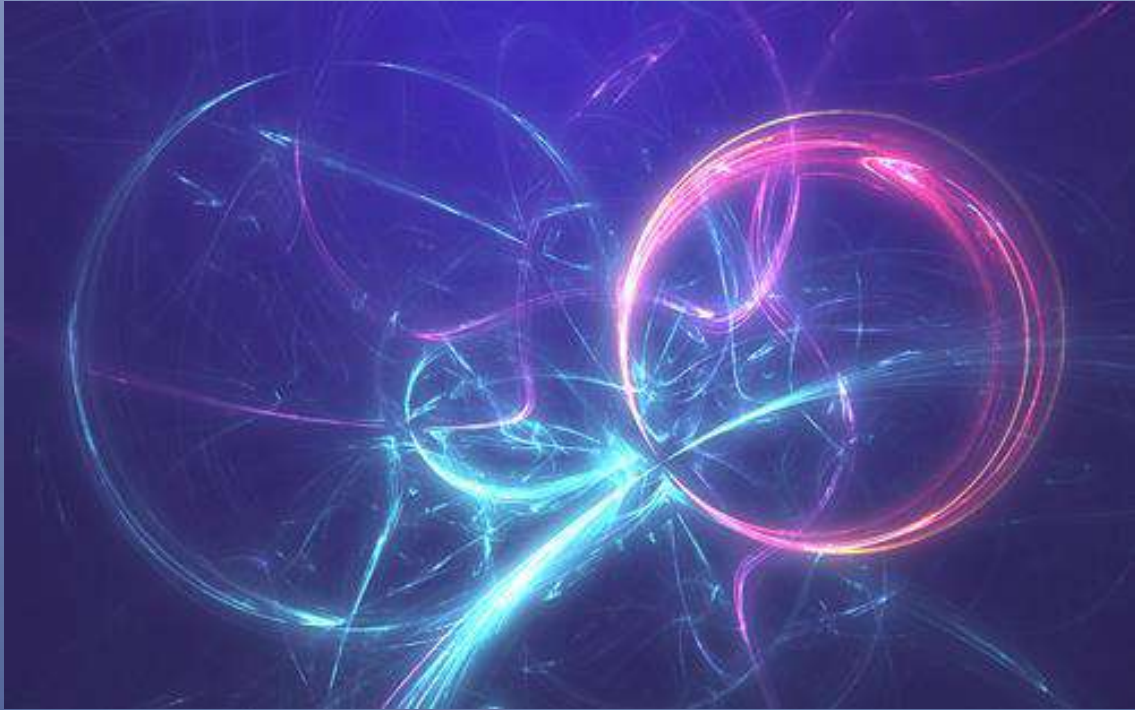


Treball de Recerca



ELECTROMAGNETISME

Ferran Iglesias Cels

2n de Batxillerat A

Tutora: Fina Graboleda

INS Pere Alsius i Torrent

Banyoles, 9 d'octubre de 2017

AGRAÏMENTS

Aquest treball ha estat possible gràcies a les aportacions de varies persones i entitats. Vull agrair especialment a la professora Fina Graboleda el guiatge i orientació en la tutorització d'aquest treball; a la UdG i en concret al projecte Jove Campus de Recerca per la seva ajuda en la part pràctica lliurant material per a poder-la realitzar correctament.

També vull agrair a un munt de familiars i amics que no han intervingut directament en el treball de recerca, però han participat en el meu dia a dia durant tot aquest període.



ÍNDEX

AGRAÏMENTS	2
Motivació i objectius	3
Metodologia	3
1. QUATRE NOCIONS D'ELECTROMAGNETISME	4
1.1 Introducció històrica	4
1.2 Sobre el camp elèctric	6
1.2.1 La llei de Coulomb	6
1.2.2 El camp elèctric	7
1.2.3 Línies de força del camp elèctric	7
1.3 Molècules polars	8
2. FLUX ELÈCTRIC I LA LLEI DE GAUSS	9
2.1 Flux elèctric	9
2.2 Llei de Gauss	10
3. EL POTENCIAL ELÈCTRIC	10
3.1 Diferència de potencial	10
3.2 Les superfícies equipotencials	11
4. CORRENT ELÈCTRIC	12
4.1 La Llei d'Ohm i la resistència	12
4.2 Circuits de corrent continu	13
4.2.1 Resistències en sèrie	13
4.2.2 Resistències en paral·lel	13
5. L'ELECTRICITAT EN L'ATMOSFERA	14
5.1 Tempestes elèctriques	16
6. EL MAGNETISME	17
6.1 El camp magnètic (B)	19
6.2 Imants a l'interior de camps magnètics	20
6.3 Moviment d'una càrrega puntual situada a l'interior d'un camp magnètic	21
7. FONTS DEL CAMP MAGNÈTIC	23
7.1 Llei de Biot-Savart	24
7.2 Llei d'Ampère	24
7.3 Llei de Faraday	25
7.4 Betatró	26
8. MAGNETISME EN LA MATÈRIA	27
8.1 Intensitat magnètica H	29
8.2 Susceptibilitat i permeabilitat magnètiques	30



8.3 Paramagnetisme	32
8.4 Diamagnetisme	32
8.5 Ferromagnetisme	32
9. LES EQUACIONS DE MAXWELL I ONES ELECTROMAGNÈTIQUES	33
9.1 Les equacions de Maxwell	34
10. JAMES CLERK MAXWELL (1831-1879)	35
11. ENERGIA DEL CAMP	39
11.1 Conservació de l'energia i electromagnetisme	41
12. CORRENTS INDUÏDES	42
12.1 Motors i generadors	42
12.2 El principi del telègraf	44
12.3 La tecnologia elèctrica	45
13. CONSTANTS FÍSQUES	46
14. PART PRÀCTICA	47
Pràctica 1: El deflector	47
Pràctica 2: Màquina de moviment perpetu amb imants	55
Pràctica 3: Observació del camp magnètic	58
15. CONCLUSIONS	61
BIBLIOGRAFIA	63
INFOGRAFIA	64



Motivació i objectius

Estudiar les lleis que regeixen l'electromagnetisme és una idea que em va sorgir fa temps enrere. Tenia entre dotze i tretze anys, cursava 1r o 2n d'ESO i en una classe de tecnologia vam fer una pràctica que demostrava la relació entre l'electricitat i el magnetisme. Aquest tema tot i tractar-lo superficialment em va sorprendre molt i em vaig quedar amb les ganes d'aprofundir-hi. Però, amb el temps, van anar desapareixent.

L'electromagnetisme no va ser una de les meves primeres opcions, però el que sabia segur era que volia fer el treball de recerca relacionat en l'àmbit de la física. No tenia cap idea clara ni cap tema en concret que m'interessés en especial. Però un dia, vaig posar els ulls sobre un imant que tenia a prop i es van esvaïr els dubtes. Vaig tenir un flaix-bac de les classes de tecnologia en les que realitzàvem aquella pràctica i la sensació de voler-ne saber més va ressorgir.

Els objectius d'aquest treball són:

- Conèixer, entendre i aprofundir en les lleis de l'electromagnetisme, desenvolupar més en la part del magnetisme i no tant en la de l'electricitat ja que crec que és la més interessant de les dues.
- Posar a prova la interacció de camps magnètics i elèctrics sobre un mateix feix de partícules carregades elèctricament.
- Falsejar la teoria que diu que les màquines de moviment perpetu, impulsades per imants, no existeixen.
- Observar el camp magnètic, en dues dimensions, amb imants de diferents intensitats magnètiques per comparar la força que exerceixen sobre llimadures de ferro.

Metodologia

Aquest treball constarà de dues parts. En la part teòrica, s'exposarà per separat l'electricitat i el magnetisme aprofundint més en el magnetisme. Per realitzar-la s'obtindrà informació de diverses fonts bibliogràfiques i de l'aportada per diversos professors de l'institut i de la UdG.

En la segona part, la pràctica, s'aplicaran algunes de les lleis de l'electromagnetisme en alguns experiments. Per realitzar la part pràctica s'ha comptat amb l'ajuda de la Universitat de Girona, concretament en la participació en el projecte Jove Campus de Recerca. Durant el projecte es va cedir material per poder realitzar l'estudi de la interacció de partícules carregades elèctricament amb camps magnètics i elèctrics uniformes amb aparells com el deflector.



1. QUATRE NOIONS D'ELECTROMAGNETISME

1.1 Introducció històrica

Si es ressegueix la història, s'observa que el coneixement sobre l'electromagnetisme s'inicia a l'antiga Grècia i va evolucionant tot incorporant-ne les noves descobertes fins els nostres dies. Així:

- Les primeres observacions sobre l'atracció elèctrica van ser a l'antiga Grècia. El filòsof grec Tales de Milet (640-546 aC) va observar que, quan es fregava ambre, atreia objectes petits com plomes o trossos de palla. Aquesta atracció es va confondre sovint amb l'atracció magnètica del ferro per la pedra imant.
- Fins el segle XVI gairebé no se sabia res dels fenòmens elèctrics, quan el filòsof anglès William Gilbert (1540-1603) va estudiar sistemàticament els efectes elèctrics i els magnètics. Gilbert va demostrar que moltes substàncies diferents a l'ambre adquirien una propietat atractiva quan es fregaven. Va ser un dels primers que va entendre clarament la diferència entre atracció elèctrica i pols magnètics. Gilbert és més conegut pel seu descobriment sobre el fet que el comportament de l'agulla d'una brúixola es deu a que la Terra és un gran imant amb pols nord i sud. Per tant, l'orientació de l'agulla d'una brúixola a la Terra és simplement un exemple del fenomen general d'atracció o repulsió dels imants.
- Pels volts del 1729 l'anglès Stephen Gray va descobrir que l'atracció i repulsió elèctrica poden transferir-se d'un cos a un altre si els dos es connecten mitjançant determinades substàncies, en especial els metalls. Aquest descobriment va ser de gran importància, ja que prèviament els experimentadors només podien electrificar un objecte fregant-lo. El descobriment de la conducció elèctrica també implicava que l'electricitat té una existència per sí mateixa i no és només una propietat imposada a un cos pel fregament.
- L'existència de dos tipus d'electricitat va ser suggerida per Charles François Du Fay (1698-1739). Aquest científic va descriure un experiment en el qual una petita làmina d'or és atreta per una vareta de vidre prèviament fregada. Quan la làmina d'or adquiria la "virtut elèctrica", llavors repel·lia el vidre. "És cert que els cossos que han resultat elèctrics per contacte es repel·len per aquells que han causat aquest efecte; però també es repel·len de manera semblant per altres cossos electrificats de diverses maneres?" Du Fay va respondre a aquesta pregunta observant que la làmina d'or que es repel·lia per la vareta de vidre s'atreia per ambre electrificat. Si la



làmina d'or s'electrifica tocant-la amb ambre electrificat, llavors es repel·lia per l'ambre i s'atreia per la vareta de vidre electrificada. Va donar als dos tipus d'electricitat els noms de vítria i resinosa i va postular l'existència de dos fluids que es separen per fregament i es neutralitzen quan es combinen.

- El 1747 Benjamín Franklin va proposar un model d'electricitat d'un sol fluid amb l'experiment següent: si una persona A que està de peus sobre un bloc de cera (per aïllar-se del terra) frega un tub de vidre amb petits trossos de mocador de seda i una altre persona B, també de peu sobre cera, toca el tub de vidre, tant A com B resulten electrificats. Els dos poden fer saltar una guspira fina a una persona C situada sobre el terra. Però, si A i B es toquen entre sí abans de tocar a C, es neutralitza la electricitat de A i B. Franklin va proposar que tots els cossos tenen una quantitat d'electricitat "normal". Quan un cos es frega amb una altra part d'un altre cos l'electricitat es transfereix d'un cos a un altre; així doncs un té un excés i l'altre una deficiència de valor igual. L'excés i la deficiència es poden escriure amb els signes més i menys. Una important característica del model de Franklin és la implicació de la conservació de l'electricitat, ara coneguda com "Llei de conservació de la càrrega". La càrrega elèctrica no es crea pel fregament; simplement es transfereix. La selecció que va fer Franklin dels signes va ser poc afortunada, perquè ara sabem que són els electrons els que es transfereixen en el procés de fregament i tenen una càrrega negativa, per tant, quan es transfereix una càrrega (positiva) des d'un cos A a un cos B, en realitat el que passa és que els electrons es transfereixen des del cos B al cos A. En un dels experiments que va fer Franklin va observar que unes petites boles de suro situades a l'interior d'una copa metàl·lica semblava que l'electricitat de la copa no les afectava en absolut. Llavors li va demanar al seu amic Joseph Priestley (1733-1804) que comprovés aquest fet i Priestley va realitzar varis experiments que van demostrar que no existeix cap electricitat en la superfície interior d'una copa metàl·lica buida. A partir d'aquest resultat Priestley va deduir correctament que la força entre dues càrregues varia proporcionalment a l'invers del quadrat de la distància entre elles. La llei de les forces inversament proporcionals al quadrat de la distància corresponent a l'electricitat, la va confirmar Charles Coulomb (1736-1806) amb els seus experiments.
- En el segle XIX hi va haver un creixement molt ràpid dels coneixements sobre la electricitat i el magnetisme, culminant amb els grans experiments de Michael Faraday (1791-1867) i la teoria matemàtica de James Clerk Maxwell (1831-1879).



