હેન્રી દ્વારા કરવામાં આવેલ શ્રેણીબદ્ધ પ્રયોગો પર આધારિત છે. હવે આપણે આમાંના કેટલાક પ્રયોગોનું વર્ણન કરીશું.

પ્રયોગ 6.1

આકૃતિ 6.1 દર્શાવે છે કે, એક ગૂંચળું C_1* ગૅલ્વેનોમીટર G સાથે જોડાયેલ છે. જ્યારે ગજિયા ચુંબકનો ઉત્તરધ્રુવ ગૂંચળા તરફ ધકેલાય છે, ત્યારે ગૅલ્વેનોમીટરમાં દર્શકનું કોણાવર્તન થાય છે, જે ગૂંચળામાં વિદ્યુતપ્રવાહની હાજરી સૂચવે છે. આ કોણાવર્તન જ્યાં સુધી ગજિયો ચુંબક ગતિમાં હોય ત્યાં સુધી જ રહે છે. જ્યારે ચુંબકને સ્થિર રાખવામાં આવે ત્યારે ગૅલ્વેનોમીટર કોઈ પણ કોણાવર્તન બતાવતું નથી. જ્યારે ચુંબકને ગૂંચળાથી દૂર લઈ જવામાં આવે છે, ત્યારે ગૅલ્વેનોમીટર વિરુદ્ધ દિશામાં કોણાવર્તન દર્શાવે છે, જે પ્રવાહની દિશા ઊલટાઈ હોવાનું સૂચવે છે. વધુમાં જ્યારે ગજિયા ચુંબકનો દક્ષિણધ્રુવ ગૂંચળાની નજીક કે દૂર લઈ જવામાં આવે છે ત્યારે ગૅલ્વેનોમીટરમાં મળતાં કોણાવર્તનો ઉત્તરધ્રુવના કિસ્સામાં તેવી જ ગતિ માટે મળતાં અનુરૂપ કોણાવર્તનોની વિરુદ્ધ દિશાના હોય છે. વધુમાં, જ્યારે ચુંબકને ઝડપથી ગૂંચળા તરફ કે તેનાથી દૂર લઈ જવામાં આવે છે, ત્યારે આ કોણાવર્તન (અને તેથી પ્રવાહ) વધુ જોવા મળે છે. આનાથી વિરુદ્ધ જ્યારે ગજિયા-ચુંબકને સ્થિર રાખવામાં આવે છે અને ગૂંચળા C_1ને ચુંબક તરફ અથવા દૂર ખસેડવામાં આવે છે, ત્યારે પણ પહેલા જેવી જ સમાન અસરો જોવા મળે છે. આ દર્શાવે છે કે *ચુંબક અને ગૂંચળા વચ્ચેની સાપેક્ષ ગતિ એ ગૂંચળામાં વિદ્યુતપ્રવાહના ઉત્પાદન (પ્રેરણ) માટે જવાબદાર છે.*

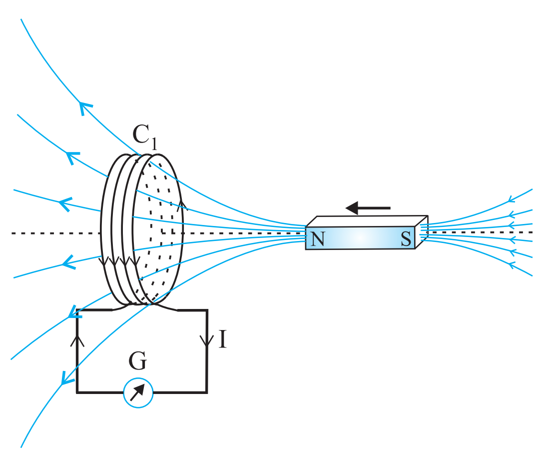


જોશેફ હેન્રી [1797-1878] અમેરીકન પ્રાયોગિક ભૌતિકશાસ્ત્રી, પ્રિન્સટન યુનિવર્સિટીના પ્રોફેસર અને સ્મિથસોનિયન ઇન્સ્ટિટ્યુશનના પ્રથમ ડિરેક્ટર, તેમણે લોખંડના ધ્રુવોની આસપાસ અવાહક તારના ગૂંચળાને વીંટાળીને વિદ્યુતચુંબક (Electromagnet)માં સુધારો કર્યો અને વિદ્યુતચુંબકીય (Electromagnetic) મોટરની શોધ કરી તેમજ નવા, કાર્યક્ષમ ટેલિગ્રાફની શોધ કરી. તેમણે આત્મ-પ્રેરણ (Self-Induction)ની શોધ કરી અને શોધ્યું કે કેવી રીતે એક પરિપથ (Circuit)માંના પ્રવાહો બીજા (પરિપથ)માં પ્રવાહો પ્રેરિત કરે છે.

જોસેફ હેન્રી (1797-1878)

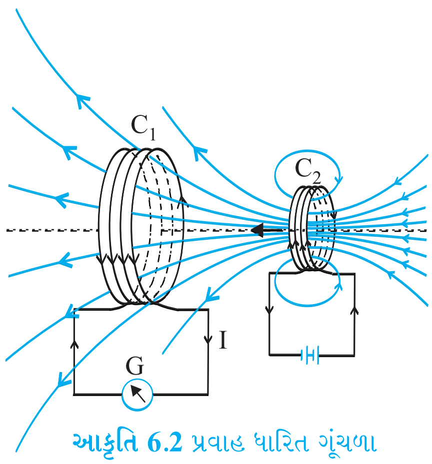
પ્રયોગ 6.2

આકૃતિ 6.2માં ગજિયા ચુંબકને સ્થાને બૅટરી સાથે જોડાયેલ એક બીજા ગૂંચળા C_2ને મૂકવામાં આવે છે. ગૂંચળા C_2માંનો સ્થિર પ્રવાહ સ્થિર ચુંબકીયક્ષેત્ર પેદા કરે છે. ગૂંચળા C_2ને જ્યારે ગૂંચળા C_1 તરફ લઈ જઈએ, ત્યારે ગૅલ્વેનોમીટર કોણાવર્તન દર્શાવે છે. આ સૂચવે છે કે ગૂંચળા C_1માં વિદ્યુતપ્રવાહ પ્રેરિત થાય છે. જ્યારે C_2ને દૂર ખસેડવામાં આવે છે ત્યારે ગૅલ્વેનોમીટર ફરી કોણાવર્તન દર્શાવે છે, પરંતુ આ વખતે તે વિરુદ્ધ દિશામાં છે. જ્યાં સુધી ગૂંચળૂ C_2 ગતિમાં હોય ત્યાં સુધી જ આ કોણાવર્તન રહે છે. જ્યારે ગૂંચળા C_2ને સ્થિર રાખવામાં આવે છે અને C_1ને ખસેડવામાં આવે છે ત્યારે પણ સમાન અસરો જોવા મળે છે. આમ અહીં પણ, *આ*



આકૃતિ 6.1 જ્યારે ગજિયો ચુંબક ગૂંચળા તરફ ધકેલવામાં આવે છે ત્યારે ગૅલ્વેનોમીટર Gનો દર્શક કોણાવર્તન પામે છે.

* જ્યાં પણ 'ગૂંચળા' અથવા 'લૂપ' શબ્દનો ઉપયોગ કરવામાં આવે છે ત્યાં તેવું ધારવામાં આવે છે કે તે વાહક દ્રવ્યનું બનેલું છે અને તેને અવાહક દ્રવ્યના આવરણ ધરાવતાં તારનો ઉપયોગ કરીને તૈયાર કરવામાં આવેલ છે.



આકૃતિ 6.2 પ્રવાહ ધારિત ગૂંચળા C_2ની ગતિને કારણે ગૂંચળા C_1માં પ્રવાહ પ્રેરિત થાય છે.

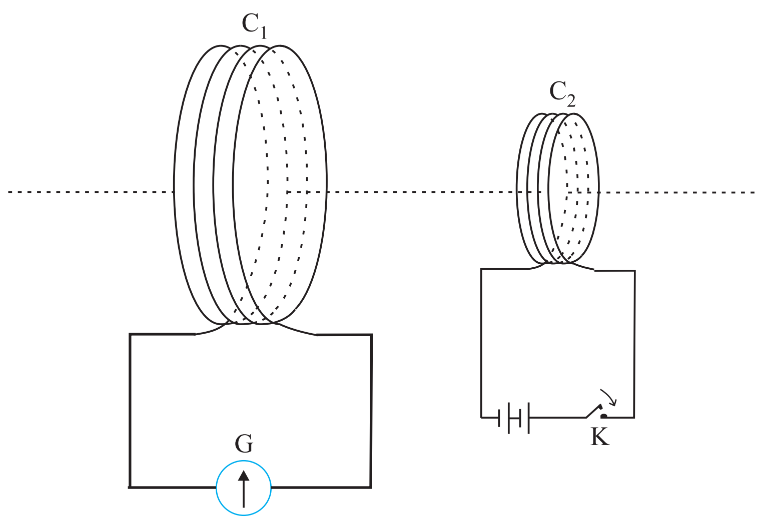
ગૂંચળાઓ વચ્ચેની જે સાપેક્ષ ગતિ છે તે જ વિદ્યુતપ્રવાહને પ્રેરિત કરે છે.

પ્રયોગ 6.3

ઉપરોક્ત બંને પ્રયોગો અનુક્રમે ચુંબક અને ગૂંચળા વચ્ચે અને બે ગૂંચળાઓ વચ્ચેની સાપેક્ષ ગતિનો સમાવેશ કરે છે. ફેરેડેએ અન્ય એક પ્રયોગ દ્વારા દર્શાવ્યું હતું કે આ સાપેક્ષ ગતિ એ અનિવાર્ય જરૂરિયાત નથી. આકૃતિ 6.3 એ સ્થિર રાખેલ બે ગૂંચળાઓ C_1 અને C_2ને દર્શાવે છે. ગૂંચળુ C_1 ગૅલ્વેનોમીટર G સાથે જોડાયેલ છે જ્યારે બીજુ ગૂંચળુ C_2 ટેપીંગ કી (દાબ-કળ) K દ્વારા બૅટરી સાથે જોડાયેલ છે.

એવું જોવા મળ્યું કે, જ્યારે ટેપિંગ કી K દબાવવામાં આવે ત્યારે ગૅલ્વેનોમીટર ક્ષણિક કોણાવર્તન દર્શાવે છે અને ત્યારબાદ ગૅલ્વેનોમીટરમાં દર્શક તરત જ શૂન્ય પર આવી જાય છે.

Interactive animation on Faraday's experiments and Lenz's law :
http://micro.magnet. fsu.edu/electromag/java/faraday/index.html



આકૃતિ 6.3 પ્રયોગ 6.3 માટેની પ્રાયોગિક ગોઠવણી

જો કળ સતત દબાવી રાખવામાં આવે, તો ગૅલ્વેનોમીટરમાં કોઈ કોણાવર્તન થતું નથી. જ્યારે આ કળ મુક્ત કરવામાં આવે છે, ત્યારે ફરીથી, પરંતુ વિરુદ્ધ દિશામાં ક્ષણિક કોણાવર્તન જોવા મળે છે. એવું પણ જોવા મળ્યું કે જ્યારે ગૂંચળાઓમાં તેઓની ધરી પર લોખંડનો એક સળિયો મૂકવામાં આવે છે ત્યારે કોણાવર્તન અકલ્પનિય (નાટ્યાત્મક) રીતે વધે છે.

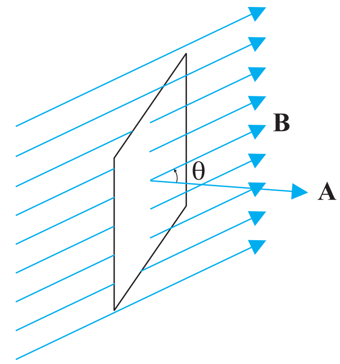
6.3 ચુંબકીય ફ્લક્સ (MAGNETIC FLUX)

PHYSICS

વિદ્યુતચુંબકીય પ્રેરણ પર હાથ ધરવામાં આવેલા શ્રેણીબદ્ધ પ્રયોગોને સમજાવવા માટે એક સરળ ગાણિતિક સંબંધને શોધવામાં ફેરેડેની મોટી આંતરસૂઝ રહેલ છે. જો કે, આપણે તેમના નિયમોને લખીએ અને સચોટ સમજીએ તે પહેલાં, આપણે ચુંબકીય ફ્લક્સ, Φ_Bની સંકલ્પનાથી પરિચિત થવું જોઈએ. પ્રકરણ 1માં જેમ વિદ્યુત ફ્લક્સ વ્યાખ્યાયિત થયેલ છે તેવી જ રીતે ચુંબકીય ફ્લક્સને વ્યાખ્યાયિત

કરવામાં આવે છે. સમાન ચુંબકીયક્ષેત્ર **B** (આકૃતિ 6.4)માં મૂકવામાં આવેલા A ક્ષેત્રફળ ધરાવતા સમતલમાંથી પસાર થતું ચુંબકીય ફ્લક્સ નીચે પ્રમાણે લખી શકાય

$$\Phi_B = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} = BA\cos\theta \qquad (6.1)$$



આકૃતિ 6.4 સપાટીનું ક્ષેત્રફળ A હોય તેવા એક સમતલને એક સમાન ચુંબકીયક્ષેત્ર Bમાં મૂકવામાં આવેલ છે.

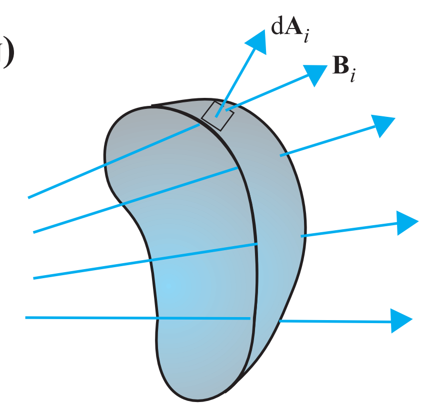
જ્યાં, θ એ **B** અને **A** વચ્ચેનો ખૂણો છે. ક્ષેત્રફળની એક સદિશ તરીકેની સંકલ્પનાને અગાઉ પ્રકરણ 1માં ચર્ચવામાં આવી છે. સમીકરણ (6.1)ને વક્ર સપાટી અને અનિયમિત ક્ષેત્રો માટે પણ વિસ્તારી શકાય છે.