Es poden resumir les descobertes posteriors amb aquestes tres idees claus:

- 1.- La càrrega es conserva.
- 2.- La càrrega està quantitzada.
- 3.- La força entre dues càrregues puntuals varia de manera inversament proporcional al quadrat de la distància entre elles.

Es pot dir que hi ha dues classes de “matèria” que es poden anomenar positiva i negativa. Si són de la mateixa classe es repel·leixen i si són de classe diferent s’atrauen, llavors, un conjunt d’elements positius es repel·liran amb una força enorme i s’escamparan en totes direccions. A un conjunt d’elements negatius els hi passarà el mateix. Però una barreja d’elements positius i negatius es comporta d’una forma totalment diferent. Els elements oposats es mantindran junts per una força enorme d’atracció. El resultat serà que aquestes forces s’equilibraran perfectament entre elles formant una mescla d’elements positius i negatius.

Una força d’aquest tipus és la força elèctrica. Tota la matèria és una mescla de protons positius i d’electrons negatius que s’estan repel·lent i atraient amb una gran força. Hi haurà un equilibri perfecte quan no es senti cap força resultant estant aprop del conjunt. Si hi hagués un lleuger desequilibri de balanç es podria saber. Posem per cas que tenim a un metre de distància algú que tinguis un 1% més d’electrons que de protons, la força de repulsió seria increïble. De quina magnitud? Suficient per aixecar l’edifici Empire State? No. Suficient com per aixecar l’Everest? Tampoc. La repulsió seria suficient per aixecar un pes igual al de la Terra sencera! Les forces químiques que mantenen juntes les molècules, són, en realitat, forces elèctriques.

Les forces elèctriques depenen del moviment de les partícules, una part de la força entre partícules en moviment es denomina força magnètica; que en realitat només és un aspecte d’un efecte elèctric.

1.2 Sobre el camp elèctric

1.2.1 La llei de Coulomb

La llei de Coulomb afirma que: “la força exercida per una càrrega puntual sobre una altra està dirigida al llarg de la línia que les uneix. És repulsiva si les càrregues tenen el mateix signe i és atractiva si les càrregues tenen signes oposats. La força varia inversament amb el



quadrat de la distància que separa les càrregues i és proporcional al valor de cada una de les càrregues”.

La llei de Coulomb es pot escriure com una simple equació vectorial. Q_1 i Q_2 són les càrregues puntuals mesurades amb Coulombs (C) separades per una distància r mesurada amb metres (m). Així doncs, la força exercida per la càrrega Q_1 sobre Q_2 i ve donada per la següent equació:

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad k = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0}$$

on k és una constant que al buit equival a $9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$.

Les unitats de la força resultant són els Newtons (N).

Aquesta equació també diu si la força és d'atracció o de repulsió, si el signe és positiu la càrregues es repel·len i si el signe és negatiu les càrregues s'atrauen.

En un sistema de càrregues, cada una d'elles exerceix una força sobre les altres. La força resultant sobre qualsevol càrrega és la suma de les forces individuals exercides per totes les càrregues del sistema.

1.2.2 El camp elèctric

El camp elèctric es defineix com una sèrie de càrregues puntuals en diversos punts de l'espai i si es col·loca una càrrega (Q_0) en un punt determinat, la força sobre aquesta càrrega serà la suma vectorial de las forces exercides per les càrregues individuals.

$$E = \frac{F}{Q_0} \quad \text{Si definim que } Q_0 = 1\text{C}, \text{ el camp elèctric serà: } E = k \frac{Q}{r^2}$$

Les unitats del SI del camp elèctric són els Newtons per Coulomb (N/C).

1.2.3 Línies de força del camp elèctric

El camp elèctric es representa dibuixant les línies de força per indicar la direcció del camp en qualsevol punt de l'espai. Com que existeixen un número infinit de punts de l'espai per on podem traçar una

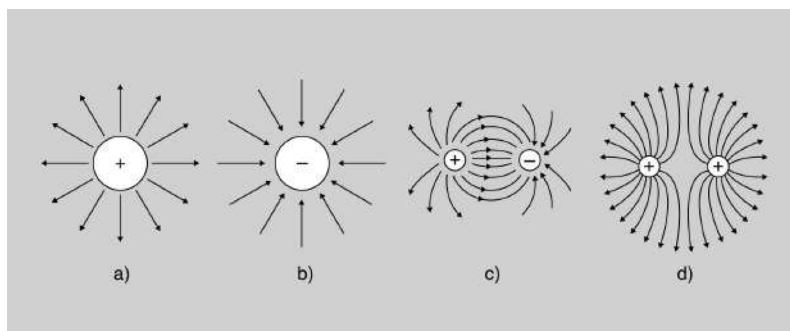


Figura 1



línia, s'escullen algunes línies representatives. Les línies de camp elèctric sempre surten d'una càrrega positiva i acaben en una càrrega negativa. Mai es poden tallar dues línies de camp.

1.3 Molècules polars

Encara que els àtoms i les molècules són elèctricament neutres, es veuen influïdes pels camps elèctrics degut a que contenen càrregues positives i negatives. En algunes molècules, el centre de la càrrega positiva no coincideix amb el centre de la càrrega negativa perquè no contenen el mateix nombre d'electrons que de protons. Aquestes molècules polars, es diu que tenen un moment dipolar elèctric permanent. Quan es col·loca una molècula d'aquest tipus dins un camp elèctric uniforme, no existeix cap força neta sobre la molècula, però apareixen unes forces que la fan girar. En un camp elèctric no uniforme la molècula experimenta l'acció d'una força neta degut a que el camp en el centre de la càrrega positiva és diferent del camp que actua sobre el centre de la càrrega negativa. Un exemple de molècula polar és el NaCl, que és essencialment un ió de sodi positiu de càrrega positiva combinat amb un ió de clor negatiu de càrrega negativa.

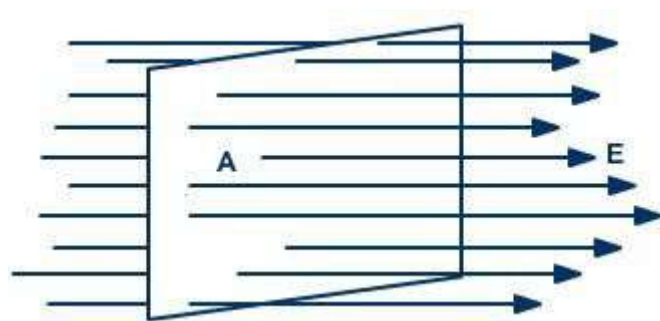
Els àtoms i molècules els centres de càrrega positiva i negativa dels quals coincideixen també es veuen afectats pels camps elèctrics degut a que la força elèctrica sobre la càrrega positiva actua en sentit contrari al de la càrrega negativa, llavors, el camp elèctric tendeix a separar o polaritzar les càrregues. En aquests sistemes apareix un moment dipolar quan estan en l'interior d'un camp elèctric i també es veuen sotmeses a una força neta en un camp elèctric no uniforme. La força produïda per un camp elèctric no uniforme sobre un sistema de càrregues elèctricament neutre és responsable de l'atracció de trossets neutres de paper per un raspall carregat.



2. FLUX ELÈCTRIC I LA LLEI DE GAUSS

2.1 Flux elèctric

El flux elèctric és la magnitud matemàtica relacionada amb el número de línies de força que travessa una superfície determinada.



En aquesta imatge, es mostra un camp elèctric amb un valor i direcció uniforme. El flux elèctric ϕ que travessa una superfície d'àrea A (m^2) que és perpendicular al camp es defineix com el producte del camp E per l'àrea A per l'angle d'incidència

Figura 2

$$\phi = E A \cos\theta$$

Les unitats són els newton-metre² per coulomb ($N \cdot m^2/C$). Com que el camp elèctric és proporcional al número de línies per unitat d'àrea, el flux elèctric és proporcional al número de línies de força que travessen la superfície.

Si el camp elèctric entra perpendicular a la superfície, el flux té un valor màxim, si el camp recorre la superfície paral·lelament, el flux és zero, si el camp travessa la superfície en perpendicular però en sentit contrari, el flux té el seu valor mínim i és negatiu, en canvi, si el camp travessa la superfície amb un cert angle, el flux té valors intermedis.

Normalment s'està interessat en conèixer el flux del camp elèctric a través d'una superfície tancada, és a dir, una superfície que separa l'espai en dues regions, una interior i una altra exterior, com per exemple, una esfera, però s'ha de saber a on té origen el camp elèctric, si és exterior a la superfície o interior a la superfície. Si el camp té origen dins l'esfera, tots els valors del camp sumaran un valor més grans que zero. Si el camp té origen fora de l'esfera, totes les línies de camp que entren també han de sortir, i si se sumen tots els valors, el resultat és zero. El flux entrant és igual i de signe contrari al flux sortint. Això vol dir que sempre que es vulgui mesurar el flux elèctric d'una esfera i el camp elèctric tingui l'origen fora l'esfera, el flux serà nul.



2.2 Llei de Gauss

La llei de Gauss assegura que: “en general, per un sistema de càrregues, el flux net a través de qualsevol superfície S és igual a $4 \cdot \pi \cdot k$ vegades la càrrega neta dins de la superfície.

Matemàticament s'escriu com:

$$\phi_{net} = \oint E \cdot \hat{n} dA = 4 \pi k Q_{dins} \qquad \phi_{net} = \frac{Q_{dins}}{\epsilon_0}$$

3. EL POTENCIAL ELÈCTRIC

El concepte d'energia, de gran importància en l'estudi de la mecànica, és també molt important en l'estudi de la electricitat. La força electrostàtica donada per la Llei de Coulomb és conservativa; és a dir, el treball realitzat sobre una partícula per aquesta força quan la partícula es mou d'un punt fins un altre només depèn de les posicions inicial i final i no de la trajectòria seguida.

3.1 Diferència de potencial

El treball que s'ha de realitzar per moure un cos amb velocitat constant d'un punt a un altre en un camp de força conservatiu és igual a la variació de l'energia potencial del cos. Considerem una càrrega de prova Q_0 en un camp electroestàtic E produït per un sistema de càrregues. La força elèctrica exercida sobre la càrrega és “ $Q \cdot E$ ”. Si es vol moure la càrrega (amb velocitat constant), s'ha d'exercir una força “ $-Q \cdot E$ ” contrària al camp elèctric. Si es mou la càrrega al llarg d'un petit desplaçament $d\mathbf{l}$, el treball realitzat, “ $dW = -Q \cdot E \cdot dl$ ”, és igual a l'increment d'energia potencial de la càrrega de prova. Per tant, la variació de la funció energia potencial “ $dE_{potencial}$ ”, es defineix com:

$$dE_p = -Q_0 E \cdot dl$$

Si la càrrega es desplaça des d'un punt inicial “a” a un punt final “b”, la variació de l'energia potencial ve donada per:

$$E_{p_a} - E_{p_b} = \int_b^a dE_p = - \int_b^a Q_0 E \cdot dl$$



La variació d'energia potencial és proporcional a la càrrega de prova " Q_0 ". La variació d'energia potencial per unitat de càrrega rep el nom de diferència de potencial " ΔV ". Per un desplaçament infinitesimal " dl " s'obté la diferència de potencial a partir de la primera equació dividint-la per " Q_0 ":

$$\Delta V = - \int_a^b E \cdot dl$$

i per un desplaçament finit des d'un punt "a" fins un punt "b":

$$\Delta V = - \int_a^b E \cdot dl$$

La unitat del treball i l'energia és el Joule (J).

La unitat del SI de potencial i diferència de potencial és el Joule per Coulomb i es denomina Volt (V): $1 \text{ V} = 1 \text{ J} / \text{C}$.

Si situem una càrrega de prova positiva en un camp elèctric i la deixem en llibertat, s'accelerarà en la direcció del camp elèctric al llarg de la línia del camp. L'energia cinètica de la càrrega incrementarà i l'energia potencial disminuirà. Per tant, les línies del camp elèctriques senyalen la direcció en la que disminueix el potencial elèctric. Per exemple, en un camp elèctric constant de 10 V/m en la direcció "x", el potencial disminueix en la direcció "x" en 10 V per cada metre.

Si es considera que l'energia potencial i el potencial són nuls a una distància infinita de la càrrega puntual ($r_0 = \infty$), el potencial elèctric és :

$$V = k \cdot \frac{Q}{r}$$

3.2 Les superfícies equipotencials

Hi ha zones en les càrregues on moure una altra càrrega de prova no costa treball i el potencial no varia. Una superfície sobre la qual el potencial elèctric és constant es denomina superfície equipotencial. Les línies del camp elèctric són sempre perpendiculars a una superfície equipotencial.

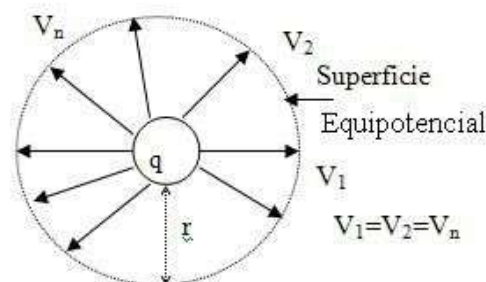


Figura 3



4. CORRENT ELÈCTRIC

Un corrent elèctric és un flux de càrrega elèctrica que passa per un punt determinat. Encara que el flux de càrrega sigui sovint dins un conductor, es defineix el corrent elèctric **I** com la quantitat de càrrega que flueix a través de l'àrea d'una secció recta d'un conductor per unitat de temps. Matemàticament, s'expressa com:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad \text{La unitat del SI per la corrent és l'ampere (A): } 1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$$

4.1 La Llei d'Ohm i la resistència

La Llei d'Ohm estableix que el corrent que travessa un circuit elèctric és directament proporcional a la diferència de potencial que hi ha entre els seus extrems i inversament proporcional a la resistència del circuit. En termes matemàtics la llei s'expressa per mitjà de l'equació:

$$I = \frac{\Delta V}{R} \quad I = \text{Ampere (A)} \quad V = \text{Volts (V)} \quad R = \text{Ohm } (\Omega)$$

on “ ΔV ” és la diferència de potencial i “ I ” és el corrent. L'equació dona com a resultat la constant de proporcionalitat “ R ”, que és la resistència elèctrica del circuit. La resistència d'un conductor depèn de la longitud del conductor, de l'àrea de la seva secció transversal, del tipus de material i de la temperatura, però els materials que obeeixen la Llei d'Ohm no depenen de la intensitat del corrent. Aquests materials s'anomenen òhmics. En els materials òhmics, la resistència d'un conductor és proporcional a la longitud del conductor i inversament proporcional a l'àrea de la secció transversal. La constant de proporcionalitat rep el nom de resistivitat ρ diferent per a cada material i temperatura. La resistència, per tant, s'escriu com:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \rho = \rho_{20} [1 + \alpha(T - 20^\circ\text{C})]$$

Resistivitat ρ = Ohms per metres ($\Omega \cdot \text{m}$)

Temperatura T = °C



4.2 Circuits de corrent continu

Es comentaran alguns circuits senzills compostos per piles o bateries, resistències i condensadors. Es denominen circuits de corrent continu (cc) degut a que la direcció i el sentit del corrent en qualsevol punt del circuit no varia.

4.2.1 Resistències en sèrie

Dos o més resistències connectades de manera que la mateixa càrrega flueix a través de cada una d'elles es diu que estan connectades en sèrie. Les resistències R_1 , R_2 i R_3 són un exemple de resistències en sèrie i compleixen unes normes:

$$I_1 = I_2 = I_3$$

La intensitat mesurada en Amperes (A) que passa per les resistències és igual en totes elles.

$$\Delta V_{123} = \Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_3$$

La diferència de potencial total és la suma de la diferència de potencial de les resistències.

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$$

La resistència equivalent és igual a la suma de totes les resistències.

4.2.2 Resistències en paral·lel

Dues resistències unides com en la imatge es diu que estan connectades en paral·lel ja que la intensitat que passa per cada resistència és diferent i segueix unes normes diferents:

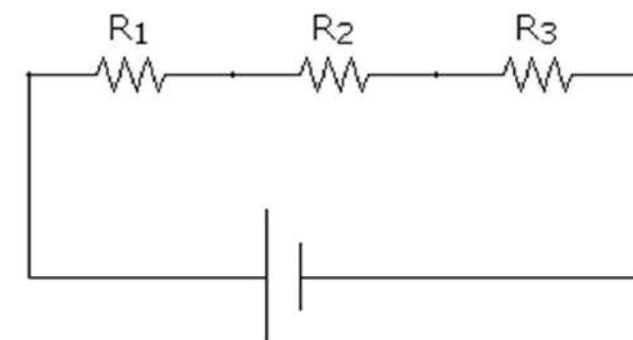


Figura 4

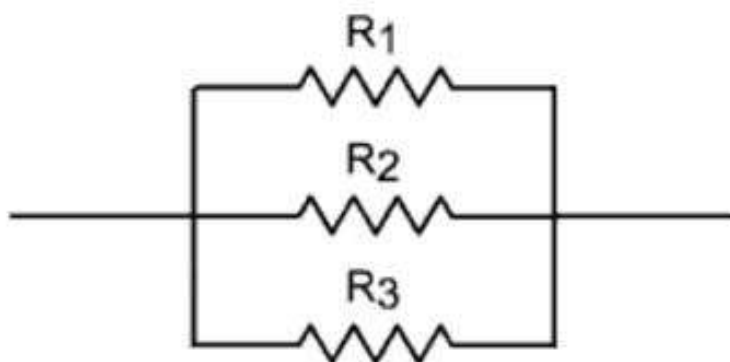


Figura 5



$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

La intensitat que circula per cada resistència és diferent a les altres i la resistència total és la suma de les intensitats que circulen per cada resistència.

$$\Delta V = \Delta V_1 = \Delta V_2 = \Delta V_3$$

La diferència de potencial és la mateixa en totes les resistències.

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

L'invers de la resistència equivalent és la suma de l'invers de totes les resistències.

5. L'ELECTRICITAT EN L'ATMOSFERA

En un dia ordinari en una esplanada, o sobre el mar, quan una persona s'eleva a partir de la superfície terrestre el potencial elèctric augmenta a 100 volts per metre. Existeix, llavors, un camp elèctric vertical **E** de 100 volts/metre en l'aire (Figura 6). Això significa que el potencial a l'altura del nostre cap és gairebé 200 volts més alt que el potencial a l'altura dels peus. Es podria plantejar: per què no s'ubiquen dos electrodes a l'aire a un metre de distància un de l'altre per aprofitar aquests 100 volts com a font d'energia renovable? O també es podria preguntar: si realment existeix una diferència de potencial de 200 volts entre el meu cap i els peus, per què no es rep una descàrrega quan se surt al carrer?

Es respondrà primerament a la segona pregunta. El nostre cos és un conductor relativament bo. Si s'està en contacte amb el terra, nosaltres i el terra tendim a formar una superfície equipotencial. Ordinàriament les equipotencials són paral·leles al terra, però quan ens posem sobre el terra les equipotencials es distorsionen. D'aquesta manera ara hi ha una diferència de potencial quasi nul·la entre el cap i els peus (Figura 6). Hi ha càrregues que es desplacen del terra al cap canviant d'aquesta manera el camp. Algunes es poden neutralitzar pels ions provinents de l'aire, però el corrent d'aquests ions és molt petit degut a que l'aire és un mal conductor.

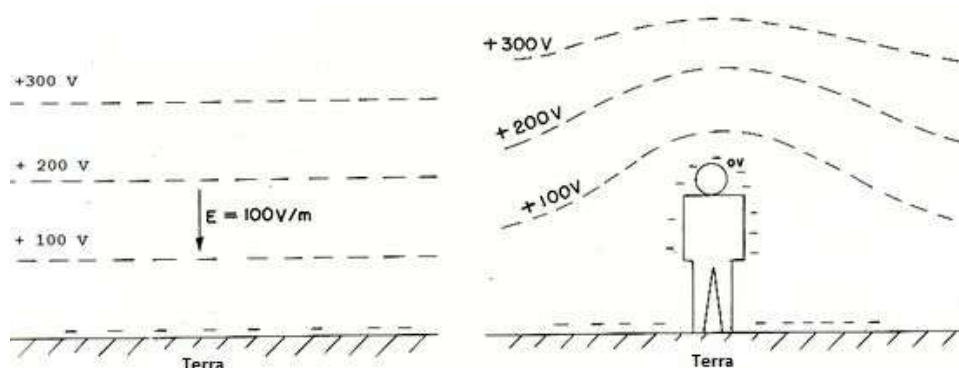


Figura 6



Com és possible calcular un camp d'aquest tipus si el camp es modifica en col·locar-hi qualsevol cosa? Existeixen diverses maneres. Una d'elles consisteix en col·locar un conductor aïllat a certa distància sobre el terra i deixar-lo allà fins que estigui al mateix potencial que l'aire. Si es deixa el suficient temps, la petitíssima conductivitat permetrà que les càrregues abandonin el conductor (o que s'acumulin) fins que adopti el potencial corresponent a la seva altitud. Es pot retornar el conductor al terra i mesurar la diferència de potencial que s'ha produït. Un camí més ràpid consisteix en agafar com a conductor un recipient amb aigua amb un petit forat. Com que l'aigua gotejarà del recipient s'endurà l'excés de càrregues que hi pugui haver i el recipient s'aproximarà al mateix potencial de l'aire (les càrregues resideixen en la superfície i quan les gotes surten del recipient són "trossos

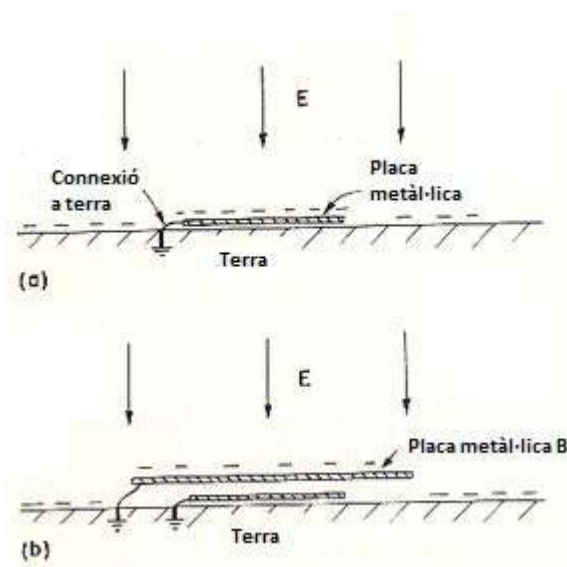


Figura 7

de superfície" que l'abandonen). Es pot mesurar el potencial del recipient amb un electròmetre.

Hi ha una altra forma de calcular directament el gradient de potencial. Com que hi ha un camp elèctric, hi ha una càrrega superficial sobre la terra. Si es col·loca sobre el terra una placa metàl·lica i es fa una connexió amb el terra, apareixeran càrregues negatives sobre la placa. Si es cobreix aquesta placa amb una altra placa *B* connectada al terra, les càrregues apareixeran ara sobre la placa *B* i no hi haurà càrregues en la placa original *A*. Si es mesura la càrrega que flueix des de la placa *A* fins el terra quan es cobreix amb *B* es pot trobar la densitat de càrrega superficial que hi havia en aquell lloc, i en conseqüència, el camp elèctric.

Les mesures indiquen que a mesura que l'altitud és major el camp segueix existint però es torna cada vegada més dèbil. Al voltant dels 50 kilòmetres, el camp és molt petit de manera que la major part de la variació del potencial es produeix a petites altures. La diferència total de potencial des de la superfície de la Terra fins al límit de l'atmosfera és d'uns 400.000 volts.



5.1 Tempestes elèctriques

En primer lloc, una tempesta elèctrica ordinària està composta d'una quantitat de "parcel·les" bastant juntes, però quasi independents entre sí. Llavors és millor analitzar parcel·la per parcel·la. Per "parcel·la" s'entén com una regió amb una superfície límit en direcció horitzontal, en la qual ocorren tots els esdeveniments. És comú trobar varies parcel·les una al costat de l'altra, i en cada una està passant més o menys el mateix, encara que, potser, no al mateix temps. Resulta que en un cert lloc de l'aire, quan es compleixen certes condicions atmosfèriques, com per exemple: ascens general de l'aire amb velocitats cada vegada més grans, refredament i condensació de l'aire tebi i humit provinent de baix. En aquestes condicions no cau ni gotes d'aigua ni neu, perquè les corrents ascendents són suficientment fortes. És la etapa inicial i no la verdadera tempesta elèctrica. Al mateix temps que l'aire tebi puja, arrossega rere seu aire dels costats -punt important deixat de banda durant molts anys-. Així doncs, no és només l'aire de baix que puja sinó també una certa quantitat d'aire dels costats.