આકૃતિ 6.5માં દર્શાવ્યા પ્રમાણે જો ચુંબકીયક્ષેત્રને સપાટી પરના વિવિધ ભાગોમાં અલગ અલગ માન અને દિશાઓ હોય, તો સપાટીમાંથી પસાર થતાં ચુંબકીય ફ્લક્સને

$$\Phi_B = \mathbf{B}_1 \cdot d\mathbf{A}_1 + \mathbf{B}_2 \cdot d\mathbf{A}_2 + \ldots = \sum_{all} \mathbf{B}_i \cdot d\mathbf{A}_i \qquad (6.2)$$

વડે આપવામાં આવે છે. જ્યાં, 'all' એ સપાટીના સમાવિષ્ટ તમામ પૃષ્ઠખંડ dA_i પરનો સરવાળો દર્શાવે છે અને $\mathbf{B}_i$ એ પૃષ્ઠખંડ $d\mathbf{A}_i$ પરનું ચુંબકીયક્ષેત્ર છે. ચુંબકીય ફ્લક્સનો SI એકમ વેબર (Wb) અથવા ટેસ્લા મીટર વર્ગ ($T\,m^2$) છે. ચુંબકીય ફ્લક્સ એ એક અદિશ રાશિ છે.

6.4 ફેરેડેનો પ્રેરણનો નિયમ (Faraday's Law of Induction)



આકૃતિ 6.5 *i* પૃષ્ઠખંડ પર ચુંબકીયક્ષેત્ર $\mathbf{B}_i$ છે. $d\mathbf{A}_i$ એ *i* પૃષ્ઠખંડનો ક્ષેત્રફળસદિશ દર્શાવે છે.

પ્રાયોગિક નિરીક્ષણો પરથી, ફેરેડે એવા નિષ્કર્ષ પર પહોંચ્યા હતા કે જ્યારે ગૂંચળા સાથે સંકળાયેલ ચુંબકીય ફ્લક્સ સમય સાથે બદલાય છે, ત્યારે ગૂંચળામાં *emf* પ્રેરિત થાય છે. આ ખ્યાલનો ઉપયોગ કરીને પરિચ્છેદ 6.2માંના પ્રાયોગિક અવલોકનોની ચર્ચા કરી શકાય છે.

પ્રયોગ 6.1માં ચુંબકની ગૂંચળા C_1 તરફની અથવા તેનાથી દૂરની ગતિ અને પ્રયોગ 6.2માં વિદ્યુતપ્રવાહ ધારિત ગૂંચળા C_2ની ગૂંચળા C_1 તરફની અથવા તેનાથી દૂરની ગતિ, ગૂંચળા C_1 સાથે સંકળાયેલ ચુંબકીય ફ્લક્સને બદલે છે. ચુંબકીય ફ્લક્સમાં આ ફેરફાર ગૂંચળા C_1માં *emf* ને પ્રેરિત કરે છે. આ એ પ્રેરિત *emf* છે, જે ગૂંચળા C_1 અને ગૅલ્વેનોમીટરમાં વિદ્યુતપ્રવાહ ઉત્પન્ન કરે છે. પ્રયોગ 6.3ના અવલોકનો માટે ખૂબ સરળ સમજૂતી નીચે પ્રમાણે છે : જ્યારે ટેપીંગ-કી K દબાવવામાં આવે છે, ત્યારે ગૂંચળા C_2 માં વિદ્યુતપ્રવાહ (અને પરિણામી ચુંબકીયક્ષેત્ર) ટૂંકા સમયગાળામાં શૂન્યથી મહત્તમ મૂલ્ય સુધી વધે છે. પરિણામે, પાડોશી ગૂંચળા C_1માં પણ ચુંબકીય ફ્લક્સ વધે છે. ગૂંચળા C_1નો આ ચુંબકીય ફ્લક્સનો તે ફેરફાર છે, જે ગૂંચળા C_1માં પ્રેરિત *emf* ઉત્પન્ન કરે છે. જ્યારે આ કળ દબાવી રાખવામાં આવે છે, ત્યારે ગૂંચળા C_2માં વિદ્યુતપ્રવાહ અચળ હોય છે તેથી, ગૂંચળા C_1માં ચુંબકીય ફ્લક્સમાં કોઈ ફેરફાર થતો નથી અને ગૂંચળા C_1માં વિદ્યુતપ્રવાહ શૂન્ય થશે. જ્યારે આ કળ છોડી દેવામાં આવે છે, ત્યારે ટૂંકા સમયગાળામાં C_2માં વિદ્યુતપ્રવાહ અને પરિણામી ચુંબકીયક્ષેત્ર મહત્તમ મૂલ્યમાંથી શૂન્ય સુધી ઘટે છે. જેના પરિણામે ગૂંચળા C_1 માં ચુંબકીય ફ્લક્સમાં ઘટાડો થાય છે અને તેથી ગૂંચળા C^*_1માં ફરીથી વિદ્યુતપ્રવાહ પ્રેરિત કરે છે. આ બધા નિરીક્ષણોમાં સામાન્ય મુદ્દો એ છે કે કોઈ પરિપથમાં ચુંબકીય ફ્લક્સના ફેરફારનો સમયદર તેમાં *emf* પ્રેરિત કરે છે. ફેરેડેએ આ પ્રયોગાત્મક અવલોકનોને *ફેરેડેના વિદ્યુતચુંબકીય પ્રેરણના નિયમ* તરીકે ઓળખાતા નિયમમાં રજૂ કરેલ છે. આ નિયમ નીચે દર્શાવેલ છે.

---

* નોંધો કે જ્યારે વિદ્યુતચુંબકને ચાલુ કે બંધ કરવામાં આવે છે, ત્યારે વિદ્યુતચુંબકની નજીકમાં રહેલ સંવેદનશીલ વિદ્યુત ઉપકરણોને પ્રેરિત *emf* (અને પરિણામી વિદ્યુતપ્રવાહ)ને કારણે નુકસાન થાય છે.

માઈકલ ફેરેડે (1791-1867)

માઈકલ ફેરેડે [1791-1867] ફેરેડેએ વિજ્ઞાનમાં સંખ્યાબંધ યોગદાન આપ્યા છે, જેમ કે, વિદ્યુતચુંબકીય પ્રેરણની શોધ, વિદ્યુત વિશ્લેષણના નિયમો, બેન્ઝીન અને એ હકીકત કે ધ્રુવીભૂત સમતલ વિદ્યુતક્ષેત્રમાં ઘૂર્ણન કરી શકે છે. ઈલેક્ટ્રિક મોટર, ઈલેક્ટ્રિક જનરેટર અને ટ્રાન્સફોર્મરની શોધનો પણ તેમને શ્રેય આપવામાં આવે છે. તેમને ઓગણીસમી સદીના સૌથી મહાન પ્રાયોગિક વૈજ્ઞાનિક તરીકે ઓળખવામાં આવે છે.

પરિપથમાં પ્રેરિત emf નું માન તે પરિપથમાંના ચુંબકીય ફ્લક્સના ફેરફારના સમય દર જેટલું હોય છે.

ગાણિતીક રીતે, આ પ્રેરિત *emf* ને

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} \tag{6.3}$$

દ્વારા આપવામાં આવે છે.

ઋણ ચિહ્‌ન εની દિશા અને તેથી બંધ લૂપમાં વિદ્યુતપ્રવાહની દિશા પણ સૂચવે છે. આ અંગે વિગતવાર ચર્ચા હવે પછીના પરિચ્છેદમાં કરીશું.

ખૂબજ નજીક વીંટાળેલ N આંટાઓ ધરાવતા ગૂંચળાના કિસ્સામાં, દરેક આંટા સાથે સંકળાયેલ ફ્લક્સનો ફેરફાર પણ એકસમાન છે. તેથી, કુલ પ્રેરિત *emf* ને

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi_B}{dt} \tag{6.4}$$

દ્વારા અભિવ્યક્ત કરવામાં આવે છે.

બંધ ગૂંચળાના આંટાઓની સંખ્યા Nમાં વધારો કરીને પ્રેરિત *emf* માં વધારો કરી શકાય છે.

સમીકરણો (6.1) અને (6.2) પરથી, આપણે જોઈ શકીએ છીએ કે **B**, **A** અને θ પદોમાંથી કોઈ પણ એક અથવા વધુ પદોને બદલીને ફ્લક્સમાં ફેરફાર કરી શકાય છે. પરિચ્છેદ 6.2માંના પ્રયોગો 6.1 અને 6.2માં, **B** માં ફેરફાર કરીને ફ્લક્સને બદલવામાં આવે છે. ચુંબકીયક્ષેત્રમાં રહેલ ગૂંચળાનું પરિમાણ બદલીને (એટલે કે તેને નાનું કે મોટું કરીને), અથવા ચુંબકીયક્ષેત્રમાં ગૂંચળાને **B** અને **A** વચ્ચેનો કોણ θ બદલાય તે રીતે ફેરવતા આ ફ્લક્સમાં ફેરફાર કરી શકાય છે. આ કિસ્સાઓમાં પણ, જે તે ગૂંચળાઓમાં emf પ્રેરિત થાય છે.

ઉદાહરણ 6.1

ઉદાહરણ 6.1 પ્રયોગ 6.2ને ધ્યાન પર લો. (a) ગૅલ્વેનોમીટરમાં મોટું કોણાવર્તન મેળવવા માટે તમે શું કરશો ? (b) ગૅલ્વેનોમીટરની ગેરહાજરીમાં તમે પ્રેરિત વિદ્યુતપ્રવાહની હાજરીને કેવી રીતે દર્શાવશો ?

ઉકેલ

(a) મોટું કોણાવર્તન મેળવવા માટે, નીચેનામાંથી એક કે તેથી વધુ પગલાં લઈ શકાય છે : (i) ગૂંચળા C_2ની અંદર નરમ લોખંડથી બનેલ સળિયાનો ઉપયોગ કરો, (ii) ગૂંચળાને શક્તિશાળી બૅટરી સાથે જોડો, અને (iii) આ ગોઠવણને પરિક્ષણ (Test) ગૂંચળા C_1 તરફ ઝડપથી ખસેડો.

(b) ગૅલ્વેનોમીટરને બદલે નાની ટોર્ચ લાઈટમાં હોય તેવો એક નાનો બલ્બ જોડો. બે ગૂંચળા વચ્ચેની સાપેક્ષ ગતિ બલ્બને પ્રકાશિત કરશે અને આમ પ્રેરિત વિદ્યુતપ્રવાહની હાજરી દર્શાવશે.

પ્રાયોગિક ભૌતિકશાસ્ત્રમાં, દરેકે નવીનતા લાવવાનું શીખવું જોઈએ. માઈકલ ફેરેડેને અત્યાર સુધીના શ્રેષ્ઠ પ્રયોગશાસ્ત્રી પૈકીના એક તરીકે ગણવામાં આવે છે કે જે તેમની નાવિન્ય સભર કુશળતા માટે સુપ્રસિદ્ધ હતા.

ઉદાહરણ 6.2

ઉદાહરણ 6.2 10 cm બાજુવાળી અને 0.5 Ω અવરોધ ધરાવતી એક ચોરસ લૂપ પૂર્વ-પશ્ચિમ સમતલમાં ઊભી મૂકવામાં આવેલ છે. 0.10 Tનું એક સમાન ચુંબકીયક્ષેત્ર સમતલ પર ઉત્તર-પૂર્વ દિશામાં લાગુ પાડેલ છે. આ ચુંબકીયક્ષેત્ર 0.70 સેકન્ડમાં અચળ દરે ઘટાડીને શૂન્ય કરવામાં આવે છે. આ સમય-અંતરાલ દરમિયાન પ્રેરિત *emf* અને વિદ્યુતપ્રવાહના માન શોધો.

ઉકેલ આ ચુંબકીયક્ષેત્ર સાથે ગૂંચળાના ક્ષેત્ર-સદિશ દ્વારા બનાવવામાં આવેલ કોણ 45° છે. સમીકરણ (6.1) પરથી, પ્રારંભિક ચુંબકીય ફ્લક્સ,

$$\Phi = BA\cos\theta$$
$$= \frac{0.1 \times 10^{-2}}{\sqrt{2}}\ Wb$$

અંતિમ ફ્લક્સ, $\Phi_{min} = 0$

ફ્લક્સમાં ફેરફાર 0.70 સેકન્ડમાં કરેલ છે. સમીકરણ (6.3) પરથી, પ્રેરિત *emf*નું માન

$$\varepsilon = \frac{|\Delta\Phi_B|}{\Delta t} = \frac{|(\Phi - 0)|}{\Delta t} = \frac{10^{-3}}{\sqrt{2}\times 0.7} = 1.0\ mV$$

અને વિદ્યુતપ્રવાહનું માન,

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{10^{-3}\ V}{0.5\Omega} = 2\ mA$$

નોંધો કે, પૃથ્વીનું ચુંબકીયક્ષેત્ર પણ લૂપમાં ફ્લક્સ ઉત્પન્ન કરે છે. પરંતુ તે એક સ્થિર ક્ષેત્ર છે (જે પ્રયોગના સમય ગાળામાં બદલાતું નથી) અને તેથી તે કોઈ પણ *emf* પ્રેરિત નહીં કરે.

ઉદાહરણ 6.2

ઉદાહરણ 6.3

10 cm ત્રિજ્યા, 500 આંટાઓ અને 2 Ω અવરોધ ધરાવતા એક ગોળાકાર ગૂંચળાને તેનું સમતલ પૃથ્વીના ચુંબકીયક્ષેત્રના સમક્ષિતિજ ઘટકને લંબ રહે તે રીતે મૂકવામાં આવે છે. તેને 0.25 sમાં તેના ઉર્ધ્વ વ્યાસને અનુલક્ષીને 180° ભ્રમણ કરાવવામાં આવે છે. આ ગૂંચળામાં પ્રેરિત *emf* અને વિદ્યુતપ્રવાહના માનનો અંદાજ લગાવો. આ સ્થળે પૃથ્વીના ચુંબકીયક્ષેત્રનો સમક્ષિતિજ ઘટક 3.0×10^{-5} T છે.

ઉકેલ ગૂંચળામાં પ્રારંભિક ફ્લક્સ,

$$\Phi_{B(initial)} = BA\cos\theta$$
$$= 3.0\times10^{-5}\times(\pi\times10^{-2})\times\cos 0^\circ$$
$$= 3\pi\times10^{-7}\ Wb$$

ભ્રમણ પછી અંતિમ ફ્લક્સ,

$$\Phi_{B(final)} = 3.0\times10^{-5}\times(\pi\times10^{-2})\times\cos 180^\circ$$
$$= -3\pi\times10^{-7}\ Wb$$

તેથી, પ્રેરિત *emf*નું અંદાજિત માન,

$$\varepsilon = N\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$$
$$= 500\times(6\pi\times10^{-7})/0.25$$
$$= 3.8\times10^{-3}\ V \text{ છે.}$$

$$I = \varepsilon/R = 1.9\times10^{-3}\ A$$

નોંધ કરો કે, ε અને Iના માનના મૂલ્યો અંદાજિત છે. તેમના તત્કાલિન મૂલ્યો અલગ છે અને ચોક્કસ સમયે તે પરિભ્રમણની ગતિ પર આધાર રાખે છે.