El que s'anomena una tempesta elèctrica madura és quan hi ha un corrent ascendent molt ràpid que, en aquesta etapa, puja fins a uns 10.000 a 15.000 metres. Els núvols de tempesta, amb la seva condensació, pugen per sobre del banc general de núvols. A mesura que el vapor arrossegat cap a dalt arriba i es condensa, forma petitíssimes gotes que es refreden ràpidament a temperatures per sota de zero graus. Haurien de congelar-se però no ho fan, es "sobrefreden". És comú que en l'aigua i altres líquids es refredin per sota dels seus punts de congelació abans de cristal·litzar. Únicament si hi ha algun trosset petit de material present, com pot ser un cristall de NaCl, la gota d'aigua es congelarà formant un trosset de gel. Seguidament l'equilibri és tal que les gotes d'aigua s'evaporen i els cristalls de gel creixen. Per tant, en un moment donat hi ha una desaparició ràpida d'aigua i una formació ràpida de gel. A més a més, pot haver-hi xocs entre gotes d'aigua i de gel. Així doncs, en un cert punt del desenvolupament del núvol, hi ha una ràpida acumulació de grans partícules de gel. Quan les partícules de gel són suficientment pesades, comencen a caure a través de l'aire ascendent. En baixar, arrosseguen una mica d'aire amb elles i inicien un corrent descendent. El moment en què s'inicia la precipitació és el mateix moment en que comença el gran corrent descendent i el mateix moment en què apareixen els fenòmens elèctrics.



La part de dalt de la tempesta elèctrica té càrrega positiva i la de baix negativa. Les càrregues positives són a 6 o 7 quilòmetres d'altura, on la temperatura és d'uns -20°C , mentre que les càrregues negatives es troben a una altura d'uns 3 o 4 quilòmetres i estan entre 0°C i -10°C .

La càrrega de la part inferior del núvol és suficientment gran com per produir diferències de potencial de 20, 30 i fins a 100 milions de volts entre el núvol i el terra, molt major que els 0'4 milions de volts entre el "cel" i el terra. Aquests grans voltatges superen el voltatge de ruptura de l'aire i creen descàrregues gegants d'arc. Quan es produeix la ruptura, el rajos transporten a la terra les càrregues negatives de la part inferior de la tempesta.

Hi ha rajos que poden anar d'una part del núvol a una altra part del mateix núvol, d'un núvol a un altra o entre núvol i terra. En cada un dels rajos baixen aproximadament 20 o 30 Coulombs de càrrega.

Les primeres fotografies obtingudes dels rajos van mostrar clarament que són descàrregues múltiples al llarg del mateix camí. Més tard es va desenvolupar la càmera "Boys" que tenia dues lents muntades en un angle de 180° sobre un disc que rota ràpidament. La imatge està formada per cada lent que es mou transversalment per la pel·lícula. Per exemple, si el raig es repetia hi haurien dues imatges una al costat de l'altra. Comparant les imatges de les dues lents és possible obtenir els detalls de la succió temporal dels rajos. Els rajos van a una sisena part de la velocitat de la llum.

6. EL MAGNETISME

En la Grècia antiga, fa més de 2000 anys, se sabia que certes pedres procedents de Magnèsia, ara denominades magnetites, atreïen pedretes de ferro. Els primers experiments realitzats sobre el magnetisme es refereixen principalment al comportament dels imants permanents. No se sap quan es va utilitzar per primer cop un imant per la navegació, però existeixen referències escrites del maneig d'imants amb aquests objectius en el segle XII. El 1269 es va realitzar un important descobriment fet per Pierre de Maricourt, quan va deixar una agulla sobre un imant natural esfèric en diverses posicions i va marcar les direccions que senyalava l'agulla. Les línies rodejaven l'imatge de la mateixa manera que les línies meridians rodegen la Terra passant a través de dos punts en els extrems oposats de l'esfera. Degut a l'analogia amb les línies meridians de la Terra, va denominar a aquests punts pols de l'imatge. Ja s'havia observat per molts experimentadors que tots els imants independentment de la seva forma, tenen dos pols, un pol nord i un pol sud, on la força



magnètica exercida per l'imant és més intensa. Pols amb el mateix signe es repel·len i pòls amb els signes diferents s'atrauen.

En l'any 1600 William Gilbert va descobrir la raó per la qual una agulla d'una brúixola s'orienta per si mateixa en una direcció definida: la Terra és un imant permanent. Ja que el pol nord de l'agulla d'una brúixola es veu atret cap al pol geomètric nord de la Terra, aquest pol nord geogràfic de la Terra és realment un pol magnètic sud. L'atracció i repulsió dels pòls magnètics va ser estudiada quantitativament per John Michell en l'any 1750. Utilitzant una balança de torsió, Michell va demostrar que l'atracció i la repulsió dels pòls de dos imants és d'igual intensitat i varien inversament amb el quadrat de la distància entre els pòls. Aquests resultats van ser confirmats poc després per Coulomb. La llei de la força existent entre dos pòls magnètics és semblant a la que existeix entre dues càrregues elèctriques, però existeix una diferència important: els pòls magnètics sempre es presenten amb parelles. És impossible aïllar un sol pol magnètic. Si es trenca un imant per la meitat, apareixen pòls iguals i oposats en els punts de ruptura, de manera que existeixen dos imants, ambdós amb pòls iguals i oposats. Coulomb va explicar aquest resultat admetent que el magnetisme està contingut en cada molècula de l'imant.

La connexió entre electricitat i magnetisme es va donar a conèixer el segle XIX, quan Oersted va descobrir que una corrent elèctrica influeix sobre l'orientació de l'agulla d'una brúixola. Els experiments següents realitzats per André Marie Ampère i altres, van demostrar que les corrents elèctriques atrauen llimadures de ferro i que corrents paral·leles s'atrauen entre si. Ampère va proposar la teoria de que els corrents elèctrics són les fonts de tots els fenòmens magnètics; en les substàncies ferromagnètiques es va pensar que aquells corrents estaven formats per llaços o espirals de corrent molecular que s'alineaven quan el material s'imantava. El model d'Ampère és la base de la teoria moderna del magnetisme encara que en molts casos els corrents en els materials magnètics estan relacionats amb l'spin electrònic intrínsec, una propietat quàntica de l'electró que no podia ser prevista en el segle XIX. Posteriorment van ser estudiades altres connexions que existeixen entre el magnetisme i l'electricitat mitjançant experiments realitzats per Michael Faraday i Joseph Henry, que van demostrar que un camp magnètic variable produeix un camp elèctric no conservatiu, i mitjançant la teoria de Maxwell que va demostrar que un camp elèctric variable produeix un camp magnètic.

La interacció magnètica bàsica és la que existeix entre dues càrregues en moviment. Passa el mateix amb la interacció electroestàtica, és convenient considerar que la força magnètica exercida per una càrrega mòbil sobre l'altra es transmet mitjançant un tercer agent, que és el camp magnètic. Una càrrega en moviment produeix un camp magnètic i aquest camp a la



vegada exerceix una força sobre una segona càrrega mòbil. Ja que una càrrega mòbil constitueix un corrent elèctric, la interacció magnètica pot considerar-se també com una interacció entre dos corrents.

6.1 El camp magnètic (**B**)

Podem definir el vector camp magnètic **B** en un punt de l'espai d'una manera semblant a la que es feia servir per definir el camp elèctric **E**. Es pot observar experimentalment que quan una càrrega té una velocitat **v** en la proximitat d'un imant o d'un fil per on hi circula corrent, existeix una força addicional sobre ella que depèn del valor i direcció de la velocitat. Es pot fàcilment separar aquestes dues forces mesurant la força que actua sobre la càrrega quan està en repòs i subtraient aquesta força elèctrica de la força total que actua sobre la càrrega quan es mou. Els experiments realitzats amb diverses càrregues mòbils amb varies velocitats en un punt de l'espai donen els resultats següents corresponents a la força magnètica:

- 1.- La força és proporcional al valor de la càrrega **Q**.
- 2.- La força és proporcional al mòdul de la velocitat **v**.
- 3.- El valor, direcció i sentit de la força depenen de la direcció i sentit de la velocitat **v**.
- 4.- Si la velocitat d'una partícula està dirigida al llarg d'una determinada línia de l'espai, la força és zero.
- 5.- Si la velocitat no està dirigida al llarg d'aquesta línia, existeix una força que és perpendicular a la mateixa i és també perpendicular a la velocitat.
- 6.- Si la velocitat forma un angle θ amb aquesta línia, la força és proporcional al $\sin\theta$.
- 7.- La força sobre una càrrega negativa és de sentit contrari a l'exercida sobre una càrrega positiva amb la mateixa velocitat.

Lorentz va determinar una fórmula que relaciona la força que un camp magnètic **B** i un camp elèctric **E** aplica a una càrrega **Q** amb una velocitat **v**. Avui en dia s'anomena la llei de Lorentz. Quan interactuen el camp elèctric i magnètic sobre la partícula s'utilitza la següent fórmula:

$$F = Q (E + v \times B)$$

Quan no existeix cap camp elèctric la fórmula ve donada per:



$$F = Q (v \times B)$$

Per raons històriques, el vector “B” es denomina normalment *vector d’inducció magnètica* o *vector de densitat de flux magnètic* encara que també es pot anomenar *vector camp magnètic*.

Les unitats del SI d’inducció magnètica és el Tesla (T). Una càrrega d’un Coulomb que es mou amb una velocitat d’un metre per segon perpendicular a un camp magnètic d’un Tesla experimenta la força d’un newton.

$$1 \text{ T} = 1 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{C} \cdot \text{m} = 1 \text{ N} / \text{A} \cdot \text{m}$$

Aquesta unitat és més aviat gran; una unitat més comuna deduïda del sistema cegesimal és el Gauss (G), relacionada amb el Tesla de la manera següent:

$$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$$

Com que normalment s’utilitza el Gauss com a unitat del camp magnètic, que no és una unitat del SI, no s’ha d’oblidar la conversió d’aquesta magnitud al Tesla quan es realitzin els càlculs.

6.2 Imants a l’interior de camps magnètics

Quan un imant permanent igual com una agulla d’una brúixola se situa a l’interior d’un camp magnètic, tendeix a orientar-se per si mateix, de manera que el pol nord assenyali en la direcció i sentit del camp magnètic **B**. Aquest efecte es produeix també amb les llimadures de ferro que no han estat prèviament imantades, les quals s’imanten en presència d’un camp magnètic. Existeix una força **F**₁ actuant sobre el pol nord en la direcció i sentit de B i una altra força **F**₂ igual però oposada, sobre el pol sud. La intensitat del pol de l’imant **Q**_{magnètica} es defineix com el quocient entre el valor de la força exercida sobre el pol i el valor del camp magnètic

$$Q_m = \frac{F}{B}$$



Experimentalment mai s'ha trobat un pol magnètic aïllat. Els pols magnètics sempre existeixen en parelles; es a dir, la unitat fonamental del magnetisme és el dipol magnètic.

6.3 Moviment d'una càrrega puntual situada a l'interior d'un camp magnètic

Una característica important de la força magnètica que actua sobre una partícula carregada mòbil descrita per la imatge és que la força sempre és perpendicular a la velocitat de la partícula. La força magnètica per conseqüent no realitza treball sobre la partícula i l'energia cinètica de la partícula no es veu afectada per la força. La força magnètica només modifica la direcció de la velocitat però no el seu mòdul.

En el cas especial en que la velocitat d'una partícula sigui perpendicular a un camp magnètic uniforme, com es veu en la imatge, la partícula es mou seguint una òrbita circular. Es pot relacionar el radi de la circumferència amb el camp magnètic i la velocitat de la partícula fent que la força resultant sigui igual a la massa (m) multiplicada per l'acceleració centrípeta (v^2/r). La força resultant en aquest cas és:

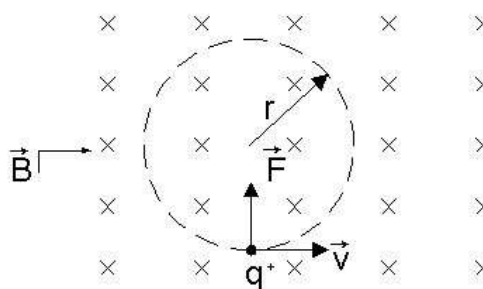


Figura 8

$q\mathbf{vB}$ ja que $\mathbf{v}$ i $\mathbf{B}$ són perpendiculars. Així doncs la segona llei de Newton diu que:

$$q v B = \frac{m v^2}{r} \quad \text{o sigui} \quad r = \frac{m v}{q B}$$

La freqüència angular del moviment és:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{q B}{m}$$

i el període és:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{q B}$$



Freqüència angular = ω = radians/segon

Massa = m = kg

Es pot observar que la freqüència angular no depèn del radi de l'òrbita ni de la velocitat de la partícula. Aquesta freqüència es denomina *freqüència ciclotró*. Entre moltes de les aplicacions del moviment circular de partícules carregades dins un camp magnètic uniforme només es parlarà del ciclotró.