ઉદાહરણ 6.3

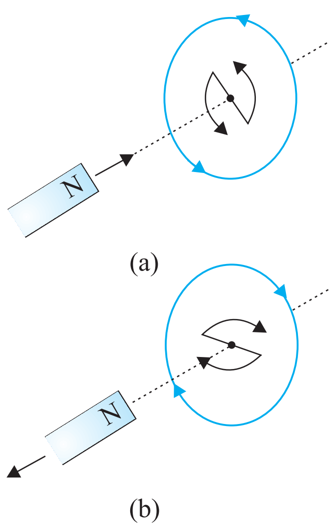
6.5 લેન્ઝનો નિયમ અને ઊર્જા સંરક્ષણ
(LENZ'S LAW AND CONSERVATION OF ENERGY)

1834માં, જર્મન ભૌતિક વિજ્ઞાની હેનરિચ ફ્રેડરિક લેન્ઝે (1804-1865) એક નિયમ તારવ્યો, જેને લેન્ઝના નિયમ તરીકે ઓળખવામાં આવે છે. જે સ્પષ્ટ અને સંક્ષિપ્ત સ્વરૂપમાં પ્રેરિત *emf*ની દિશા (સંજ્ઞા) આપે છે. આ નિયમનું કથન આ મુજબ છે :

પ્રેરિત emfની દિશા (સંજ્ઞા) એવી હોય છે કે તે એવો વિદ્યુતપ્રવાહ ઉત્પન્ન કરે કે જે તેને ઉત્પન્ન કરતા ચુંબકીય ફ્લક્સના ફેરફારનો વિરોધ કરે.

સમીકરણ (6.3)માં દર્શાવેલ ઋણ ચિહ્ન આ અસરને દર્શાવે છે. પરિચ્છેદ 6.2.1માં પ્રયોગ 6.1નું પરિક્ષણ કરીને આપણે લેન્ઝનો નિયમ સમજી શકીએ છીએ. આકૃતિ 6.1માં, આપણે જોયું કે ગજિયા ચુંબકનો ઉત્તર-ધ્રુવ બંધ ગૂંચળા તરફ ધકેલવામાં આવ્યો છે. જેમ જેમ ગજિયા ચુંબકનો ઉત્તર-ધ્રુવ ગૂંચળા તરફ જાય છે, તેમ ગૂંચળામાંનું ચુંબકીય ફ્લક્સ વધે છે. તેથી ગૂંચળામાં વિદ્યુતપ્રવાહ એવી દિશામાં પ્રેરિત થાય છે કે તે ફ્લક્સમાં થતા વધારાનો વિરોધ કરે છે. આ તો જ શક્ય છે, જો ચુંબકની બાજુમાં રહેલ નિરીક્ષકના સંદર્ભમાં, ગૂંચળામાં વિદ્યુતપ્રવાહ વિષમઘડી દિશામાં હોય. નોંધો કે આ વિદ્યુતપ્રવાહ સાથે સંકળાયેલ ચુંબકીય ચાકમાત્રાની ઉત્તર-ધ્રુવીયતા તેની નજીક જતાં ચુંબકના ઉત્તર-ધ્રુવ તરફ હોય છે. તેવી જ રીતે, જો ચુંબકના ઉત્તર-ધ્રુવને ગૂંચળાથી દૂર લઈ જવામાં આવે, તો ગૂંચળામાંનું ચુંબકીય ફ્લક્સ ઘટશે. ચુંબકીય ફ્લક્સમાં થતા આ ઘટાડાનો વિરોધ કરવા માટે, ગૂંચળામાં સમઘડી દિશામાં પ્રેરિત વિદ્યુતપ્રવાહ વહે છે અને તેનો દક્ષિણ-ધ્રુવ દૂર જતા ગજિયો ચુંબકના ઉત્તર-ધ્રુવની દિશામાં હોય છે. આ એક એવા આકર્ષણ બળમાં પરિણમે છે કે જે ચુંબકની ગતિ અને તેને અનુરૂપ ફ્લક્સના ઘટાડાનો વિરોધ કરે છે.

ઉપરોક્ત ઉદાહરણમાં જો બંધ ગૂંચળાના સ્થાને ખૂલ્લા પરિપથ (ઓપન સર્કિટ)નો ઉપયોગ કરવામાં આવે તો શું થશે ? આ કિસ્સામાં પણ, પરિપથના ખૂલ્લા છેડાઓ વચ્ચે *emf* પ્રેરિત થશે. આ પ્રેરિત *emf*ની દિશા લેન્ઝના નિયમનો ઉપયોગ કરીને શોધી શકાય છે. આકૃતિ 6.6(a) અને (b)નો વિચાર કરો. તેઓ પ્રેરિત પ્રવાહની દિશા સમજવા માટેની સરળ રીત પ્રદાન કરે છે. નોંધો કે (N) અને (S) વડે દર્શાવેલ દિશા પ્રેરિત પ્રવાહની દિશાઓ સૂચવે છે.



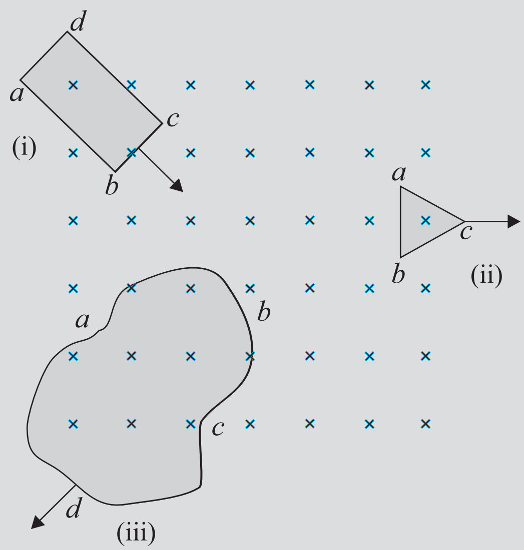
આકૃતિ 6.6
લેન્ઝના નિયમનું ઉદાહરણ

આ બાબતે થોડું મંથન કરતાં લેન્ઝના નિયમની સચોટતાની આપણને ખાતરી થશે. ધારોકે પ્રેરિત વિદ્યુતપ્રવાહ આકૃતિ 6.6(a)માં દર્શાવાયેલી દિશાની વિરુદ્ધમાં હતી. તે કિસ્સામાં, પ્રેરિત વિદ્યુતપ્રવાહને કારણે ઉદ્ભવતા દક્ષિણ-ધ્રુવ ચુંબકના ઉત્તર-ધ્રુવની સામે આવે. ત્યારબાદ ગજિયો ચુંબક ગૂંચળા તરફ સતત વધતા પ્રવેગથી આકર્ષિત થશે. ચુંબક પર હળવો ધક્કો આ પ્રક્રિયાને શરૂ કરશે અને તેનો વેગ તથા ગતિઊર્જા કોઈ ઊર્જાના ખર્ચ વિના સતત વધશે. જો આમ થઈ શકે, તો કોઈ યોગ્ય વ્યવસ્થા દ્વારા શાશ્વત-ગતિવાળું મશીન બનાવી શકાય. આ ઊર્જાના સંરક્ષણના નિયમનું ઉલ્લંઘન કરે છે અને તેથી તે શક્ય નથી.

હવે આકૃતિ 6.6(a)માં બતાવવામાં આવેલ સાચો કિસ્સો ધ્યાનમાં લો. આ પરિસ્થિતિમાં, ગજિયો ચુંબક પ્રેરિત વિદ્યુતપ્રવાહને કારણે અપાકર્ષણ બળ અનુભવે છે. તેથી, આ ચુંબકને ખસેડવા માટે કોઈ વ્યક્તિને કાર્ય કરવું પડે છે. વ્યક્તિ દ્વારા જે ઊર્જા ખર્ચવામાં આવે છે તે ક્યાં જાય છે ? આ ઊર્જાનો પ્રેરિત વિદ્યુતપ્રવાહ દ્વારા જૂલ-હિટીંગ વડે વ્યય થાય છે.

ઉદાહરણ 6.4

આકૃતિ 6.7માં જુદા જુદા આકારના સમતલ ગાળાઓ દર્શાવેલ છે, જે લૂપના સમતલને લંબ અને વાંચકથી દૂર તરફની દિશામાંના ચુંબકીયક્ષેત્રમાંથી બહારની તરફ કે અંદરની તરફ ગતિ કરે છે. લેન્ઝના નિયમનો ઉપયોગ કરીને દરેક ગાળામાં પ્રેરિત વિદ્યુતપ્રવાહની દિશા નિર્ધારિત કરો.



આકૃતિ 6.7

ઉકેલ

(i) ચુંબકીયક્ષેત્રના વિસ્તારમાં ગાળાની ગતિને લીધે લંબચોરસ ગાળા *abcd*માં ચુંબકીય ફ્લક્સ વધે છે. પ્રેરિત વિદ્યુતપ્રવાહ માર્ગ *bcdab* પર જ વહેતો હોવો જોઈએ જેથી તે વધતા ફ્લક્સનો વિરોધ કરે.

(ii) (ક્ષેત્રમાંથી) બહાર તરફની ગતિને કારણે, ત્રિકોણાકાર ગાળા abcમાં ચુંબકીય ફ્લક્સ ઘટે છે, જેના કારણે પ્રેરિત વિદ્યુતપ્રવાહ *bacb* દિશામાં વહે છે, જેથી ફ્લક્સના ફેરફારનો વિરોધ કરી શકે છે.

(iii) ચુંબકીયક્ષેત્રના વિસ્તારમાં અનિયમિત આકારના ગાળા *abcd*ની ગતિને કારણે ચુંબકીય ફ્લક્સ ઘટે છે. પ્રેરિત વિદ્યુતપ્રવાહ *cdabc* દિશામાં વહે જેથી ફ્લક્સના ફેરફારનો વિરોધ કરી શકાય છે.

નોંધો કે, જ્યાં સુધી ગાળાઓ ચુંબકીયક્ષેત્રના વિસ્તારની સંપૂર્ણ અંદર અથવા સંપૂર્ણ બહાર હોય ત્યાં સુધી કોઈ પ્રવાહ પ્રેરિત થશે નહીં.

ઉદાહરણ 6.4

ઉદાહરણ 6.5

(a) જડિત રાખેલ બે કાયમી ચુંબકના ઉત્તર અને દક્ષિણધ્રુવો વચ્ચેના ચુંબકીયક્ષેત્રમાં એક બંધ ગાળાને સ્થિર રાખેલ છે. શું આપણે ખૂબ જ શક્તિશાળી ચુંબકનો ઉપયોગ કરીને આ ગાળામાં વિદ્યુતપ્રવાહ ઉત્પન્ન કરવાની આશા રાખી શકીએ ?

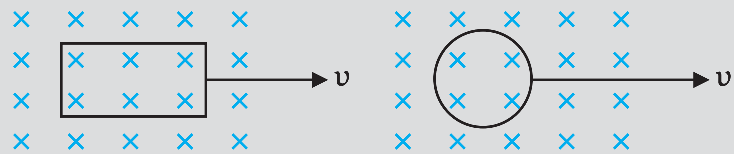
(b) એક બંધ ગાળો એક મોટા કેપેસીટરની તક્તીઓ (Plates) વચ્ચે અચળ વિદ્યુતક્ષેત્રને લંબ ગતિ કરે છે. શું આ ગાળામાં (i) જ્યારે તે સંપૂર્ણ રીતે કેપેસીટર પ્લેટ્સની વચ્ચે હોય કે (ii) જ્યારે તે આંશિક રીતે કેપેસીટરની તકતીની બહાર હોય ત્યારે વિદ્યુતપ્રવાહ પ્રેરિત થશે ? આ વિદ્યુતક્ષેત્ર ગાળાના સમતલને લંબ છે.

(c) એક લંબચોરસ ગાળો અને એક વર્તુળાકાર ગાળો એક સમાન ચુંબકીયક્ષેત્રવાળા વિસ્તારમાંથી બહારની તરફ એક ક્ષેત્ર-મુક્ત વિસ્તાર તરફ અચળ વેગ **v** સાથે ગતિ

ઉદાહરણ 6.5

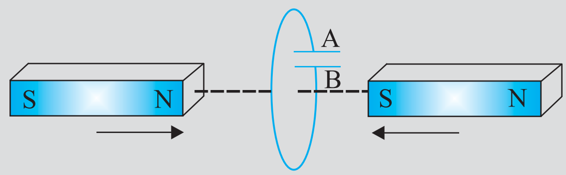
ઉદાહરણ 6.5

કરે છે (આકૃતિ 6.8). ક્ષેત્ર પ્રદેશથી બહારની તરફના માર્ગમાં કયા ગાળામાં તમે અપેક્ષા કરી શકો કે પ્રેરિત *emf* અચળ રહેશે ? આ વિદ્યુતક્ષેત્ર ગાળાના સમતલને લંબ છે.



આકૃતિ 6.8

(d) આકૃતિ 6.9 દ્વારા વર્ણવેલ પરિસ્થિતિમાં કેપેસીટરની ધ્રુવત્વ (Polarity-ધન કે ઋણ)નું અનુમાન કરો.



આકૃતિ 6.9

ઉકેલ

(a) ના. ખૂબ જ શક્તિશાળી ચુંબક હોય તો પણ ગાળામાં વિદ્યુતપ્રવાહ ફક્ત ચુંબકીય ફ્લક્સ બદલીને જ પ્રેરિત કરી શકાય છે.

(b) કોઈ પણ કિસ્સામાં પ્રવાહ પ્રેરિત થતો નથી. વિદ્યુત ફ્લક્સને બદલીને વિદ્યુતપ્રવાહ પ્રેરિત કરી શકાતો નથી.

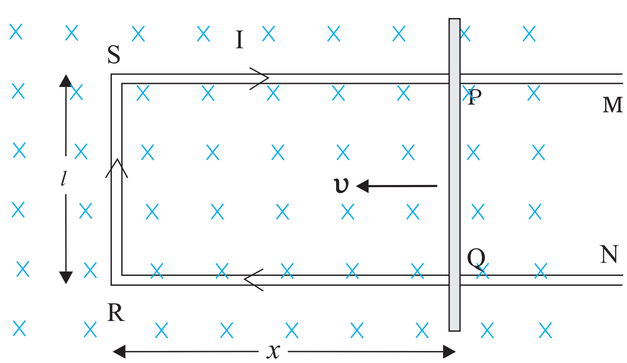
(c) માત્ર લંબચોરસ ગાળાના કિસ્સામાં જ પ્રેરિત *emf* અચળ રહેવાની ધારણા છે. ગોળાકાર ગાળાના કિસ્સામાં, ક્ષેત્રના વિસ્તારમાંથી બહાર નીકળતા ગાળાના વિસ્તારના ફેરફારનો દર અચળ નથી, તેથી પ્રેરિત *emf* તેને અનુરૂપ બદલાશે.

(d) કેપેસીટરમાં પ્લેટ 'A'નું ધ્રુવત્વ પ્લેટ 'B'ના સંદર્ભમાં ધન હશે.