Si una partícula carregada entra dins una regió on hi ha un camp magnètic uniforme amb una velocitat que no és perpendicular al camp magnètic, la trajectòria de la partícula és una hèlix. La component de la velocitat paral·lela al camp magnètic no es veu influïda pel camp

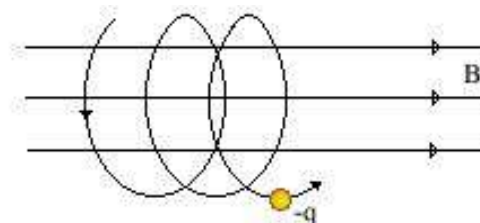


Figura 9

magnètic. Considerem per exemple un camp magnètic uniforme en la direcció (z) amb una velocitat (v_z), la partícula es mou perpendicularment al camp en una circumferència continguda en el pla xy. En el sistema de referència original la trajectòria és una hèlix que s'enrotlla al voltant de les línies de B, com es mostra en la imatge.

El moviment de partícules carregades en camps magnètics no uniformes és molt complicat. Veurem qualitativament un cas en el qual el camp magnètic és quasi uniforme de manera que la trajectòria de la partícula és aproximadament una hèlix. El camp magnètic és més intens als extrems i més dèbil al centre, com s'indica en la diferència de separació entre les línies. Un camp d'aquest tipus s'anomena *ampolla magnètica* degut a que una partícula carregada pot quedar-se atrapada en el seu interior.

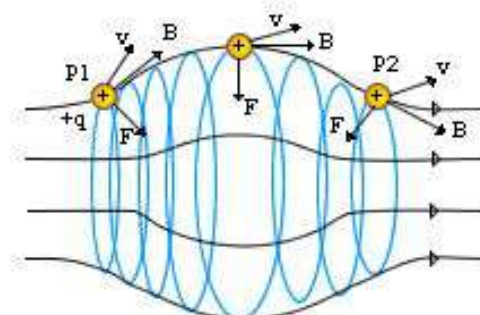


Figura 10



El ciclotró el van inventar E. O. Lawrence i M. S. Livingston el 1934 per accelerar partícules com els protons fins a aconseguir una energia cinètica elevada. Les partícules d'energia alta s'utilitzen a continuació per bombardejar els nuclis, produint reaccions nuclears que s'estudien amb l'objectiu d'obtenir informació sobre el nucli dels àtoms.

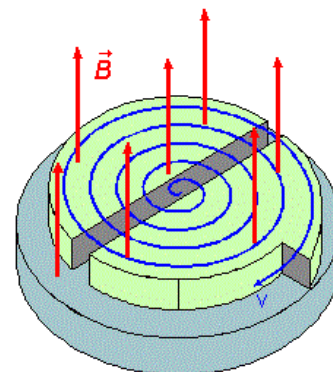


Figura 11

Aquesta imatge és un dibuix esquemàtic d'un ciclotró. Les partícules es mouen a l'interior de dos recipients metàl·lics semicirculars. Els recipients estan continguts en una cambra on hi ha el buit a l'interior i un camp magnètic proporcionat per un electroimant.

7. FONTS DEL CAMP MAGNÈTIC

Les primeres fonts conegudes dels efectes magnètics van ser els imants, però després de que Oersted anunciés el seu descobriment el 1820 sobre la desviació de l'agulla d'una brúixola per l'acció d'una corrent elèctrica, molts científics van investigar les propietats del magnetisme associades als corrents elèctrics. Jean Baptiste Biot i Félix Savart van anunciar els resultats de la força que actua sobre un pol magnètic pròxim a un conductor llarg pel qual hi circula corrent i van analitzar aquests resultats en funció del camp magnètic produït per cada element del corrent. André Marie Ampère va ampliar aquests experiments i va demostrar que els propis elements del corrent experimenten una força en presència d'un camp magnètic; en particular va demostrar que dos corrents exerceixen forces entre sí.

Ampère va obtenir el mateix resultat que Biot-Savart per al camp magnètic degut a un element de corrent i va desenvolupar un model que explicava el comportament dels imants permanents en funció d'espines microscòpiques dins del material magnètic. En aquest model va proposar que tota la matèria es compon d'elements de corrent en forma d'espines microscòpiques que en el cas de materials no magnètics estaven orientats a l'atzar produint un efecte nul. En els materials magnètics, les espines del corrent estaven alineades i produïen un camp magnètic amb les mateixes característiques que el que produeixen les espines alineades formades per conductors ordinaris per on hi circula un corrent. El model d'Ampère és essencialment correcte fonamentalment perquè podem considerar tots els camps magnètics com a deguts a algun corrent elèctric d'un cert tipus. Però els corrents



microscòpics són més complicats del que Ampère havia previst, estant relacionats amb el moviment dels electrons que no poden ser totalment descrits clàssicament. En particular el ferromagnetisme està íntimament connectat amb l'espín de l'electró, una propietat intrínseca dels electrons.

7.1 Llei de Biot-Savart

A partir de les seves investigacions sobre la força exercida sobre un pol magnètic i produïda per un conductor llarg per on hi circula un corrent, Biot i Savart van proposar una expressió que relacionava el vector d'inducció magnètic **B** en un punt del espai amb una intensitat elèctrica:

$$dB = k_m \frac{I dl \times \hat{r}}{r^2} \quad \text{on } k_m \text{ és igual a } k_m = \frac{\mu_0}{4\pi}$$

La unitat del SI de corrent, l'Amper, es defineix de manera que la constant magnètica **k_m** sigui exactament 10^{-7} .

La llei de Biot-Savart és anàloga a la llei de Coulomb. La font o causa del camp magnètic és l'element de corrent ($I \cdot dl$), de la mateixa manera que la càrrega **Q** és la font del camp electroestàtic. El camp magnètic disminueix proporcionalment a la inversa del quadrat de la distància des de l'element de corrent, de la mateixa manera que disminueix el camp elèctric amb la distància des d'una càrrega puntual. Però els aspectes direccionals dels camps són molt diferents. Mentre que el camp electroestàtic assenyalava en direcció radial des de la càrrega puntual fins al punt del camp, el camp magnètic és perpendicular tant a la direcció radial com a la direcció de l'element de corrent ($I \cdot dl$).

7.2 Llei d'Ampère

El treball realitzat sobre una càrrega de prova pel camp electroestàtic quan la càrrega es mou recorrent una circumferència completa sempre és zero. La integral de línia del camp electroestàtic sobre qualsevol trajectòria tancada és sempre zero degut a que el camp electroestàtic és conservatiu.

Evidentment la suma de **B·dl** al llarg d'una trajectòria tancada no és necessàriament zero. Si s'agafa aquesta suma al llarg d'una trajectòria circular que envolta a un conductor rectilini



per on hi circula un corrent, el vector d'inducció magnètic **B** és sempre tangent a la trajectòria. Així doncs, **B·dl** és positiu en tots els punts si es recorre la circumferència en el sentit de les línies del camp.

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I$$

C = Qualsevol corba tancada
 $\mu_0 = 4\pi k_m$

La llei d'Ampère és vàlida per qualsevol corba sempre que els corrents siguin constants. Aquesta llei també és vàlida fins i tot quan no existeix simetria; però en aquests casos no serveix d'ajuda per trobar una expressió que ens doni el camp magnètic.

7.3 Llei de Faraday

El fet de que es puguin induir corrents elèctrics mitjançant camps magnètics variables va ser descobert a principis de la dècada de 1830 per Michael Faraday i simultàniament pel físic americà Joseph Henry. Els resultats de molts experiments realitzats per aquestes persones i altres científics es poden expressar mitjançant una relació senzilla coneguda com la llei de Faraday. On ϕ_m és el flux de camp magnètic que travessa un circuit. Si el flux es modifica de qualsevol manera, existeix una **fem** en el circuit donada per:

$$\xi = - \frac{d\phi_m}{dt}$$

La **fem** es detecta normalment observant l'existència d'un corrent en el circuit. Actualment, se sap que la **fem** d'un circuit es localitzava en una regió específica del mateix, concretament, entre els borns de les piles. La **fem** produïda per un flux magnètic variable no es troba localitzada i s'ha de considerar com distribuïda al llarg de tot el circuit, i per tant aquesta força no és conservativa. La força per unitat de càrrega és un camp elèctric no conservatiu **E**; i per tant és diferent dels camps electroestàtics donats per la llei de Coulomb, que són conservatius. En funció d'aquest camp elèctric no conservatiu, la llei de Faraday es pot escriure de la següent manera:

$$\xi = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d\phi_m}{dt}$$



El flux magnètic a través d'un circuit pot variar de moltes maneres diferents: el corrent que produeix el flux pot augmentar o disminuir; es poden moure uns imants permanents allunyant-los del circuit; el propi circuit pot moure's allunyant-se o acostant-se a la font de flux; o pot augmentar o disminuir l'àrea del circuit en l'interior d'un camp magnètic fix. En tots els casos, s'indueix una **fem** en el circuit on el seu valor és igual a la variació del flux magnètic per unitat de temps.

7.4 Betatró

Una aplicació interessant de la llei de Faraday la constitueix el betatró, inventat el 1941 per Donald Kerst en la Universitat de Illinois per accelerar electrons (també denominades partícules beta) fins a obtenir energies altes. En el betatró, els electrons es mouen en una òrbita circular amb radi constant en un tub on s'hi ha fet el buit. Es veuen accelerats per un camp elèctric no conservatiu tangencial que es produeix mitjançant un flux magnètic variable a través de la òrbita, generat per un electroimant. La força centrípeta necessària per mantenir els electrons movent-se en una circumferència la proporciona el mateix imant. Això es pot dur a terme si la inducció magnètica B_0 en el radi de la òrbita és exactament la meitat del valor mig de la inducció magnètica en l'àrea completa de la òrbita.

El camp magnètic el produeixen unes bobines per on hi circula un corrent altern. Els electrons s'injecten en la òrbita en el mateix moment en que el camp magnètic és zero i comença a augmentar. Només es pot utilitzar el primer quart de cicle. Quan el flux que travessa la òrbita varia, els electrons adquireixen energia i augmenten la seva quantitat de moviment. Romanen en la seva òrbita degut a que el camp magnètic en la òrbita B_0 varia al mateix ritme que la quantitat de moviment. Com a norma típica, els electrons realitzen

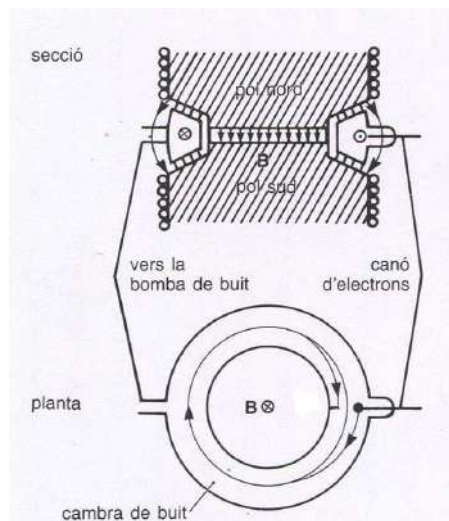


Figura 12

vàries centenars de milers de revolucions durant el quart de cicle en el que es veuen accelerats. Quan el camp magnètic està a prop del seu valor màxim, els electrons són expulsats de la seva òrbita per un puls de corrent que s'introdueix en una sèrie de bobines auxiliars que momentàniament debiliten la inducció en la òrbita. Normalment el feix d'



electrons es trasllada a una òrbita major i incideix en un canó injector produint rajos X. Els rajos X s'utilitzen per investigar fenòmens nuclears o per objectius mèdics.

8. MAGNETISME EN LA MATÈRIA

Quan es va estudiar els camps elèctrics en la matèria es va observar que els camps elèctrics es veuen influïts per la presència de dipols elèctrics. En els cas de molècules polars, que tenen un moment dipolar elèctric permanent, els dipols s'alineen mitjançant l'acció del camp elèctric, però que en el cas de les molècules no polars s'indueixen dipols elèctrics mitjançant un camp extern. En els dos casos, els dipols s'alineen paral·lelament al camp elèctric extern i aquesta alineació tendeix a debilitar aquest camp extern.

En el magnetisme es presenten un efectes semblants però més complicats que els explicats. Els àtoms tenen moments magnètics degut al moviment dels seus electrons. A més cada electró té un moment magnètic intrínsec associat al seu spin. El moment magnètic net d'un àtom depèn de la distribució dels electrons en l'àtom. A diferència del cas dels dipols elèctrics, l'alineació dels dipols magnètics paral·lels en un camp magnètic extern tendeix a augmentar el camp.