6.6 ગતિકીય વિદ્યુતચાલક બળ (MOTIONAL ELECTROMOTIVE FORCE)

ચાલો આપણે એક સીધા વાહકને નિયમિત અને સમય-સ્વતંત્ર ચુંબકીયક્ષેત્રમાં ગતિ કરતો વિચારીએ. આકૃતિ 6.10માં લંબચોરસ વાહક PQRS દર્શાવે છે, જેમાં વાહક PQ ગતિ કરવા માટે મુક્ત છે. આ સળિયા PQને આકૃતિમાં દર્શાવ્યા મુજબ અચળ વેગ **υ**થી ડાબી તરફ ગતિ કરાવવામાં આવે છે. ધારોકે, ઘર્ષણને કારણે ઊર્જાનો કોઈ વ્યય થતો નથી. PQRS એક બંધ પરિપથ બનાવે છે જેના વડે ઘેરાયેલ ક્ષેત્રફળ PQની ગતિ સાથે બદલાય છે. તેને આ ગોઠવણના સમતલને લંબ એવા એક સમાન ચુંબકીયક્ષેત્ર **B**માં મૂકવામાં આવેલ છે. જો લંબાઈ RQ = x અને RS = l હોય તો, ગાળા PQRS દ્વારા ઘેરાયેલ ચુંબકીય ફ્લક્સ

$\Phi_B = Blx$ હશે.



આકૃતિ 6.10 ભુજા PQને ડાબી બાજુએ ખસેડવામાં આવે છે, તેથી, લંબચોરસ ગાળાનું ક્ષેત્રફળ ઘટતું જાય છે. આ ગતિવિધિ અત્રે દર્શાવ્યા મુજબ વિદ્યુતપ્રવાહ I પ્રેરિત કરે છે.

x સમય સાથે બદલાતું હોવાથી ફ્લક્સ Φ_Bના ફેરફારનો દર *emf* પ્રેરિત કરશે, જેને નીચે મુજબ આપી શકાય :

$$\varepsilon = \frac{-d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt}(Blx)$$

$$= -Bl\frac{dx}{dt} = Bl\upsilon \qquad (6.5)$$

જ્યાં, આપણે $dx/dt = -\upsilon$ ઉપયોગ કર્યો છે, તે વાહક PQની ઝડપ છે. પ્રેરિત *emf*, $Bl\upsilon$ને ગતિકીય *emf* કહેવામાં આવે છે. આમ, આપણે ચુંબકીયક્ષેત્રને બદલ્યા વગર વાહકને ખસેડીને અર્થાત, પરિપથ દ્વારા ઘેરાયેલા ચુંબકીય ફ્લક્સને બદલીને પ્રેરિત *emf* ઉત્પન્ન કરી શકીએ છીએ.

વાહક PQના મુક્ત વિદ્યુતભાર વાહક કણો પર લાગતા લોરેન્ઝ બળને ધ્યાનમાં લઈને પણ સમીકરણ (6.5)માં અભિવ્યક્ત કરેલ ગતિકીય *emf*ને સમજાવી શકાય છે. આ વાહક PQમાં કોઈપણ યથેચ્છ વિદ્યુતભાર q લો. જ્યારે આ સળિયો υ ઝડપથી ગતિ કરે છે, ત્યારે આ વિદ્યુતભાર પણ ચુંબકીયક્ષેત્ર Bમાં υ ઝડપ સાથે ગતિ કરશે. આ વિદ્યુતભાર પર $q\upsilon B$ મૂલ્યનું લોરેન્ઝ બળ લાગે છે અને તેની દિશા Q તરફની છે. સળિયા PQ પર તેમના સ્થાનથી સ્વતંત્ર તમામ વિદ્યુતભારો આ જ મૂલ્ય અને દિશાના બળનો અનુભવ કરે છે. વિદ્યુતભારને Pથી Q સુધી ખસેડવા માટે થતું કાર્ય

$W = q\upsilon Bl$ છે.

emf એ એકમ વિદ્યુતભાર દીઠ થતું કાર્ય હોવાથી

$$\varepsilon = \frac{W}{q}$$

$$= Bl\upsilon$$

આ સમીકરણ સળિયાના બે છેડા વચ્ચે પ્રેરિત *emf* આપે છે અને સમીકરણ (6.5)ને સમતુલ્ય છે. અમે અહીં એ વાત પર ભાર મુકીએ છીએ કે અમારી આ રજૂઆત સંપૂર્ણરૂપે પરિપૂર્ણ નથી, પરંતુ જ્યારે એક વાહક સમાન અને સમય-સ્વતંત્ર ચુંબકીયક્ષેત્રમાં ગતિ કરતો હોય ત્યારે આ આપણને ફેરેડેના નિયમના આધારને સમજવામાં મદદ કરે છે.

બીજી તરફ, તે સ્પષ્ટ નથી કે જ્યારે વાહક સ્થિર હોય અને ચુંબકીયક્ષેત્ર બદલાતું હોય ત્યારે *emf* કેવી રીતે પ્રેરિત થાય છે – આ એ હકીકત છે, કે જે ફેરેડેએ ઘણા પ્રયોગો દ્વારા ચકાસી હતી. એક સ્થિર વાહકના કિસ્સામાં, તેના વિદ્યુતભારો પરનું બળ

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \boldsymbol{\upsilon} \times \mathbf{B}) = q\mathbf{E} \qquad (6.6)$$

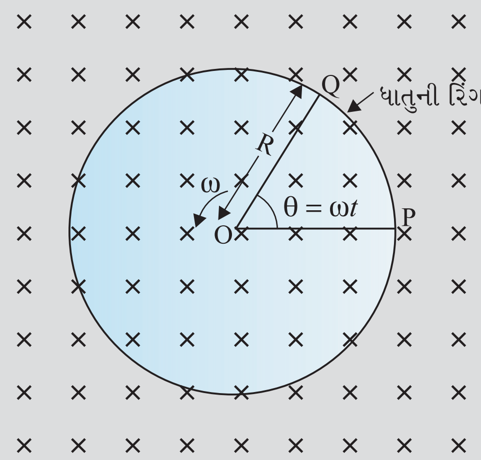
દ્વારા આપવામાં આવે છે કારણ કે, $\boldsymbol{\upsilon} = 0$ છે. તેથી, વિદ્યુતભાર પર લાગતું કોઈ પણ બળ માત્ર વિદ્યુતક્ષેત્રના પદ **E**માંથી ઉદ્ભવશે. તેથી, પ્રેરિત *emf* અથવા પ્રેરિત વિદ્યુતપ્રવાહના અસ્તિત્વને સમજાવવા માટે, આપણે એવું ધારવું જ પડે કે સમય સાથે બદલાતું ચુંબકીયક્ષેત્ર વિદ્યુતક્ષેત્રને ઉત્પન્ન કરે છે. જો કે, આપણે એ માનવા માટે ઉતાવળ કરીએ છીએ કે, સ્થિર વિદ્યુતભાર દ્વારા ઉત્પાદિત વિદ્યુતક્ષેત્ર અને સમય સાથે બદલાતા ચુંબકીયક્ષેત્રો દ્વારા ઉત્પાદિત વિદ્યુતક્ષેત્રને અલગ અલગ ગુણધર્મો હોય છે. પ્રકરણ-4માં, આપણે શીખ્યા કે ગતિમાન વિદ્યુતભાર (વિદ્યુતપ્રવાહ) સ્થિર ચુંબક પર બળ/બળયુગ્મ (ટૉર્ક) લગાવી શકે છે. તેથી ઉલટું, ગતિમાન ગજિયો ચુંબક (અથવા વધુ વ્યાપક રીતે, બદલાતું ચુંબકીયક્ષેત્ર) સ્થિર વિદ્યુતભાર પર બળ લગાડી શકે છે. ફેરેડેની શોધનું આ મૂળભૂત મહત્ત્વ છે. વિદ્યુત અને અને ચુંબકત્વ સંબંધિત છે.

PHYSICS

Interactive animation on motional emf :
http://ngsir.netfirms.com/englishhtm/Induction.htm
http://webphysics.davidson.edu/physlet_resources/bu_semester2/index.html

ઉદાહરણ 6.6 જેનો એક છેડો 1 m ત્રિજ્યાના ગોળાકાર ધાતુની રિંગ (વલય)ના કેન્દ્રમાં લટકાવેલ અને બીજો છેડો પરિઘ પર હોય તેવા 1 m ની લંબાઈના ધાતુના એક સળિયાને 50 rev/s આવૃત્તિ સાથે કેન્દ્રમાંથી પસાર થતી અને રિંગના સમતલને લંબ અક્ષને અનુલક્ષીને ભ્રમણ કરાવવામાં આવે છે (આકૃતિ 6.11). અક્ષને સમાંતર 1 Tનું અચળ અને એકસમાન ચુંબકીયક્ષેત્ર બધે જ પ્રવર્તીત છે. આ કેન્દ્ર અને ધાતુની રિંગ વચ્ચે કેટલું *emf* હશે ?

ઉદાહરણ 6.6



આકૃતિ 6.11

ઉકેલ

રીત -I

જેમ સળિયો ફરે છે તેમ, લોરેન્ઝ બળને કારણે સળિયાના મુક્ત ઇલેક્ટ્રૉન બાહ્ય છેડા તરફ ગતિ કરે છે અને રિંગ પર વિતરીત થાય છે. આ રીતે, વિદ્યુતભારોના અલગ થવાના પરિણામે સળિયાના છેડા વચ્ચે *emf* ઉત્પન્ન થાય છે. *emf* ના કોઈ એક ચોક્કસ મૂલ્ય માટે આનાથી વધુ ઇલેક્ટ્રૉનનું વહન નથી હોતું અને એક સ્થિર સ્થિતિ પ્રાપ્ત થાય છે. સમીકરણ (6.5)નો ઉપયોગ કરીને, સળિયો ચુંબકીયક્ષેત્રને કાટખૂણે ગતિ કરતો હોવાથી તેની લંબાઈ dr માં ઉત્પન્ન થતાં *emf*નું મૂલ્ય નીચે મુજબ આપવામાં આવે છે,

$d\varepsilon = \mathrm{B}\upsilon dr$. તેથી

$$\varepsilon = \int d\varepsilon = \int_0^R \mathrm{B}\upsilon dr = \int_0^R \mathrm{B}\omega r\, dr = \frac{\mathrm{B}\omega \mathrm{R}^2}{2}$$

નોંધો કે આપણે $\upsilon = \omega r$નો ઉપયોગ કર્યો છે. આ પરથી

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \times 1.0 \times 2\pi \times 50 \times (1^2)$$

$= 157\ \mathrm{V}$

રીત -II

આ *emf*ની ગણતરી કરવા માટે, આપણે બંધ ગાળો OPQની કલ્પના કરી શકીએ છીએ, જેમાં બિંદુ O અને P, અવરોધ R સાથે જોડાયેલા છે અને OQ ભ્રમણ કરતો સળિયો છે. અવરોધના બે છેડા વચ્ચેનો વિદ્યુતસ્થિતિમાનનો તફાવત એ પ્રેરિત *emf* ની બરાબર છે અને B × (ગાળાના ક્ષેત્રફળના ફેરફારનો દર) જેટલો છે. જો *t* સમયે સળિયા અને P પર વર્તુળની ત્રિજ્યા વચ્ચેનો ખૂણો θ હોય તો તે OPQ વિભાગનું ક્ષેત્રફળ

$\pi \mathrm{R}^2 \times \dfrac{\theta}{2\pi} = \dfrac{1}{2}\mathrm{R}^2\theta$ દ્વારા આપવામાં આવે છે.

જ્યાં R એ વર્તુળની ત્રિજ્યા છે. તેથી, પ્રેરિત *emf*

$$\varepsilon = \mathrm{B} \times \frac{d}{dt}\left[\frac{1}{2}\mathrm{R}^2\theta\right] = \frac{1}{2}\mathrm{B}\mathrm{R}^2\frac{d\theta}{dt} = \frac{\mathrm{B}\omega \mathrm{R}^2}{2}$$

[નોંધો : $\dfrac{d\theta}{dt} = \omega = 2\pi\nu$]

આ સમીકરણ રીત I દ્વારા મેળવાયેલ સમીકરણને સમાન છે અને આપણને ε ના સમાન મૂલ્ય મળે છે.

ઉદાહરણ 6.6

ઉદાહરણ 6.7 0.5 mના લંબાઈના ધાતુના 10 આરા (Spoke) ધરાવતું એક વ્હીલ એક સ્થળ પર પૃથ્વીના ચુંબકીયક્ષેત્રના સમક્ષિતિજ ઘટક H_Eને લંબ એવા એક સમતલમાં 120 rev/minની ઝડપે ફરે છે. જો આ સ્થાન પર $H_E = 0.4$ G, હોય તો ધરી (Axle) અને વ્હીલના રિમ વચ્ચે પ્રેરિત *emf* શું હશે ? નોંધો કે 1 G $= 10^{-4}$ T.

ઉકેલ

પ્રેરિત *emf* $= (1/2)\,\omega\, B\, R^2$

$= (1/2) \times 4\pi \times 0.4 \times 10^{-4} \times (0.5)^2$

$= 6.28 \times 10^{-5}$ V

અહીં, આરાની સંખ્યા અગત્યની નથી કારણકે આરામાનું emf સમાંતર છે.

6.7 ઊર્જાની વિચારણા : એક માત્રાત્મક અભ્યાસ (Energy Consideration : A Quantitative Study)

પરિચ્છેદ 6.5માં, આપણે ગુણાત્મક રીતે ચર્ચા કરી કે લેન્ઝનો નિયમ ઊર્જા સંરક્ષણના નિયમ સાથે સુસંગત છે. હવે આપણે આ પાસાને નક્કર ઉદાહરણ સાથે સમજવાનો પ્રયત્ન કરીશું.

આકૃતિ 6.10માં બતાવ્યા પ્રમાણે, લંબચોરસ સુવાહક લો કે જેની સરકી શકે તેવી PQ બાજુનો અવરોધ r છે. આપણે ધારીએ છીએ કે બાકીની બાજુઓ QR, RS અને SPના અવરોધ એ rની તુલનામાં અવગણ્ય છે. આમ, લંબચોરસ લૂપનો સમગ્ર અવરોધ r છે અને જેમ PQ ખસેડવામાં આવે છે તેમ આ બદલાતો નથી. આ ગાળામાં વિદ્યુતપ્રવાહ I છે,

$$I = \frac{\varepsilon}{r}$$

$$= \frac{Bl\upsilon}{r} \qquad (6.7)$$

ચુંબકીયક્ષેત્રની હાજરીના લીધે, બાજુ PQ પર એક બળ હશે. આ બળ I($\boldsymbol{l} \times \mathbf{B}$), બહારની તરફ સળિયાના વેગથી વિરુદ્ધ દિશામાં લાગે છે. આ બળનું મૂલ્ય,

$$F = IlB = \frac{B^2 l^2 \upsilon}{r}$$

છે અહીં, આપણે સમીકરણ (6.7)નો ઉપયોગ કર્યો છે. નોંધો કે, આ બળ સળિયાની દિશામાં વિદ્યુતભારો (વિદ્યુતપ્રવાહ માટે જવાબદાર)ના ડ્રિફ્ટ વેગ અને પરિણામે તેમના પર લાગતાં લોરેન્ઝ બળના કારણે છે.

વૈકલ્પિક રીતે, બાજુ PQને અચળ ઝડપ υ સાથે ગતિ કરાવવામાં આવે, આમ કરવા માટે જરૂરી પાવર

$$P = F\upsilon$$

$$= \frac{B^2 l^2 \upsilon^2}{r} \qquad (6.8)$$

છે. અત્રે, આમ કરવા જરૂરી પરિબળ એ યાંત્રિક છે. આ યાંત્રિક ઊર્જા ક્યાં જાય છે ? જવાબ છે : તે જૂલ ઉષ્મા (Joule Heat) તરીકે વ્યય પામે છે, અને તેને

$$P_J = I^2 r = \left(\frac{Bl\upsilon}{r}\right)^2 r = \frac{B^2 l^2 \upsilon^2}{r}$$

દ્વારા આપવામાં આવે છે. જે સમીકરણ (6.8) ને સમાન છે.

આમ, યાંત્રિકઊર્જા કે જે ભુજા PQને ખસેડવા માટે જરૂરી હતી તે વિદ્યુતઊર્જા (પ્રેરિત *emf*) અને પછી ઉષ્મા ઊર્જામાં રૂપાંતરિત થાય છે.

પરિપથમાંથી વહન પામતા વિદ્યુતભાર અને ચુંબકીય ફ્લક્સમાં થતાં ફેરફાર વચ્ચે એક રસપ્રદ સંબંધ છે. ફેરેડેના નિયમ પરથી, આપણે શીખ્યા છીએ કે પ્રેરિત *emf*નું મૂલ્ય

$$|\varepsilon| = \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$$ છે.

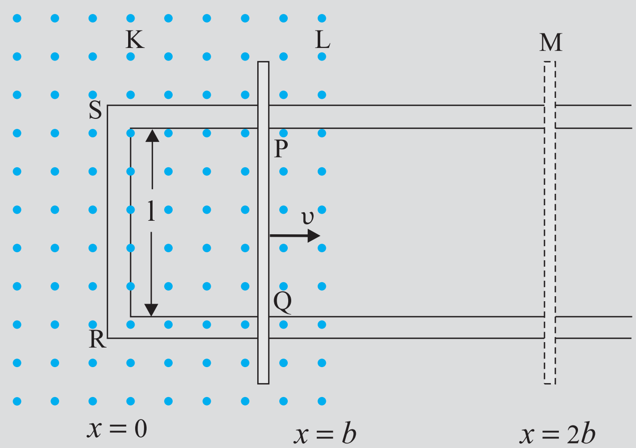
જો કે,

$$|\varepsilon| = Ir = \frac{\Delta Q}{\Delta t} r$$

આમ,

$$\Delta Q = \frac{\Delta\Phi_B}{r}$$

ઉદાહરણ 6.8 આકૃતિ 6.12 (a)નો સંદર્ભ લો. લંબચોરસ વાહકની ભુજા PQને $x = 0$થી બહારની તરફ ગતિ કરાવવામાં આવે છે. એકસમાન ચુંબકીયક્ષેત્ર સમતલને લંબ છે અને $x = 0$ થી $x = b$ સુધી વિસ્તરેલ છે અને $x > b$ માટે શૂન્ય છે. માત્ર ભુજા PQ જ નોંધપાત્ર અવરોધ r ધરાવે છે. જ્યારે PQને અચળ ઝડપ υ સાથે $x = 0$ થી $x = 2b$ સુધી બહારની તરફ ખેંચવામાં આવે અને ત્યારબાદ $x = 0$ પર પરત ખસેડવામાં આવે તે સ્થિતિનો વિચાર કરો. ફ્લક્સ, પ્રેરિત *emf*, ભુજાને ખેંચવા માટે જરૂરી બળ અને જૂલ ઉષ્મા તરીકે વ્યય થતા પાવર માટેના સૂત્રો મેળવો. અંતર સાથે આ રાશિઓના બદલાવને રેખાંકિત કરો.



(a)

આકૃતિ 6.12

ઉકેલ

પહેલા આપણે $x = 0$ થી $x = 2b$ આગળની ગતિ માટે વિચાર કરીએ. આ પરિપથ SPQR સાથે જોડાયેલા ફ્લક્સ Φ_B છે.

$$\Phi_B = Blx \qquad 0 \le x < b$$
$$= Blb \qquad b \le x < 2b$$

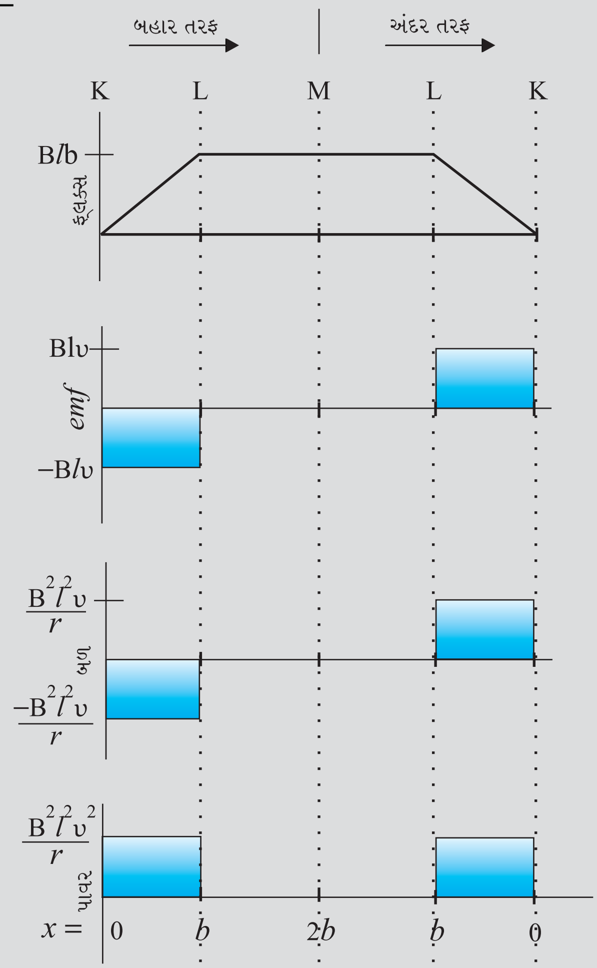
પ્રેરિત *emf*

$$\varepsilon = \frac{-d\Phi_B}{dt}$$
$$= -Bl\upsilon \qquad 0 \le x < b$$
$$= 0 \qquad b \le x < 2b$$

ઉદાહરણ 6.8

જ્યારે પ્રેરિત *emf* શૂન્ય ના હોય, ત્યારે વિદ્યુતપ્રવાહ I (મૂલ્યમાં)

$$I = \frac{Bl\upsilon}{r}$$



(b)

આકૃતિ 6.12

I *l* B એ ભુજા PQને સતત અચળ ગતિમાં રાખવા માટે જરૂરી બળ છે. તેની દિશા ડાબી તરફની છે. આ બળનું માન

$$F = \frac{B^2 l^2 \upsilon}{r} \qquad 0 \le x < b$$

$$= 0 \qquad b \le x < 2b$$

જૂલ ઉષ્માનો વ્યય

$$P_J = I^2 r$$

$$= \frac{B^2 l^2 \upsilon^2}{r} \qquad 0 \le x < b$$

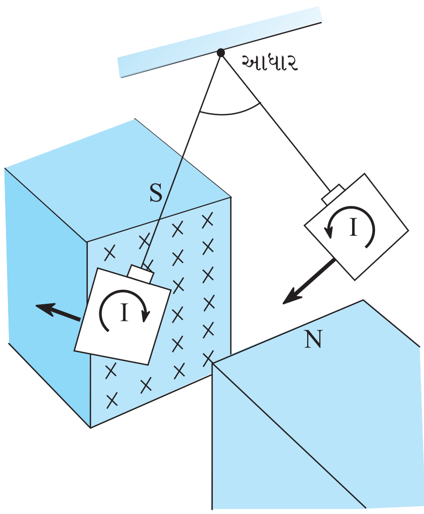
$$= 0 \qquad b \le x < 2b \text{ છે.}$$

આમ $x = 2b$ થી $x = 0$ની અંદર ગતિ માટે સમાન સૂત્રો મળે છે. આકૃતિ 6.12(b)માં પ્રદર્શિત વિવિધ રાશિઓના ચિત્રનું અવલોકન કરીને સમગ્ર પ્રક્રિયાને સમજી શકાય છે.

ઉદાહરણ 6.8

6.8 ઘૂમરી પ્રવાહો (Eddy Currents)

અત્યાર સુધી આપણે વાહકમાં વર્તુળાકાર ગાળા જેવા સુવ્યાખ્યાયિત પથમાં પ્રેરિત વિદ્યુતપ્રવાહોનો અભ્યાસ કર્યો છે. વાહકના મોટા ટુકડાઓને પણ જ્યારે બદલાતાં ચુંબકીય ફ્લક્સમાં મૂકવામાં આવે છે, ત્યારે તેમાં પણ પ્રેરિત પ્રવાહો ઉત્પન્ન થાય છે. જો કે, તેમના વહનની પેટર્ન (ભાત, પ્રકાર) પાણીમાં ઘૂમરાતાં વમળો જેવી હોય છે. આ અસર ભૌતિકશાસ્ત્રી ફૂકો (1819-1868) દ્વારા શોધવામાં આવી હતી અને આ પ્રવાહોને *ઘૂમરી પ્રવાહ* કહેવામાં આવે છે.

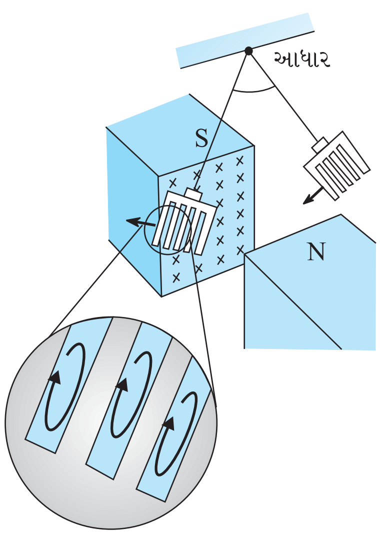


આકૃતિ 6.13 ચુંબકીયક્ષેત્રના વિસ્તારમાં પ્રવેશતા કે તેમાંથી બહાર જતાં, તાંબાની પ્લેટમાં ઘૂમરી પ્રવાહો ઉત્પન્ન થાય છે.

આકૃતિ 6.13માં બતાવ્યા પ્રમાણેનું એક ઉપકરણ ધ્યાનમાં લો. એક પ્રબળ ચુંબકના ધ્રુવો વચ્ચે તાંબાની પ્લેટને એક સરળ લોલકની જેમ દોલન કરવા દેવામાં આવે છે. આમાં એવું જોવા મળ્યું કે દોલન ગતિનું અવમંદન થાય છે અને થોડાક સમયમાં પ્લેટ ચુંબકીયક્ષેત્રમાં સ્થિર થઈ જાય છે. આપણે વિદ્યુતચુંબકીય પ્રેરણના આધારે આ ઘટનાને સમજાવી શકીએ છીએ. જ્યારે પ્લેટ ચુંબકીય ધ્રુવો વચ્ચેના વિસ્તારમાં પ્રવેશ કરે અને બહાર નીકળે છે, ત્યારે આ પ્લેટ સાથે સંકળાયેલ ચુંબકીય ફ્લક્સ સતત બદલાતું રહે છે. આ ફ્લક્સનો ફેરફાર પ્લેટમાં ઘૂમરી પ્રવાહ પ્રેરિત કરે છે. જ્યારે પ્લેટ, ધ્રુવો વચ્ચેના વિસ્તારમાં પ્રવેશે છે ત્યારે અને જ્યારે તે આ વિસ્તારમાંથી બહાર જાય છે, ત્યારે ઘૂમરી પ્રવાહોની દિશા વિરુદ્ધ હોય છે.

આકૃતિ 6.14માં બતાવ્યા પ્રમાણે જો કૉપર પ્લેટમાં લંબચોરસ ખાંચા પાડવામાં આવે તો ઘૂમરી પ્રવાહોના વહન માટે ઉપલબ્ધ વિસ્તાર ઓછો થાય છે. આમ, છિદ્ર અથવા ખાંચા ધરાવતી લોલકની પ્લેટ વિદ્યુતચુંબકીય અવમંદન ઘટાડે છે અને પ્લેટ વધુ મુક્તપણે ઝૂલે છે. નોંધો કે પ્રેરિત પ્રવાહોની ચુંબકીય ચાકમાત્રાઓ (જે ગતિનો વિરોધ કરે છે) પ્રવાહો દ્વારા ઘેરાતા ક્ષેત્રફળ પર આધાર રાખે છે (પ્રકરણ-4માંનું સમીકરણ $\mathbf{m} = I\mathbf{A}$ યાદ કરો).

આ હકીકત ટ્રાન્સફોર્મર્સના ધાતુના ગર્ભ (Cores)માં ઘૂમરી પ્રવાહ ઘટાડવામાં મદદરૂપ થાય છે. ઈલેક્ટ્રીક મોટર અને આવા અન્ય ઉપકરણોમાં ગૂંચળું ધાતુના ગર્ભ પર વીંટાળેલ હોય છે. ઘૂમરી પ્રવાહો અનિચ્છનીય છે કારણ કે તેઓ ગર્ભને ગરમ કરે છે અને ઉષ્માના સ્વરૂપમાં વિદ્યુતઊર્જાનો વ્યય કરે છે. ધાતુનો ગર્ભ બનાવવા માટે ધાતુના આવરણો (સૂક્ષ્મ પડ) (Leminations)નો ઉપયોગ કરીને ઘૂમરી પ્રવાહોને ઘટાડી શકાય છે. આ આવરણો એ વાર્નિશ (Lacquer) જેવા અવાહક પદાર્થથી અલગ પાડેલ હોય છે. આ આવરણોનું સમતલ ચુંબકીયક્ષેત્રને સમાંતર જ ગોઠવવું જોઈએ, જેથી તેઓ ઘૂમરી પ્રવાહના પથો કાપી શકે. આવી રચના ઘૂમરી પ્રવાહની તીવ્રતા ઘટાડે છે. વિદ્યુત ઊર્જાનું ઉષ્મામાં વ્યય એ વિદ્યુતપ્રવાહની તીવ્રતાના વર્ગ પર આધાર રાખે છે. તેથી ઉષ્માના પ્રમાણમાં નોંધપાત્ર ઘટાડો થાય છે.