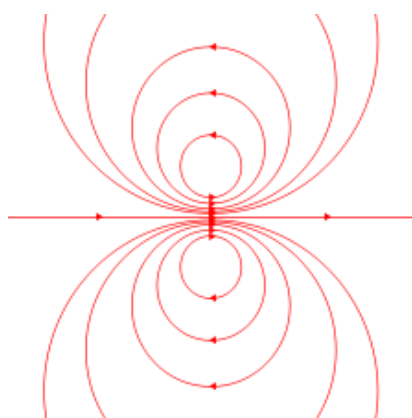


Figura 13

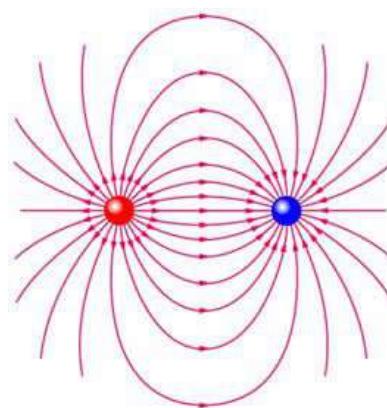


Figura 14

Es pot analitzar aquesta diferència comparant les línies de $\mathbf{E}$ en el cas d'un dipol elèctric amb les línies de $\mathbf{B}$ en el cas d'un dipol magnètic, és a dir, lluny dels dipols, les línies de camp són idèntiques. En la regió interior dels dipols, les línies de $\mathbf{B}$ i de $\mathbf{E}$ tenen sentit oposat. Així doncs un material elèctricament polaritzat, els dipols creen un camp elèctric



antiparal·lel al seu vector moment dipolar mentre que en un material magnèticament polaritzat, els dipols creen un camp magnètic paral·lel als vectors moment dipolar magnètic. Els materials es poden classificar en tres categories, paramagnètics, diamagnètics i ferromagnètics. Els materials o substàncies paramagnètiques o ferromagnètiques tenen molècules amb moments dipolars permanents; en el cas de paramagnetisme, aquests moments no interaccionen fortament entre sí i estan normalment orientats a l'atzar. En presència d'un camp magnètic extern, els dipols s'alineen parcialment en la direcció del camp, produint-se un increment del camp. Però, a temperatures ordinàries i amb camps externs normals, només una fracció molt petita de les molècules es veuen alineades degut a que el moviment tèrmic tendeix a desordenar la seva orientació. L'augment del camp magnètic total és, en conseqüència, molt petit.

El ferromagnetisme és molt més complicat. Degut a una forta interacció entre els dipols magnètic veïns, pot aconseguir-se un alt grau d'alineació fins i tot amb camps magnètic externs dèbils, originant això un increment molt gran en el camp magnètic total. Fins i tot en el cas de que no existeixi cap camp magnètic extern, els materials magnètic poden tenir els seus dipols magnètics alineats, com succeeix en el cas dels imants permanents.

El diamagnetisme és el resultat d'un moment magnètic induït de sentit oposat al camp extern. Els dipols induïts debiliten el camp magnètic resultant. Aquest efecte es produeix en totes les substàncies, però és molt petit i amb freqüència resulta emmascarat pels efectes paramagnètics o ferromagnètics si les molècules individuals tenen moments dipolars magnètics permanents.

El camp magnètic produït per un imant permanent, caracteritzat pel moment magnètic per unitat de volum **M**, conegut com a vector d'imantació. El camp degut al material imantat és el mateix que l'originat per un corrent d'unitat de longitud **M** en la superfície de l'imant i aquest corrent es pot descriure en funció d'espines de corrent atòmiques que no es contraresten completament en la superfície. Aquest fenomen és aplicable tant a materials paramagnètics, diamagnètics o ferromagnètics, Es descriu la imantació d'un material d'aquest tipus mitjançant el moment dipolar magnètic per unitat de volum **M**. Excepte en el cas dels imants permanents, aquesta imantació està produïda per un camp magnètic extern i desapareix quan s'elimina. El vector imantació **M** és paral·lel al camp extern que l'origina en el cas del diamagnetisme, La inducció magnètica **B** deguda a la imantació del material és molt petita en comparació amb el camp extern en el cas del paramagnetisme o diamagnetisme i molt gran en el cas del ferromagnetisme.

El càlcul del camp d'inducció magnètic resultant **B** és complicat quan el material imantat està en presència d'un camp extern. Encara que el camp degut a la substància pugui



calcular-se a partir de la llei d'Ampère o de la llei de Biot-Savart utilitzant el corrent d'Ampère associada amb el vector d'imatació **M**, la pròpia imantació depèn del camp d'inducció magnètica resultant de **B**. Degut a aquesta complicació, es defineix un nou vector, la intensitat magnètica **H**, en un intent de separar el camp extern del degut al material, en molts casos d'interès. **H** pot trobar-se a partir dels corrents de conducció externa en els conductors només sense referència als materials o substàncies que poden ser presents. Llavors la imantació pot relacionar-se amb **H** i pot trobar-se el camp d'inducció magnètic **B** resultant a partir de **H** i **M**.

8.1 Intensitat magnètica **H**

Si es considera un solenoide llarg amb **n** voltes per unitat de longitud per on hi circula un corrent **I**. La inducció magnètica en el centre del solenoide és:

$$B_0 = \mu_0 n I$$

Aquesta expressió és correcta si s'està bastant allunyat dels extrems del solenoide. Ja que si es desitja evitar qualsevol complicació produïda pels efectes externs, s'admet que el solenoide és molt llarg. Si ara s'introdueix en el solenoide algun tipus de substància o material, existirà una contribució addicional al camp d'inducció magnètic degut a la imantació del material. Si **M** és el moment magnètic per unitat de volum, el camp de inducció **B_m** produït per aquesta imantació ve donat per una expressió semblant a l'anterior, en la que el corrent d'Ampère per unitat de longitud **M** substitueix al corrent per unitat de longitud en el solenoide **nI**:

$$B_m = \mu_0 M$$

La inducció magnètica total en el centre del solenoide és el vector suma d'aquests camps separats:

$$B = B_0 + \mu_0 M$$

És convenient separar l'acció del camp magnètic extern del camp degut al material. Llavors definim el vector intensitat magnètica **H** com:

$$H = \frac{B}{\mu_0} - M$$



En el cas d'un solenoide molt llarg, en el qual es pot obviar els efectes en els extrems del material, **H** és simplement la inducció magnètica externa originada **B₀** dividida per **μ₀**. El valor de **H** en el centre d'un solenoide llarg és:

$$H = nI$$

A partir d'aquestes equacions podem observar que les unitats de **H** són les mateixes que les de **M**, que són amperes per metre.

8.2 Susceptibilitat i permeabilitat magnètiques

En el cas de substàncies paramagnètiques i diamagnètiques, la imantació **M** és proporcional a la intensitat magnètica **H**.

$$M = \chi_m H$$

La constant de proporcionalitat **χ_m** es denomina susceptibilitat magnètica. Ja que **M** i **H** tenen les mateixes unitats, la susceptibilitat magnètica no té unitats. És positiva en el cas de materials paramagnètics i negativa en cas de materials diamagnètics. Per als material diamagnètics la susceptibilitat és essencialment independent de la temperatura, però en els materials paramagnètics, la susceptibilitat disminueix en augmentar la temperatura.

Susceptibilitat magnètica de diverses substàncies a 20°C	
Substància	χ _m
Alumini	2'3 · 10 ⁻⁵
Bismut	-1'66 · 10 ⁻⁵
Cobre	-0'98 · 10 ⁻⁵
Diamant	-2'2 · 10 ⁻⁵
Or	-3'6 · 10 ⁻⁵
Magnesi	1'2 · 10 ⁻⁵



Mercuri	$-3'2 \cdot 10^{-5}$
Plata	$-2'6 \cdot 10^{-5}$
Sodi	$-0'24 \cdot 10^{-5}$
Titani	$7'06 \cdot 10^{-5}$
Tungstè	$6'8 \cdot 10^{-5}$
Hidrogen (1 atm)	$-9'9 \cdot 10^{-9}$
Diòxid de carboni (1 atm)	$-2'3 \cdot 10^{-9}$
Nitrogen (1 atm)	$-5'0 \cdot 10^{-9}$
Oxigen (1 atm)	$2090 \cdot 10^{-9}$

En aquesta taula es pot observar que els valors de la susceptibilitat magnètica són molt menors que 1. Si $\mathbf{M}$ és proporcional a $\mathbf{H}$, llavors $\mathbf{B}$ és també proporcional a $\mathbf{H}$. Substituint $\mathbf{M}$ per $\chi_m \mathbf{H}$ en l'equació de la intensitat magnètica podem escriure que:

$$B = \mu H$$

on μ és:

$$\mu = (1 + \chi_m) \mu_0$$

Degut a que les susceptibilitats són petites, la permeabilitat de tots els materials diamagnètics i paramagnètics és quasi igual a la permeabilitat de l'espai lliure μ_0 .

8.3 Paramagnetisme

El paramagnetisme es presenta en substàncies en què els seus àtoms tenen un moment magnètic permanent que interaccionen entre sí molt dèbilment. Quan no hi ha cap camp magnètic extern, aquests moments magnètics estan orientats a l'atzar. En presència d'un camp magnètic extern tendeixen a alinear-se paral·lelament al camp, però aquesta alineació està contrarestada per la tendència que tenen els moments a estar orientats aleatòriament



degut al moviment tèrmic. La fracció dels moments que s'alineen amb el camp depèn de la intensitat del material i la seva temperatura. A temperatures molt baixes i amb camps externs alts quasi tots els moments estaran alineats amb el camp. Fins i tot amb els camps magnètics majors que es puguin obtenir en els laboratoris, la temperatura ha de ser molt baixa, de quasi alguns graus absoluts, amb l'objectiu d'obtenir una elevada alineació. A temperatures més altes i amb camps externs més dèbils només una fracció petita de les molècules s'alinearà amb el camp.

8.4 Diamagnetisme

El diamagnetisme va ser descobert per Faraday l'any 1846 quan va veure que un trosset de bismut es veia repel·lit per un pol qualsevol d'un imant, indicant que el camp extern de l'imant indueix un dipol magnètic en el bismut de sentit contrari al camp.

Els àtoms que posseeixen estructures electròniques de capes completes tenen un moment cinètic zero i per tant, no posseeixen cap moment dipolar magnètic permanent. Són diamagnètics. Els àtoms no ferromagnètics que tenen moments dipolars magnètics permanents són o bé paramagnètics o bé diamagnètics depenent de quin efecte és el més fort. Com el diamagnetisme no depèn de la temperatura i l'alineació dels moments permanents disminueix amb la temperatura, tant per substàncies paramagnètiques com ferromagnètiques, tots els materials són diamagnètics a temperatures suficientment altes.

8.5 Ferromagnetisme

El ferromagnetisme es presenta en el ferro pur, en el cobalt i el níquel, en aliatges d'aquests metalls entre sí i amb alguns altres elements i en poques substàncies més. En aquestes substàncies un camp magnètic extern petit pot produir un grau molt alt d'alineacions dels moments dipolars magnètics atòmics, que en alguns casos, pot persistir fins i tot encara que no existeixi camp magnetitzant exterior. Això és així degut a que els moments dipolars magnètics dels àtoms d'aquestes substàncies exerceixen forces intenses sobre els seus veïns de manera que en una petita regió de l'espai els moments s'alineen entre sí fins i tot sense camps externs. La mecànica quàntica prediu l'existència d'aquestes forces dipolars en aquestes substàncies que no poden ser explicades mitjançant la física clàssica. A temperatures per sobre d'una temperatura crítica, denominada *temperatura de Curie*, aquestes forces desapareixen i els materials ferromagnètics es transformen en paramagnètics.



La regió de l'espai en el qual els moments dipolars magnètics estan alineats, es denomina *domini*. El tamany d'un domini és normalment microscòpic. Dins el domini, tots els moments magnètics estan alineats, però la direcció de l'alineació varia d'un domini a un altre de manera que el moment magnètic net d'un tros macroscòpic de material és zero en el seu estat normal.

Es considera la imantació d'una barra llarga de ferro en l'interior d'un solenoide augmentant gradualment el corrent que circula pel solenoide. Se suposa que la barra i el solenoide són suficientment grans per permetre'ns menysprear els efectes dels extrems. La intensitat magnètica H en el centre del solenoide està relacionada simplement amb el corrent per:

$$H = nI = \frac{N}{l}I$$

essent N el número de voltes i l la longitud. La inducció magnètica B ve donada per:

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M$$

essent M la imantació. En el cas del ferro i altres materials ferromagnètics la imantació M sol ser molt més gran que la intensitat magnètica H en un factor de varis milers o més.