આકૃતિ 6.14 તાંબાની પ્લેટમાં કાપેલા ખાંચાઓ ઘૂમરી પ્રવાહોની અસર ઘટાડે છે.

ઘૂમરી પ્રવાહો કેટલીક રચનાઓના ઉપયોગોમાં લાભકારક છે જેમ કે :

(i) *ટ્રેનમાં મેગ્નેટિક બ્રેકીંગ* : પ્રબળ (શક્તિશાળી) વિદ્યુતચુંબકો કેટલીક વિદ્યુત સંચાલિત ટ્રેનમાં પાટાઓની ઉપર સ્થિત હોય છે. જ્યારે વિદ્યુતચુંબકો સક્રિય થાય છે, ત્યારે ટ્રેનમાં પ્રેરિત ઘૂમરી પ્રવાહ ટ્રેનની ગતિનો વિરોધ કરે છે. આમાં કોઈ યાંત્રિક જોડાણો ન હોવાથી બ્રેકીંગ અસર ઝટકા રહિત છે.

(ii) *વિદ્યુતચુંબકીય અવમંદન* (Electromagnetic Damping) : કેટલાંક ગેલ્વેનોમીટરમાં બિનચુંબકીય ધાતુની સામગ્રીમાંથી બનેલો સ્થિર ગર્ભ (કોર) હોય છે. જ્યારે ગૂંચળુ દોલન કરે છે, ત્યારે ગર્ભમાં ઉત્પન્ન થયેલ ઘૂમરી પ્રવાહો ગતિનો વિરોધ કરે છે અને ગૂંચળાને ઝડપથી સ્થિર સ્થિતિમાં લાવે છે.

(iii) *પ્રેરણ-ભઠ્ઠી* (Induction Furnace) : ઈન્ડકશન ફર્નેસના ઉપયોગથી ઉચ્ચ તાપમાન ઉત્પન્ન કરીને ઘટક ધાતુઓને પિગાળીને મિશ્રધાતુ તૈયાર કરી શકાય છે. જે ધાતુઓને ઓગાળવાની હોય તેની આસપાસ વીંટાળેલ ગૂંચળામાંથી એક ઉચ્ચ આવૃત્તિવાળો ઓલ્ટર્નેટીંગ પ્રવાહ (ac) પસાર કરવામાં આવે છે. ધાતુઓમાં ઉત્પન્ન થતા ઘૂમરી પ્રવાહો તેને પીગાળી શકે તેટલા ઊંચા તાપમાનો ઉત્પન્ન કરે છે.

(iv) *ઈલેક્ટ્રીક પાવર મીટર* : ઈલેક્ટ્રીક પાવર મીટર (એનાલોગ ટાઈપ)માં ચમકતી ધાતુની તક્તી (Disc), ઘૂમરી પ્રવાહોને કારણે ફરે છે. ગૂંચળામાં જ્યાવર્તી (Sinusoidally) બદલાતાં પ્રવાહો દ્વારા ઉત્પન્ન ચુંબકીયક્ષેત્રો દ્વારા તક્તીમાં વિદ્યુતપ્રવાહો પ્રેરિત કરવામાં આવે છે. તમે તમારા ઘરના પાવર મીટરમાં ફરતી ચળકતી તક્તીને જોઈ શકો છો.

વિદ્યુતચુંબકીય અવમંદન
(ELECTROMAGNETIC DAMPING)

ઍલ્યુમિનિયમ અને પીવીસીના બનેલા સમાન આંતરિક વ્યાસના બે પોલા પાતળા નળાકાર પાઇપ લો. રિટોર્ટ સ્ટેન્ડસ પર કલેમ્પ વડે તેમને ઊભી રાખો. પાઇપના આંતરિક વ્યાસ કરતા નાના વ્યાસનું નળાકાર ચુંબક લો અને તેને દરેક પાઇપમાં એવી રીતે પડવા દો કે ચુંબક તેના પતન દરમિયાન પાઇપોની બાજુઓને ન સ્પર્શે. તમે જોશો કે પીવીસી પાઇપમાં છોડવામાં આવેલું ચુંબક પાઇપમાંથી બહાર આવવા માટેનો તેટલો જ સમય લે છે, જેટલો પાઇપ વગર તે જ ઊંચાઈથી છોડવામાં આવે ત્યારે તે લેશે. દરેક કિસ્સામાં પાઇપમાંથી બહાર આવવા માટે તે જે સમય લે છે તે નોંધો. તમે જોશો કે ચુંબક ઍલ્યુમિનિયમ પાઇપના કિસ્સામાં વધારે સમય લે છે. આમ શા માટે છે ? તે ઘૂમરી પ્રવાહોને કારણે છે કે જે ઍલ્યુમિનિયમ પાઇપમાં પેદા થાય છે, જે ચુંબકીય ફ્લક્સ ફેરફારનો એટલે કે, ચુંબકની ગતિનો વિરોધ કરે છે. ઘૂમરી પ્રવાહને કારણે ગતિરોધક બળ ચુંબકની ગતિને અવરોધે છે. આવી ઘટનાઓને *વિદ્યુતચુંબકીય અવમંદન (ઈલેક્ટ્રોમેગ્નેટિક ડેમ્પીંગ)* તરીકે ઓળખવામાં આવે છે. નોંધો કે, પીવીસી પાઇપમાં ઘૂમરી પ્રવાહો પેદા થતા નથી કારણ કે તેનું દ્રવ્ય એક અવાહક છે જ્યારે ઍલ્યુમિનિયમ એક વાહક છે.

6.9 પ્રેરકત્વ (INDUCTANCE)

કોઈ એક ગૂંચળામાં તેના નજીક રહેલ અન્ય ગૂંચળા દ્વારા ફ્લક્સમાં ફેરફાર ઉત્પન્ન કરીને અથવા તે જ ગૂંચળા દ્વારા ફ્લક્સમાં ફેરફાર કરીને વિદ્યુતપ્રવાહ પ્રેરિત કરી શકાય છે. આ બે પરિસ્થિતિઓને હવે પછીના બે પેટા-વિભાગોમાં અલગથી વર્ણવવામાં આવેલ છે. જો કે, આ બંને કિસ્સાઓમાં, ગૂંચળા સાથે સંકળાયેલ ફ્લક્સ વિદ્યુતપ્રવાહના સમપ્રમાણમાં છે. એટલે કે, $\Phi_B \alpha$ I. વધુમાં, જો ગૂંચળાનો આકાર (ભૂમિતિ) સમય સાથે બદલાતો ન હોય તો,

$$\frac{d\Phi_B}{dt} \propto \frac{dI}{dt}$$

ખૂબ જ નજીક વીંટાળેલ N આંટાવાળા ગૂંચળા માટે, બધા આંટા સાથે સમાન ચુંબકીય ફ્લક્સ સંકળાયેલ હોય છે. જ્યારે ગૂંચળાને સંલગ્ન ફ્લક્સ Φ_Bમાં ફેરફારો થાય છે, ત્યારે દરેક આંટો પ્રેરિત *emf* માં ફાળો આપે છે. તેથી, *સંલગ્ન ફ્લક્સ* (Flux Linkage) તરીકે ઓળખાતું એક પદ વપરાય છે. જે ખૂબ જ નજીક વીંટાળેલ આંટાવાળા ગૂંચળા માટે $N\Phi_B$ બરાબર હોય છે અને આવા કિસ્સામાં

$$N\Phi_B \propto I$$

આ સંબંધમાં સમપ્રમાણતા અચળાંકને *પ્રેરકત્વ* કહેવાય છે. આપણે જોઈશું કે, પ્રેરકત્વ ગૂંચળાની ભૂમિતિ (આકાર) અને દ્રવ્યના આંતરિક ગુણધર્મો પર જ આધાર રાખે છે. આ બાબત કેપેસીટન્સના જેવી છે, જે

સમાંતર પ્લેટ કેપેસીટર માટે પ્લેટનું ક્ષેત્રફળ અને પ્લેટ વચ્ચેના અંતર (ભૂમિતિ) અને વચ્ચે રહેલા માધ્યમના પરાવિદ્યુત (ડાઇઇલેક્ટ્રીક) અચળાંક K (દ્રવ્યનો આંતરિક ગુણધર્મ) પર આધારિત છે.

પ્રેરકત્વ એક અદિશ રાશિ છે. તેના પરિમાણો $[ML^2T^{-2}A^{-2}]$ છે, જે ફ્લક્સના પરિમાણોને પ્રવાહના પરિમાણો વડે ભાગીને (ભાગાકાર કરીને) આપવામાં આવે છે. પ્રેરકત્વનો SI એકમ *હેન્રી* (Herny) છે અને તેને H દ્વારા દર્શાવવામાં આવે છે. જોસેફ હેન્રી કે જેમણે USAમાં વિદ્યુતચુંબકીય પ્રેરણ શોધ્યું હતું, તેમના માનમાં આ નામ આપવામાં આવ્યું હતું, જે ઇંગ્લેન્ડમાં ફેરેડેની શોધથી સ્વતંત્ર હતું.

6.9.1 અન્યોન્ય પ્રેરકત્વ (Mutual Inductance)

આકૃતિ 6.15નો વિચાર કરો, જે l લંબાઈના લાંબા બે સમઅક્ષીય સૉલેનોઇડ્સ દર્શાવે છે. આપણે અંદરના સૉલેનોઇડ S_1ની ત્રિજ્યાને r_1 અને એકમ લંબાઇ દીઠ આંટાની સંખ્યાને n_1થી દર્શાવીએ છીએ. બાહ્ય સૉલેનોઇડ S_2 માટે આ રાશિઓ અનુક્રમે r_2 અને n_2 છે. N_1 અને N_2 અનુક્રમે S_1 અને S_2 ગૂંચળાઓના કુલ આંટાઓની સંખ્યા દર્શાવે છે.

જ્યારે S_2માં વિદ્યુતપ્રવાહ I_2ને પસાર કરવામાં આવે છે, ત્યારે તે S_1માં ચુંબકીય ફ્લક્સ પ્રસ્થાપિત કરે છે. ચાલો તેને (આંટાદીઠ ફ્લક્સને) Φ_1 દ્વારા દર્શાવીએ. આને અનુરૂપ સૉલેનોઇડ S_1 સાથે સંકળાયેલ ફ્લક્સ

$$N_1\Phi_1 = M_{12}I_2 \qquad (6.9)$$

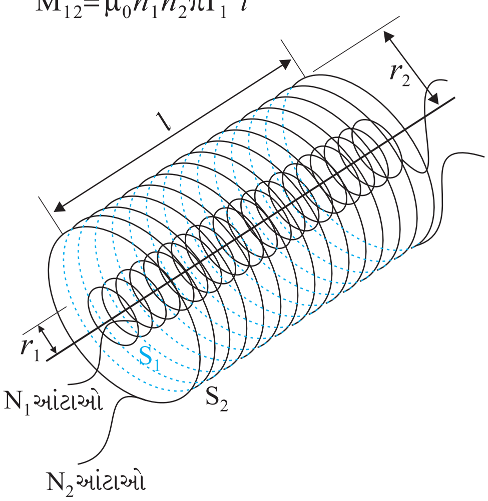
છે. M_{12}ને સૉલેનોઇડ S_1ના સૉલેનોઇડ S_2ની સાપેક્ષે *અન્યોન્ય પ્રેરકત્વ* તરીકે ઓળખવામાં આવે છે. તેને *અન્યોન્ય પ્રેરણ* અચળાંક તરીકે પણ ઓળખવામાં આવે છે.

આ સાદા સમઅક્ષીય સૉલેનોઇડ્સ માટે M_{12}ની ગણતરી કરવી શક્ય છે. વિદ્યુતપ્રવાહ I_2ને કારણે S_2માં ચુંબકીયક્ષેત્ર $\mu_0 n_2 I_2$ છે. પરિણામે ગૂંચળા S_1 સાથે સંકળાયેલ ફ્લક્સ

$$N_1\Phi_1 = (n_1 l)(\pi r_1^2)(\mu_0 n_2 I_2)$$
$$= \mu_0 n_1 n_2 \pi r_1^2 l I_2 \qquad (6.10)$$

છે. જ્યાં, $n_1 l$ એ સૉલેનોઇડ S_1માંના કુલ આંટાઓની સંખ્યા છે. આમ, સમીકરણ (6.9) અને સમીકરણ (6.10) પરથી,

$$M_{12} = \mu_0 n_1 n_2 \pi r_1^2 l \qquad (6.11)$$



આકૃતિ 6.15 સમાન લંબાઈ l ના બે લાંબા સમઅક્ષીય સૉલેનોઇડ

નોંધો કે, આપણે ધાર (છેડા)ની અસરોને અવગણી છે અને ચુંબકીયક્ષેત્ર $\mu_0 n_2 I_2$ને સૉલેનોઇડ S_2ની લંબાઇ અને પહોળાઈ પર એક સમાન લેવામાં આવેલ છે. સૉલેનોઇડ લાંબો છે એટલે કે $l >> r_2$ છે તે ધ્યાનમાં રાખતાં આ એક સારી સંનિકટતા છે.

આપણે હવે વિરુદ્ધ કિસ્સો ધ્યાનમાં લઇશું. એક વિદ્યુતપ્રવાહ I_1 સૉલેનોઇડ S_1માંથી પસાર થાય છે અને ગૂંચળા S_2 સાથે સંકળાયેલ ફ્લક્સ

$$N_2\Phi_2 = M_{21}I_1 \qquad (6.12)$$

છે. સૉલેનોઇડ S_1ના સાપેક્ષમાં M_{21}ને સૉલેનોઇડ S_2નું *અન્યોન્ય પ્રેરકત્વ* કહેવામાં આવે છે.

વિદ્યુતપ્રવાહ I_1ને કારણે S_1માંના ફ્લક્સને સંપૂર્ણપણે S_1ની અંદર જ મર્યાદિત થયેલ ધારી શકાય છે, કારણ કે સૉલેનોઇડ ખૂબ જ લાંબો છે. આમ, સૉલેનોઇડ S_2 સાથે સંકળાયેલ ફ્લક્સ

$$N_2\Phi_2 = (n_2 l)(\pi r_1^2)(\mu_0 n_1 I_1)$$

છે. જ્યાં, $n_2 l$ એ S_2ના કુલ આંટાઓની સંખ્યા છે. સમીકરણ (6.12) પરથી,

$$M_{21} = \mu_0 n_1 n_2 \pi r_1^2 l \quad (6.13)$$

સમીકરણ (6.11) અને સમીકરણ (6.12)નો ઉપયોગ કરતાં આપણને

$$M_{12} = M_{21} = M \text{ (ધારો)} \quad (6.14)$$

મળશે. આપણે લાંબા સમઅક્ષીય સૉલેનોઇડ્સ માટે આ સમાનતા દર્શાવી છે. જો કે, આ સંબંધ વધુ વ્યાપક છે, નોંધો કે, જો આંતરિક સૉલેનોઇડ એ બાહ્ય સૉલેનોઇડ કરતાં ખૂબ ટૂંકા હોય (અને ખૂબ જ અંદર રાખવામાં આવેલ હોય), તો પણ હજુ આપણે સંકળાયેલ ફ્લક્સ $N_1\Phi_1$ ગણી શકીએ છીએ, કારણ કે અંદરનો સૉલેનોઇડ બાહ્ય સૉલેનોઇડના કારણે ઉદ્‌ભવતા સમાન ચુંબકીયક્ષેત્રમાં અસરકારક રીતે સંપૂર્ણપણે રહેલ છે. આ કિસ્સામાં M_{12}ની ગણતરી સરળ હશે. જો કે, બાહ્ય સૉલેનોઇડ સાથે સંકળાયેલ ફ્લક્સની ગણતરી કરવી અત્યંત મુશ્કેલ હશે કારણ કે અંદરના સૉલેનોઇડને લીધે બાહ્ય સૉલેનોઇડની લંબાઈ પર તેમજ આડછેદમાં ચુંબકીયક્ષેત્ર બદલાય છે. તેથી, આ M_{21}ની ગણતરી પણ આ કિસ્સામાં અત્યંત મુશ્કેલ હશે. આવી પરિસ્થિતિઓમાં સમાનતા $M_{12}=M_{21}$ ખૂબ ઉપયોગી છે.

આપણે ઉપરના ઉદાહરણમાં સૉલેનોઇડની અંદરના માધ્યમને હવા ગણીને સમજાવ્યું છે. તેના બદલે, જો કોઈ સાપેક્ષ પરમીએબિલિટી μ_rવાળું માધ્યમ હાજર હોત, તો અન્યોન્ય પ્રેરકત્વ

$$M = \mu_r \mu_0 n_1 n_2 \pi r_1^2 l$$

હશે. એ જાણવું પણ મહત્ત્વનું છે કે ગૂંચળા, સૉલેનોઇડ્સ, વગેરેની એક જોડીનું અન્યોન્ય પ્રેરકત્વ, તેમની વચ્ચેના અંતર તેમજ તેમના સાપેક્ષ નમન પર આધારિત છે.

ઉદાહરણ 6.9 બે સમકેન્દ્રિત ગોળાકાર ગૂંચળા, એક નાની ત્રિજ્યા $\mathbf{r}_1$નું અને બીજું મોટી ત્રિજ્યા $\mathbf{r}_2$નું કે જ્યાં, $\mathbf{r}_1 << \mathbf{r}_2$ને કેન્દ્રો સંપાત થાય તેમ સમઅક્ષીય મૂકવામાં આવેલ છે. આ ગોઠવણનું અન્યોન્ય પ્રેરકત્વ મેળવો.

ઉકેલ

બાહ્ય ગોળાકાર ગૂંચળામાં વિદ્યુતપ્રવાહ I_2 વહે છે તેમ લો. આ ગૂંચળાના કેન્દ્રમાં ક્ષેત્ર $B_2 = \mu_0 I_2/2r_2$ છે. બીજું સમઅક્ષીય ગૂંચળું ખૂબ નાની ત્રિજ્યાનું હોવાના કારણે, B_2ને તેના આડછેદના ક્ષેત્રફળ પર સમાન ગણી શકાય. તેથી,

$$\Phi_1 = \pi r_1^2 B_2 = \frac{\mu_0 \pi r_1^2}{2r_2} I_2 = M_{12} I_2$$

આમ,

$$M_{12} = \frac{\mu_0 \pi r_1^2}{2r_2}$$

સમીકરણ (6.14) પરથી

$$M_{12} = M_{21} = \frac{\mu_0 \pi r_1^2}{2r_2}$$

નોંધો કે, આપણે ચુંબકીયક્ષેત્ર B_2ને πr_1^2 ક્ષેત્રફળ પર સમાન ધારીને Φ_1ની આશરે કિંમતથી M_{12}ની ગણતરી કરી છે. તેમ છતાં, આપણે આ મૂલ્ય સ્વીકારી શકીએ છીએ કારણ કે $r_1 << r_2$.

ઉદાહરણ 6.9

હવે, આપણે પરિચ્છેદ 6.2નો પ્રયોગ-6.3 યાદ કરીએ. તે પ્રયોગમાં, જ્યારે ગૂંચળા C_2માંથી વહેતા વિદ્યુતપ્રવાહમાં કોઈ ફેરફાર થતો હતો ત્યારે ગૂંચળા C_1માં *emf* પ્રેરિત થતું હતું. જ્યારે ગૂંચળા C_2માં પ્રવાહ I_2 વહેતો હોય ત્યારે ગૂંચળા C_1 (N_1 આંટાવાળું માનો) સાથે સંકળાયેલ ફ્લક્સ Φ_1 લો.

સમીકરણ (6.9) પરથી,

$$N_1\Phi_1 = MI_2$$

મળે. સમય સાથે બદલાતાં પ્રવાહ માટે,

$$\frac{d(N_1\Phi_1)}{dt} = \frac{d(MI_2)}{dt}$$

ગૂંચળા C_1માં પ્રેરિત *emf*

$$\varepsilon_1 = -\frac{d(N_1\Phi_1)}{dt}$$

હોવાથી આપણને

$$\varepsilon_1 = -M\frac{dI_2}{dt}$$ મળશે.

આ દર્શાવે છે કે ગૂંચળામાં બદલાતો વિદ્યુતપ્રવાહ નજીકમાં રહેલ ગૂંચળામાં *emf* પ્રેરિત કરી શકે છે. આ પ્રેરિત emfનું મૂલ્ય વિદ્યુતપ્રવાહના ફેરફારના દર અને આ બે ગૂંચળાના અન્યોન્ય પ્રેરકત્વ પર આધારિત છે.

6.9.2 આત્મ-પ્રેરકત્વ (Self-Inductance)

અગાઉના પેટા-વિભાગમાં, આપણે એક સૉલેનોઇડમાં બીજા સૉલેનોઇડના વિદ્યુતપ્રવાહને કારણે ઉત્પન્ન થતું ફ્લક્સ લીધું હતું. એ પણ શક્ય છે કે કોઈ એક અલગ કરેલાં ગૂંચળામાં, તેમાંથી જ વહેતા પ્રવાહમાં ફેરફાર કરીને થતા ફ્લક્સના ફેરફારથી પણ તેમાં *emf* પ્રેરિત થાય. આ ઘટનાને *આત્મ-પ્રેરણ* કહેવામાં આવે છે. આ કિસ્સામાં, N આંટાવાળા ગૂંચળા સાથે સંકળાયેલ ફ્લક્સ એ ગૂંચળામાંના વિદ્યુતપ્રવાહના સમપ્રમાણમાં હોય છે અને તેને

$$N\Phi_B \propto I$$

$$N\Phi_B = LI \tag{6.15}$$

વડે દર્શાવવામાં આવે છે. જ્યાં, સમપ્રમાણ અચળાંક Lને ગૂંચળાનું *આત્મ-પ્રેરકત્વ* કહેવામાં આવે છે. તેને ગૂંચળાનો *આત્મ-પ્રેરણ અચળાંક* પણ કહેવાય છે. જ્યારે વિદ્યુતપ્રવાહ બદલાય છે ત્યારે ગૂંચળા સાથે સંકળાયેલ ફ્લક્સ પણ બદલાય છે અને ગૂંચળામાં emf પ્રેરિત થાય છે. સમીકરણ (6.15)નો ઉપયોગ કરીને, પ્રેરિત emfને

$$\varepsilon = -\frac{d(N\Phi_B)}{dt}$$

$$\varepsilon = -L\frac{dI}{dt} \tag{6.16}$$

દ્વારા આપવામાં આવે છે.

આમ, આત્મ-પ્રેરિત *emf* ગૂંચળામાં વિદ્યુતપ્રવાહના કોઈ પણ ફેરફાર (વધારો અથવા ઘટાડો)નો હંમેશાં વિરોધ કરે છે.

સરળ ભૂમિતિ સાથેના પરિપથો માટે આત્મ-પ્રેરકત્વની ગણતરી કરવી શક્ય છે. આપણે આડછેદનું ક્ષેત્રફળ A, લંબાઈ l અને એકમ લંબાઈ દીઠ n આંટા ધરાવતા એક લાંબા સૉલેનોઇડના આત્મ-પ્રેરકત્વની ગણતરી કરીએ. આ સૉલેનોઇડમાં વહેતા પ્રવાહ Iના કારણે ચુંબકીયક્ષેત્ર $B = \mu_0 nI$ (અગાઉની જેમ ધાર (છેડા)ની અસરોની અવગણના કરતાં) છે. આ સૉલેનોઇડ સાથે સંકળાયેલ કુલ ફ્લક્સ,

$$N\Phi_B = (nl)(\mu_0 nI)(A)$$

$$= \mu_0 n^2 AlI$$

છે જ્યાં, nl એ આંટાઓની કુલ સંખ્યા છે. આમ, આત્મ-પ્રેરકત્વ

$$L = \frac{N\Phi_B}{I}$$

$$= \mu_0 n^2 Al \tag{6.17}$$

છે. જો આપણે સૉલેનોઇડની અંદર સાપેક્ષ પરમીએબિલિટી μ_r વાળું દ્રવ્ય ભરીએ (ઉદાહરણ તરીકે, નરમ લોખંડ, જે સાપેક્ષ પરમીએબિલિટીનું ઉચ્ચ મૂલ્ય ધરાવે છે), તો

$$L = \mu_r \mu_0 n^2 Al \tag{6.18}$$

આમ ગૂંચળાનું આત્મ-પ્રેરકત્વ તેની ભૂમિતિ પર અને માધ્યમની પરમીએબિલિટી પર આધારીત છે.

આત્મ-પ્રેરિત emf ને Back emf (*પ્રતિ* emf) તરીકે પણ ઓળખવામાં આવે છે, કારણ કે તે પરિપથમાં પ્રવાહમાં થતાં કોઇ પણ ફેરફારનો વિરોધ કરે છે. ભૌતિક રીતે, આત્મ-પ્રેરકત્વએ જડત્વની ભૂમિકા ભજવે છે. તે યંત્રશાસ્ત્રમાંના દ્રવ્યમાનનું વિદ્યુતચુંબકીય સમતુલ્ય છે. તેથી, પ્રવાહ પ્રસ્થાપિત કરવા માટે બેક emf (ε) વિરુદ્ધ કાર્ય કરવાની જરૂર પડે છે. આ રીતે કરવામાં આવેલ કાર્ય એ ચુંબકીય સ્થિતિઊર્જા તરીકે સંગ્રહિત થાય છે. કોઈ પણ ક્ષણે પરિપથમાં પ્રવાહ I માટે, કાર્ય થવાનો દર

$$\frac{dW}{dt} = |\varepsilon| I$$

છે. જો આપણે અવરોધકીય વ્યયની અવગણના કરીએ અને માત્ર પ્રેરણની (Inductive) અસરને જ ધ્યાનમાં લઇએ, તો સમીકરણ (6.16)નો ઉપયોગ કરીને,

$$\frac{dW}{dt} = L I \frac{dI}{dt}$$

પ્રવાહ Iને પ્રસ્થાપિત કરવા માટે કરવામાં આવેલ કાર્યનો કુલ જથ્થો

$$W = \int dW = \int_0^I LI\, dI$$

છે. આમ, પ્રવાહ I પ્રસ્થાપિત કરવા માટે જરૂરી ઊર્જા

$$W = \frac{1}{2} Li^2 \tag{6.19}$$

છે. આ સૂત્ર આપણને m દ્રવ્યમાન ધરાવતા કણની (યાંત્રિક) ગતિઊર્જા માટે $mv^2/2$ની યાદ અપાવે છે અને દર્શાવે છે કે L એ mને સમતુલ્ય છે (એટલે કે, L એ વિદ્યુત જડત્વ છે અને પરિપથમાં પ્રવાહની વૃદ્ધિ (વધારા) અને ક્ષયનો (ઘટાડાનો) વિરોધ કરે છે).

નજીક રહેલ બે ગૂંચળામાં કોઈ એક સમયે વહેતા પ્રવાહોનો એક સામાન્ય કિસ્સો ધ્યાનમાં લો. એક ગૂંચળા સાથે સંકળાયેલ ફ્લક્સ સ્વતંત્ર રીતે અસ્તિત્વ ધરાવતાં બે ફ્લક્સના સરવાળા જેટલું હશે.

આમ, સમીકરણ (6.9)

$$N_1 \Phi_1 = M_{11} I_1 + M_{12} I_2$$

પ્રમાણે બદલાશે. જ્યાં M_{11} તે જ ગૂંચળાને કારણે પ્રેરકત્વ રજૂ કરે છે.

તેથી ફેરેડેના નિયમનો ઉપયોગ કરીને,

$$\varepsilon_1 = -M_{11} \frac{dI_1}{dt} - M_{12} \frac{dI_2}{dt}$$

અહીં M_{11} *આત્મ-પ્રેરકત્વ* છે અને તે L_1 તરીકે લખાય છે. તેથી,

$$\varepsilon_1 = -L_1 \frac{dI_1}{dt} - M_{12}\frac{dI_2}{dt}$$

ઉદાહરણ 6.10 (a) ચુંબકીયક્ષેત્ર B, ક્ષેત્રફળ A અને સૉલેનોઇડની લંબાઈ *l* ના પદમાં સૉલેનોઇડમાં સંગ્રહિત ચુંબકીય ઊર્જા માટેનું સૂત્ર મેળવો. (b) આ ચુંબકીય ઊર્જાને કેપેસીટરમાં સંગ્રહિત સ્થિત વિદ્યુત (Electrostatic) ઊર્જાની સાથે કેવી રીતે સરખાવી શકાય છે ?