9. LES EQUACIONS DE MAXWELL I ONES ELECTROMAGNÈTIQUES

Pels volts del 1860 el gran físic anglès James Clerk Maxwell va descobrir que les lleis experimentals de l'electricitat i el magnetisme podien resumir-se en un grup d'equacions que avui en dia es coneixen amb el nom de: *les equacions de Maxwell*. Aquestes equacions relacionen els vectors camp elèctric E i camp magnètic B amb les seves fonts o causes, com són les càrregues elèctriques, els corrents i els camps variables. Les equacions de Maxwell expressen d'una forma matemàtica concisa les lleis de Coulomb, Gauss, Biot-Savart, i Ampère (amb la important addició del corrent de desplaçament de Maxwell). Aquestes equacions tenen un paper en l'electromagnetisme clàssic semblant al de les lleis de Newton en la mecànica clàssica. En principi, en l'electricitat i el magnetisme tots els problemes es poden resoldre a partir de les equacions de Maxwell, de la mateixa manera que tots els problemes en mecànica clàssica es poden resoldre a partir de les lleis de Newton. Les equacions de Maxwell són considerablement més complicades que les lleis de Newton, i la seva aplicació en la resolució de problemes requereix un coneixement matemàtic que s'escapa a les intencions d'aquest treball. No obstant, les equacions de



Maxwell són de gran importància teòrica. Maxwell va demostrar que aquestes equacions poden combinar-se i conduir a una equació d'ona pels vectors del camp elèctric **E** i camp magnètic **B**. Aquestes *ones electromagnètiques* són produïdes per càrregues i corrents en oscil·lació. Van ser reproduïdes per primer cop en un laboratori per Heinrich Hertz l'any 1887. Maxwell va demostrar que la velocitat de les ones electromagnètiques es pot predir en la forma:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

on ϵ_0 és la constant que apareix en les lleis de Coulomb i Gauss i μ_0 la que apareix en la llei de Biot-Savart i la llei d'Ampère. Quan els valors mitjos d'aquestes constants fonamentals es substitueixen en l'equació, la velocitat de les ones electromagnètiques resulta ser aproximadament igual a $3 \cdot 10^8$ m/s, la mateixa que la velocitat obtinguda experimentalment per la llum. Maxwell va observar aquesta "coincidència" amb una gran excitació i va suposar correctament que la llum mateixa és una ona electromagnètica.

9.1 Les equacions de Maxwell

Les equacions de Maxwell són:

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot \hat{n} \, dA = \frac{1}{\epsilon_0} Q$$

Llei de Gauss

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot \hat{n} \, dA = 0$$

Llei de Gauss del magnetisme

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot \hat{n} \, dA$$

Llei de Faraday

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{E} \cdot \hat{n} \, dA$$

Llei d'Ampère amb corrent de desplaçament

La llei de Gauss estableix que el flux del camp elèctric que travessa qualsevol superfície tancada és igual a $1/\epsilon_0$ multiplicada per la càrrega neta en l'interior de la superfície. La llei de Gauss implica que el camp elèctric degut a una càrrega puntual varia de manera inversament proporcional al quadrat de la distància de la càrrega. També descriu com les línies de **E** divergeixen des d'una càrrega positiva i convergeixen en una càrrega negativa. La seva base experimental és la llei de Coulomb.



La llei de Gauss del magnetisme estableix que el flux del vector inducció magnètica **B** és zero a través de qualsevol superfície tancada. Aquesta equació respon a l'observació experimental de que les línies de **B** no divergeixen ni convergeixen des de cap punt; és a dir, els pols magnètics no existeixen.

La llei de Faraday ens descriu com les línies de **E** envolten una àrea en la qual el flux magnètic que la travessa està variant. La llei de Faraday relaciona el vector camp elèctric **E** amb el vector camp magnètic **B**.

La llei d'Ampere amb la inclusió del corrent de desplaçament descriu com les línies d'inducció magnètica envolten una àrea a través de la qual hi està passant un corrent o flux elèctric variable.

10. JAMES CLERK MAXWELL (1831-1879)

James Clerk Maxwell va crear la teoria electromagnètica de la llum i va predir l'existència de les ones de ràdio i també va escriure sobre la mecànica estadística, una ciència que va crear junt amb Ludwig Boltzmann; que va realitzar amb la seva dona Katherine Mary Dewar, una sèrie de brillants experiments sobre la visió en color. En els dos últims anys de la seva vida, abans de la seva mort l'any 1879, a l'edat de 48 anys, va construir les bases de la dinàmica dels gasos enrarits.

Maxwell va heretar el seu interès per la ciència del seu pare, John Clerk Maxwell, que principalment va centrar el seu interès en les invencions mecàniques, publicant un article científic, una proposta per una màquina d'imprimir automàtica l'any 1831, l'any en que va néixer Maxwell. La creativitat i el compte amb els detalls que Maxwell posava en el disseny dels seus propis invents científics són la herència del seu pare. Els primers 10 anys de la vida de Maxwell van transcórrer al camp, lluny de l'educació de qualsevol escola. Frances Cay, mare de Maxwell, va morir quan ell tenia 8 anys i després de 2 desastrosos anys amb un tutor, el van enviar a Edinburg, per entrar a la Edinburg Academy. Allà, la seva intel·ligència va començar a brillar, i a través de contactes familiars es va anar introduint en la cultura d'Edinburg.

La carrera d'estudiant de Maxwell va ser més llarga del normal. Va estar tres anys en la Universitat d'Edinburg i tres més i un quart a Cambridge. Al contrari que Einstein, a Maxwell li agradava la seva vida d'estudiant i va tenir la fortuna d'atraure alguns professors eminents. A Edinburg el van influenciar dos homes antagònics però igualment intel·ligents i aguts, James David Forbes i Sir William Hamilton, el metafísic. Forbes era un experimentalista, que va inventar el sismògraf i que va realitzar importants treballs sobre la



polarització de la radiació infraroja; a més a més, va adquirir fama com a un dels primers alpinistes britànics. Va introduir a Maxwell en el seu laboratori i amb la seva ajuda va iniciar els experiments sobre visió en color que el van conduir a realitzar el seu propi treball en la matèria. Hamilton que estava considerat com a un pedagog genial, va ser qui va ensenyar a Maxwell a l'alta visió filosòfica que es desprèn en moltes de les interessants asseveracions metafísiques que va escriure en les seves publicacions.

L'any 1850 Maxwell va marxar de Cambridge. En aquell moment estava convençut que la seva vocació eren les matemàtiques i el millor programa de matemàtiques aplicades es donava en el Cambridge Mathematical Tripos. El seu tutor particular va ser William Hopkins, el fundador de la geofísica moderna. Moltes altres persones van influir sobre Maxwell com G.G. Stokes, Newton i William Whewell, el filòsof matemàtic del que es deia que "la ciència era el seu fort i la omnisciència la seva debilitat".

La teoria electromagnètica de la llum de Maxwell arranca del treball de dos homes, Michael Faraday i William Thomson. La invenció de Faraday del motor elèctric i les seves investigacions sobre inducció electromagnètica, electroquímica, acció dielèctrica i diamagnètica, i rotació magneto-òptica el van convertir, segons paraules de Maxwell, en "el nucli de qualsevol cosa elèctrica des de 1830". Les seves contribucions teòriques es van basar en les seves idees avançades respecte a les línies de força elèctriques i magnètiques, en particular en les relacions geomètriques que governen els fenòmens eletromagnètics i el concepte de força magnètica que no podia ser explicat a partir d'atraccions i repulsions entre elements de corrent sinó atribuint-los a les línies de força de la propietat d'escurçar-se i repel·lir-se entre sí. Thomson volia relacionar les línies de força amb les teories ja existents d'electroestàtica i magnetoestàtica, inventar tècniques analítiques que resolguin els problemes elèctrics, i donar la importància que els hi corresponien als principis energètics en l'electromagnetisme. Maxwell va introduir una sèrie de conceptes nous: la *funció electrotònica* (vector potencial), la densitat energètica del camp, el corrent de desplaçament, i l'operador rotacional en les equacions de camp. Maxwell va organitzar aquesta matèria en una estructura coherent i l'any 1861 va descobrir la transcendental equivalència entre llum i ones electromagnètiques.

La primera part de la publicació de Maxwell "Les línies de força de Faraday" (1855-1856) explicava una analogia, deguda principalment a Thomson, entre les línies de força elèctriques i magnètiques i les línies de corrent desplaçant-se en un fluid incompressible. Maxwell va utilitzar aquesta analogia per interpretar moltes de les observacions de Faraday, i va fer ús del pròleg d'aquesta publicació per iniciar una discussió sobre el significat de les analogies en física. Posteriorment, i seguint les bases de Faraday i Thomson, Maxwell va



estendre el seu estudi a l'electromagnetisme. Va formular un grup d'equacions que resumeixen les relacions dels camps elèctric i magnètics amb les càrregues i corrents que les produeixen (l'inici del que avui en dia coneixem com les lleis de Maxwell). Aquestes equacions descriuen els fenòmens amb gran precisió des d'un punt de vista completament diferent a totes les teories anteriors d'acció a distància de Andrè-Marie Ampère i Wilhelm Weber.

Després d'aquest brillant començament s'hauria esperat un bon nombre de publicacions discutint aquestes noves idees. Però els físics les van ignorar, i Maxwell tenia la mania d'investigar sobre varis temes a la vegada, deixant transcórrer llargs intervals de temps entre publicacions successives sobre el mateix tema. Sis anys després va aparèixer la seva següent publicació "Les línies de força en física", publicant en quatre parts entre el 1861 i el 1862. Durant aquest interval de temps Maxwell va dur a terme brillants contribucions en tres camps diferents abans de tornar a centrar els seus esforços en l'electromagnetisme: visió en color, la teoria dels anells de Saturn i la teoria cinètica dels gasos. Va deixar Cambridge, i es va fer professor del *Mariscal College* a Aberdeen, casant-se posteriorment amb la filla del rector del col·legi.

En la seva publicació "Les línies de força física" Maxwell va desenvolupar un model de arestes-moleculars del camp electromagnètic. Per explicar el diagrama de tensions associat amb les línies de força de Faraday, Maxwell va investigar les propietats d'un medi que ocupi tot l'espai en el qual petites arestes moleculars giren amb els seus eixos paral·lels a les línies de força. Com més pròximes siguin les línies, més ràpida és la rotació de les arestes. En un medi d'aquest tipus les línies de força tendeixen a fer-se petites entre corrents i imants. La pregunta és: què és el que fa girar les arestes? A aquesta pregunta Maxwell va concebre una idea tan ingeniosa com fantàstica. Maxwell va postular que un corrent elèctric consisteix en el moviment de petitíssimes partícules que encaixen perfectament amb els costats.

La pregunta important és com encaixar els fenòmens electroestàtics en el model. Maxwell va considerar que el medi era elàstic. D'aquesta manera les forces magnètiques s'expliquen per rotacions en el medi, i les forces elèctriques per distorsió elàstica. Qualsevol medi elàstic és capaç de transmetre ones. En el medi de Maxwell la velocitat de les ones resulta estar relacionada amb el quocient entre forces elèctriques i magnètiques. A partir d'un experiment realitzat per G. Kohlrausch i W. Weber l'any 1856, Maxwell troba que la velocitat de propagació és igual a la de la llum. Amb excitació manifestava en lletres cursives "*no és possible refusar la deducció de que la llum està constituïda per una ondulació transversal del mateix medi que és la causa dels fenòmens elèctrics i magnètics*".



Un cop fet el gran descobriment, Maxwell va suprimir tot allò que podia molestar-lo en el seu model. En lloc d'intentar una explicació mecànica més refinada dels fenòmens, va formular un sistema d'equacions electromagnètiques de les quals va deduir que les ones de força elèctriques i magnètiques es propaguen a través de l'espai amb la velocitat de la llum. Per això, la teoria es denomina *teoria electromagnètica de la llum*, en contrast amb les teories de l'èter. La teoria es va fer pública en dos articles de 1865 i 1868, i en la seva forma més general en el *Treatise on Electricity and Magnetism*, publicat l'any 1873 en un treball tan perfecte que Robert Andrews Millikan, autor del famós experiment de la gota líquida per mesurar la càrrega de l'electró, el va comparar amb els *Principia* de Newton considerant als dos com els llibres de màxima influència en la història de la física, "un d'ells ha creat el món mecànic modern i l'altre el món elèctric".