ઉકેલ

(a) સમીકરણ (6.19) પરથી, ચુંબકીય ઊર્જા

$$U_B = \frac{1}{2}Li^2$$

$$= \frac{1}{2}L\left(\frac{B}{\mu_0 n}\right)^2 \quad \text{(કારણ કે સૉલેનોઇડ માટે } B = \mu_0 nI)$$

$$= \frac{1}{2}(\mu_0 n^2 Al)\left(\frac{B}{\mu_0 n}\right)^2 \quad \text{(સમીકરણ (6.17) પરથી)}$$

$$= \frac{1}{2\mu_0}B^2 Al$$

(b) એકમ કદ દીઠ ચુંબકીય ઊર્જા

$$u_B = \frac{U_B}{V} \quad \text{(જ્યાં V એ ફ્લક્સ ધરાવતું કદ છે.)}$$

$$= \frac{U_B}{Al}$$

$$= \frac{B^2}{2\mu_0} \qquad (6.20)$$

આપણે અગાઉ સમાંતર પ્લેટ કેપેસીટરમાં એકમ કદ દીઠ સંગ્રહિત સ્થિતવિદ્યુત (ઇલૅક્ટ્રોસ્ટેટિક) ઊર્જાનું સૂત્ર મેળવેલ છે. (પ્રકરણ-2, સમીકરણ 2.77નો સંદર્ભ લો).

$$u_E = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 \qquad (2.77)$$

આ બંને કિસ્સાઓમાં ઊર્જા એ ક્ષેત્રની તીવ્રતાના વર્ગના સમપ્રમાણ છે. સમીકરણો (6.20) અને (2.77)એ અનુક્રમે સૉલેનોઇડ અને સમાંતર પ્લેટ કેપેસીટરના વિશિષ્ટ કિસ્સાઓ માટે તારવવામાં આવ્યા છે. પરંતુ તે અવકાશના કોઈ પણ વિસ્તાર માટે વ્યાપક અને સત્ય છે કે જેમાં ચુંબકીયક્ષેત્ર અથવા/અને વિદ્યુતક્ષેત્ર અસ્તિત્વ ધરાવે છે.

ઉદાહરણ 6.10

PHYSICS

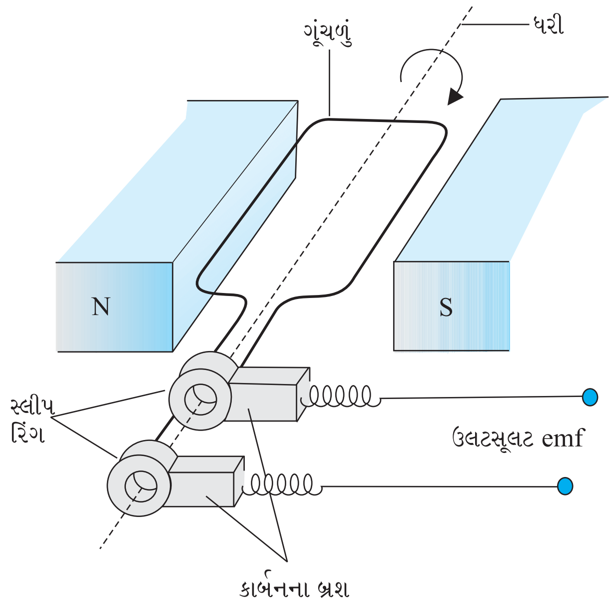
Interactive animation on ac generator :
http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/generator/ac.html

6.10 AC જનરેટર (AC GENERATOR)

વિદ્યુતચુંબકીય પ્રેરણની ઘટનાને તક્નિકી રીતે ઘણી બધી રીતે ઉપયોગમાં લેવામાં આવી છે. અત્યંત મહત્ત્વપૂર્ણ ઉપયોગ એ ઓલ્ટરનેટિંગ કરંટ (ac)નું ઉત્પાદન છે. 100 MWની લાક્ષણિક ઉત્પાદન ક્ષમતા ધરાવતા આધુનિક ac જનરેટર અત્યંત વિકસિત યંત્ર છે. આ પરિચ્છેદમાં, આપણે આ યંત્ર પાછળના મૂળભૂત સિદ્ધાંતોનું વર્ણન કરીશું. યુગોસ્લાવિયાના શોધક નિકોલા ટેસ્લાને આ યંત્રના વિકાસનો શ્રેય આપવામાં આવે છે. પરિચ્છેદ 6.3માં જેમ નિર્દેશ કરવામાં આવ્યો છે, કે *emf* પ્રેરિત કરવા માટે ગાળાના નમનમાં ફેરફાર અથવા તેના અસરકારક ક્ષેત્રફળમાં ફેરફાર કરવો એ

એક પદ્ધતિ છે. ગૂંચળું ચુંબકીયક્ષેત્ર **B**માં ભ્રમણ કરે છે, ત્યારે આ ગાળાનું અસરકારક ક્ષેત્રફળ (ક્ષેત્રને લંબ સપાટી) A cosθ છે, જ્યાં θ એ **A** અને **B** વચ્ચેનો ખૂણો છે. ફ્લક્સ ફેરફાર ઉત્પન્ન કરવાની આ પદ્ધતિ એ સરળ ac જનરેટરના કાર્યનો સિદ્ધાંત છે. ac જનરેટરએ યાંત્રિક ઊર્જાને વિદ્યુત ઊર્જામાં રૂપાંતરિત કરે છે.

ac જનરેટરના મૂળભૂત ભાગો આકૃતિ 6.16માં દર્શાવવામાં આવ્યા છે. તે રોટર શાફ્ટ પર જડિત એક ગૂંચળુ ધરાવે છે. આ ગૂંચળાના પરિભ્રમણની અક્ષ ચુંબકીયક્ષેત્રની દિશાને લંબ હોય છે. આ ગૂંચળા (જેને આર્મેચર કહેવાય છે) ને યાંત્રિક રીતે કોઈ બાહ્ય માધ્યમ દ્વારા એકસમાન ચુંબકીયક્ષેત્રમાં ભ્રમણ કરાવવામાં આવે છે. આ ગૂંચળાનું પરિભ્રમણ એ તેને સંલગ્ન ચુંબકીય ફ્લક્સમાં ફેરફારનું કારણ બને છે, તેથી આ ગૂંચળામાં *emf* પ્રેરિત થાય છે. આ ગૂંચળાના છેડાઓ સ્લીપ રિંગ અને બ્રશ દ્વારા બાહ્ય પરિપથ સાથે જોડાયેલા હોય છે.



આકૃતિ 6.16 AC જનરેટર

જ્યારે આ ગૂંચળાને ω જેટલી અચળ કોણીય ઝડપ સાથે ભ્રમણ કરાવવામાં આવે છે ત્યારે, કોઈ પણ t ક્ષણે ચુંબકીયક્ષેત્ર સદિશ **B** અને ગૂંચળાના ક્ષેત્રફળ સદિશ **A** વચ્ચેનો કોણ $\theta = \omega t$ ($t = 0$ એ $\theta = 0^\circ$ ધારતાં) છે. પરિણામ રૂપે, ચુંબકીયક્ષેત્ર રેખાઓની સામે રહેતું ગૂંચળાનું અસરકારક ક્ષેત્રફળ સમય સાથે બદલાય છે અને સમીકરણ (6.1) પરથી, કોઈ પણ સમયે ફ્લક્સ

$$\Phi_B = BA\cos\theta = BA\cos\omega t$$

છે. ફેરેડેના નિયમ પરથી, ભ્રમણ કરતાં N આંટાઓવાળા ગૂંચળા માટે પ્રેરિત emf

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi_B}{dt} = -NBA\frac{d}{dt}(\cos\omega t)$$

છે. આમ, emfનું તત્કાલિન મૂલ્ય

$$\varepsilon = NBA\omega\sin\omega t \qquad (6.21)$$

છે. જ્યાં, NBAω એ emfનું મહત્તમ મૂલ્ય છે, જે જ્યારે $\sin\omega t = \pm 1$ થાય ત્યારે મળે છે. જો આપણે NBAωને ε_0 વડે દર્શાવીએ, તો

$$\varepsilon = \varepsilon_0\sin\omega t \qquad (6.22)$$

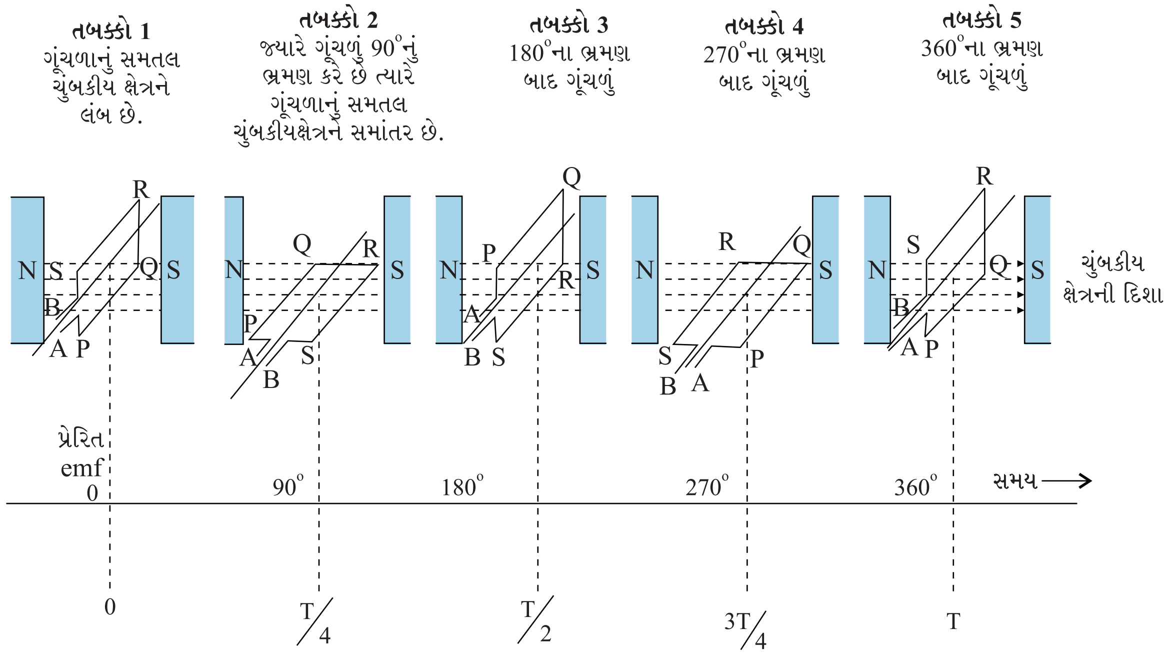
sin વિધેયનું મૂલ્ય +1 અને −1ની વચ્ચે બદલાય છે, તેથી *emf*ની સંજ્ઞા કે દિશા (ધ્રુવત્વ, Polarity) પણ સમય સાથે બદલાય છે. આકૃતિ 6.17 પરથી નોંધો કે જ્યારે $\theta = 90^\circ$ અથવા $\theta = 270^\circ$ હોય છે ત્યારે તેના emf નું મૂલ્ય મહત્તમ પર હોય છે, કારણ કે આ બિંદુઓ આગળ ફ્લક્સમાં ફેરફાર સૌથી મોટો છે.

પ્રવાહની દિશા આવર્ત રીતે બદલાય છે અને તેથી આ વિદ્યુતપ્રવાહને (ઉલટસૂલટ) ઓલ્ટરનેટિંગ પ્રવાહ (ac) કહેવામાં આવે છે. $\omega = 2\pi\nu$ છે, તેથી સમીકરણ (6.22) પરથી

$$\varepsilon = \varepsilon_0\sin 2\pi\nu t \qquad (6.23)$$

લખી શકાય છે. જ્યાં, ν જનરેટરના ગૂંચળાના ભ્રમણની આવૃત્તિ છે.

નોંધો કે, સમીકરણ (6.22) અને (6.23)એ *emf* નું તાત્ક્ષણિક મૂલ્ય આપે છે અને εનું મૂલ્ય આવર્ત રીતે $+\varepsilon_0$ અને $-\varepsilon_0$ની વચ્ચે બદલાય છે. આપણે ઓલ્ટરનેટિંગ વોલ્ટેજ અને પ્રવાહના સમય સરેરાશ મૂલ્ય કેવી રીતે નક્કી કરવા તે આગામી પ્રકરણમાં શીખીશું.



આકૃતિ 6.17 ચુંબકીયક્ષેત્રમાં ભ્રમણ કરતા તારના ગાળા દ્વારા ઓલ્ટરનેટિંગ *emf*નું ઉત્પાદન થાય છે.

વ્યાવસાયિક જનરેટરમાં આર્મેચરને ભ્રમણ કરાવવા માટે જે યાંત્રિક ઊર્જા જરૂરી છે તે ઊંચાઈ પરથી પડી રહેલા પાણી દ્વારા (દા.ત., ડેમમાંથી) પૂરી પાડવામાં આવે છે. આને *હાઈડ્રો-ઈલેક્ટ્રિક જનરેટર* કહેવામાં આવે છે. વૈકલ્પિક રીતે, કોલસો અથવા અન્ય સ્રોતોનો ઉપયોગ કરીને પાણી ગરમ કરી વરાળનું ઉત્પાદન કરવામાં આવે છે. ઉચ્ચ દબાણમાં રહેલ આ વરાળ આર્મેચરમાં પરિભ્રમણ ઉત્પન્ન કરે છે. આને થર્મલ જનરેટર કહેવામાં આવે છે. કોલસાની જગ્યાએ, જો અણુ (ન્યુક્લિયર) બળતણનો ઉપયોગ થાય, તો આપણને *ન્યુક્લિયર પાવર જનરેટર* મળે છે. આધુનિક સમયના જનરેટર 500 MW જેટલો ઉચ્ચ ઈલેક્ટ્રિક પાવર પેદા કરે છે, એટલે કે તે કોઈ 100Wના 50 લાખ બલ્બને પ્રકાશિત કરી શકે છે ! મોટા ભાગના જનરેટર્સમાં, ગૂંચળા સ્થિર રહે છે અને ઈલેક્ટ્રોમેગ્નેટ્સને ભ્રમણ કરાવવામાં આવે છે. આ પરિભ્રમણની આવૃત્તિ ભારતમાં 50 Hzની છે. યુએસએ જેવા અમુક દેશોમાં, તે 60 Hz છે.

ઉદાહરણ 6.11

ઉદાહરણ 6.11 કમલા એક સ્થિર સાયકલને પેડલ મારે છે. આ સાયકલના પેડલ્સ 100 આંટાઓ અને 0.10 m^2 ક્ષેત્રફળ ધરાવતા ગૂંચળા સાથે જોડાયેલા છે. આ ગૂંચળું અડધા આંટા પ્રતિ સેકન્ડથી ભ્રમણ કરે છે અને તે ગૂંચળાના પરિભ્રમણની ધરીને લંબરૂપ 0.01 Tના ચુંબકીયક્ષેત્રમાં મૂકવામાં આવેલ છે. આ ગૂંચળામાં પેદા થતો મહત્તમ વોલ્ટેજ શું હશે ?

ઉકેલ અહીં $\nu = 0.5$ Hz; $N = 100$, $A = 0.1\ m^2$ અને $B = 0.01$ T છે. સમીકરણ (6.21)નો ઉપયોગ કરીને

$$\varepsilon = NBA(2\pi\nu)$$
$$= 100 \times 0.01 \times 0.1 \times 2 \times 3.14 \times 0.5$$
$$= 0.314\ V$$

મહત્તમ વૉલ્ટેજ 0.314 V છે.

અમે તમને વીજ ઉત્પાદન માટેના આવા વૈકલ્પિક વિકલ્પોની શોધ કરવા આહ્‌વાન કરીએ છીએ.