Igualment de profundes van ser les contribucions de Maxwell a la física estadística i molecular. Es van iniciar amb una publicació l'any 1859 sobre la teoria cinètica dels gasos, en la que Maxwell introdueix la funció de distribució de velocitats i va enunciar el *teorema de la equipartició*, que en la seva forma original enuncitava que les energies translacionals i rotacionals mitges d'un gran nombre de molècules que es troben col·lisionant, ja siguin de la mateixa o de diferents espècies, són iguals. Una conclusió sorprenent, posteriorment confirmada experimentalment per Maxwell i la seva dona Katherine Mary Dewar, era que la viscositat d'un gas era independent de la pressió en un ampli interval. Un altre resultat va ser la estimació de Maxwell del recorregut lliure mitjà d'una molècula gasosa. que en 1865 Loschmidt va aplicar per realitzar les primeres estimacions sèries dels diàmetres de les molècules. Posteriorment, Maxwell va desenvolupar la teoria general dels fenòmens de transport, de les que deriven les equacions de Boltzmann; va crear la dinàmica de gasos enrarits. Si els seus èxits en mecànica clàssica estadística van ser brillants, els seus fracassos van ser d'alguna manera més cridaners. El teorema de la equipartició va donar la resposta a la raó per la qual el quocient dels calors específics dels gasos estava en desacord amb els resultats experimentals, mentre que alguns dels teoremes de Boltzmann "explicaven massa" ja que es podien aplicar tant a les propietats dels sòlids i líquids com als gasos. Aquests temes van quedar envoltats de misteri sense solució fins que l'any 1900 va sorgir la hipòtesi quàntica de Planck. Escrivint respecte això el 1877, Maxwell va confessar el seu desconcert i va dir al respecte que "la ignorància conscient és el preludi de cadascun dels avenços reals en el coneixement".

Maxwell era un home sensible, de fortes creences religioses i amb molt sentit de l'humor. Moltes de les seves cartes revelen un toc d'ironia. També tenia un discret talent com a



poeta normalment alegre, però ocasionalment profund. La última estrofa d'una poema dedicat a la seva dona, escrit el 1867, era:

“All powers of mind, all force of will,
May lie in dust when we are dead,
But love is ours, and shall be still,
When earth and seas are fled.”

11. ENERGIA DEL CAMP

Quan es parla del nostre planeta es diu que l'energia total del món és constant, però ara es vol estendre el concepte de conservació de l'energia en un sentit important, en un sentit que digui detalladament sobre com es conserva l'energia. La nova llei indicarà que si d'una regió surt energia és perquè flueix a través del contorn d'aquella regió. Aquesta llei és una mica més “ferta” que la conservació de l'energia sense aquesta restricció.

Per veure més clara la llei de conservació de l'energia, primer s'observarà com funciona la llei de conservació de la càrrega. Es descriurà la conservació de la càrrega afirmant que hi ha una densitat de corrent $\mathbf{j}$ i una densitat de càrrega ρ , i quan la càrrega disminueix en alguna part hi ha d'haver un flux d'aquesta càrrega sortint d'aquell lloc. A això es denomina conservació de la càrrega. La forma matemàtica de la llei de conservació és:

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

Aquesta llei implica que la càrrega total del món sempre és constant, mai hi ha ni guanys ni pèrdues netes de càrrega. Però, la càrrega total del món podria ser constant d'una altra manera. Suposem que hi ha una càrrega Q_1 a prop d'un punt (1) mentre que no hi ha càrrega a prop del punt (2) a certa distància. Suposem que ara a mesura que transcorre el temps la càrrega Q_1 desapareix gradualment i que simultàniament amb la disminució de la Q_1 apareix una certa Q_2 a prop del punt (2) de manera que en cada moment la suma de Q_1 i Q_2 és constant. Llavors, en qualsevol estat intermedi de la quantitat de càrrega perduda per Q_1 s'agregaria a Q_2 . Llavors la quantitat total de càrrega del món es conservaria.

Hi ha una dificultat amb aquesta llei de conservació “mundial” en la teoria de la relativitat. El concepte de “instants simultanis” en punts distants no és equivalent en sistemes diferents.



Dos esdeveniments simultanis en un sistema no són simultanis en un altre sistema que es mou respecte a l'altre. Per la conservació “mundial” que s’ha descrit, és necessari que la càrrega perduda en Q_1 aparegui simultàniament en Q_2 sinó, hi hauria instants en que la càrrega no es conservaria. Sembla que no hi ha cap manera d’aconseguir que la llei de conservació de la càrrega sigui relativísticament invariant sense fer-la una llei de conservació “local”. En la teoria moderna quàntica de camps, per exemple, moltes vegades s’ha volgut alterar la teoria permetent el que anomenem una interacció “no local”, on alguna cosa que és *aquí* tingui un efecte directe sobre alguna cosa que és *allà*, però acaba tenint dificultats amb el principi de relativitat.

La conservació “local” implica una altra idea. Diu que una càrrega pot anar d’un lloc a un altre únicament si succeeix alguna cosa en l’espai intermedi. Per descriure la llei no només necessitem la densitat de càrrega ρ , sinó també un altre tipus de quantitat, o sigui $\mathbf{j}$, un vector que dóna la rapidesa del flux de càrrega a través d’una superfície. Llavors, el flux es relaciona amb la rapidesa de variació temporal de la densitat de càrrega per mitjà de l’equació descrita al principi d’aquest apartat. Aquest és el tipus més extrem de la llei de la conservació. Indica que la càrrega es conserva d’una manera especial: es conserva “localment”.

Resulta que la conservació de l’energia també és un procés local. No només hi ha una densitat d’energia en una regió de l’espai sinó també un vector per representar la rapidesa del flux d’energia a través de la superfície. Per exemple, quan una font lluminosa irradia llum, es pot trobar l’energia lluminosa que s’allunya de la font. Si imaginem una superfície matemàtica envoltant la font lluminosa, l’energia perduda des de dins de la superfície és igual a l’energia que flueix de la superfície cap a fora.

11.1 Conservació de l’energia i electromagnetisme

Ara s’escriurà quantitativament la llei de conservació de l’energia en l’electromagnetisme. Per fer-ho es necessitarà descriure quanta energia hi ha en qualsevol element de volum de l’espai i , a més a més, la rapidesa del flux d’energia. Es representarà amb u la densitat d’energia del camp, és a dir, la quantitat d’energia per unitat de volum, i amb un vector $\mathbf{S}$ es representarà el flux d’energia de camp, és a dir, l’energia que flueix per unitat de temps a través d’una àrea. Es pot escriure la llei “local” de conservació de l’energia del camp en la forma següent:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{S}$$



És clar que aquesta llei no és vàlida en general. No és cert que l'energia del camp es conservi. Suposem que estem en un lloc fosc i encenem la llum, de sobte aquell lloc queda ple de llum, així que hi ha energia en el camp, encara que no n'hi havia abans. L'equació descrita anteriorment no és la llei completa de conservació, perquè l'energia del camp sola no es conserva, només l'energia total del món. L'energia del camp variarà si la matèria realitza algun treball sobre el camp o el camp sobre la matèria.

Però, si hi ha matèria dins de l'objecte d'estudi, sabem quanta energia conté: cada partícula té una energia $m_0 c^2 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$. L'energia total de la matèria és simplement la suma de l'energia de totes les partícules i el flux d'aquesta energia a través d'una superfície és la suma de l'energia que transporta cada partícula que creua la superfície. Ara només volem parlar de l'energia del camp electromagnètic. Així doncs, s'ha d'escriure una equació que digui que l'energia total del camp en un volum donat disminueix ja sigui perquè l'energia flueix sortint del volum, o ja sigui perquè el camp perd energia que cedeix a la matèria (o guanya energia, que és simplement una pèrdua negativa). L'energia del camp dins d'un volum V és:

$$\int_V u \, dV$$

12. CORRENTS INDUÏDES

12.1 Motors i generadors

El descobriment de que hi havia una relació entre l'electricitat i magnetisme en l'any 1820 va ser molt emocionant, abans es pensava que els dos temes eren completament independents. El primer descobriment va ser que corrents que circulen per cables produeixen camps magnètics; més endavant, en el mateix any, es va descobrir que en cables per on hi circulen corrents, si es posen en contacte amb un camp magnètic, experimenten forces.

Un aspecte interessant és que sempre que hi hagi una força mecànica, existeix la possibilitat de fer-la servir en una màquina per realitzar algun treball. Quasi immediatament després del seu descobriment, la gent va començar a dissenyar motors elèctrics fent servir les forces sobre cables amb corrent.

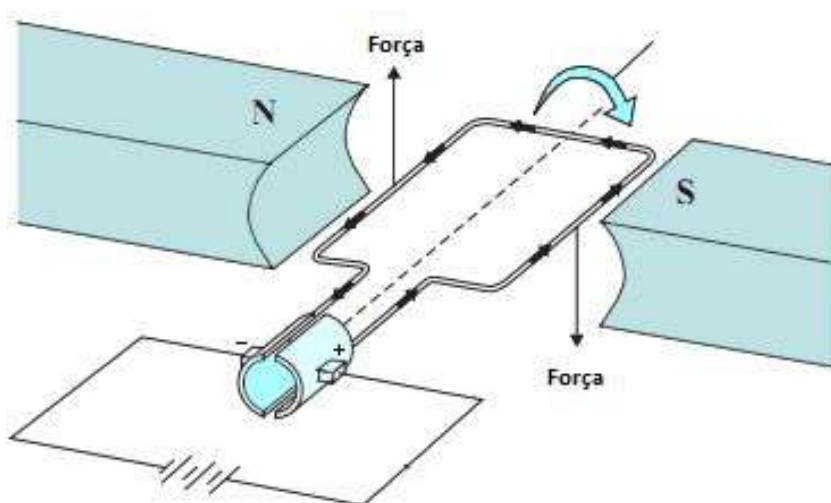


Figura 15

La Figura 15 mostra el principi de funcionament dels motors el·lectromagnètics. Un imant permanent es fa servir per produir un camp magnètic. Es col·loca una bobina rectangular de coure entre els dos imants. Quan passa un corrent per la bobina, circula en direccions oposades en els dos costats, de manera que les forces també són oposades, produint un gir sobre la bobina respecte l'eix inicial. Si es construeix la bobina sobre un eix de manera que pugui girar, es pot acoblar a politges o engranatges i pot realitzar un treball.

Es pot utilitzar la mateixa idea per fer un instrument sensible per mesures elèctriques. Per això, en el moment en que es va descobrir la llei de la força, va augmentar la precisió de les mesures elèctriques. Primer, es pot fer el gir del motor molt més gran per un corrent determinat fent que el corrent passi per moltes espires a la vegada en comptes d'una. Llavors, es pot muntar la bobina de manera que tingui un gir molt petit. Seguidament un corrent petitíssim farà girar la bobina i per angles més petits el que roti serà proporcional al corrent. Es pot mesurar la rotació enganxant un indicador a la bobina o, pels instruments més delicats, fixant un mirall petit a la bobina i observant el moviment de l'imatge d'una escala. Aquests instruments s'anomenen galvanòmetres. Els voltímetres i els amperímetres es basen en el mateix principi.

Es poden aplicar les mateixes idees a gran escala per fer grans motors per subministrar potència mecànica. Es pot fer que la bobina doni voltes i més voltes de manera que les connexions a la bobina s'inverteixin cada mitja volta per mitjà de contactes sobre l'eix. Llavors el gir sempre estarà en la mateixa direcció. Els petits motors de CC (Corrent



Contínua) estan fets d'aquesta manera. Els motors de CC o CA (Corrent Alterna), estan fets, a vegades, substituint l'imant permanent per un electroimant.

En adonar-se que els corrents elèctrics produeixen camps magnètics, la gent va suggerir immediatament que d'alguna manera podria ser que els imants produeixin camps elèctrics. Es van intentar varis experiments. Per exemple, es van posar dos cables paral·lels i es va fer passar un corrent per un d'ells amb l'esperança de trobar un corrent en l'altre. Es pensava que el camp magnètic podia d'alguna manera arrossegar els electrons al llarg del segon cable, donant una llei com “ les semblants prefereixen moure's de forma semblant”. Amb el major corrent disponible i el galvanòmetre més sensible per detectar qualsevol corrent, el resultat va ser negatiu. Després dels cables, els grans imants tampoc van produir efectes observables. Finalment, Faraday va descobrir l'any 1840 el punt fonamental que se'ls hi havia escapat; existeixen efectes elèctrics únicament quan alguna cosa està variant. Si de dos cables un té un corrent variable, s'introdueix un corrent en l'altre, o si es mou un imant a prop d'un circuit elèctric, hi ha un corrent. En aquests casos les anomenem corrents induïdes. Aquest va ser l'efecte d'inducció descobert per Faraday. Va transformar el tema bastant avorrit de camps estàtics en un tema molt incitant i dinàmic amb una gran gamma de fenòmens extraordinaris.

12.2 El principi del telègraf

Suposem que tenim un cable que passa a prop d'un camp magnètic, com mostra la figura 16, i que connectem els extrems del cable a un galvanòmetre. Si movem el cable transversalment davant l'imant, l'indicador del galvanòmetre es mou.

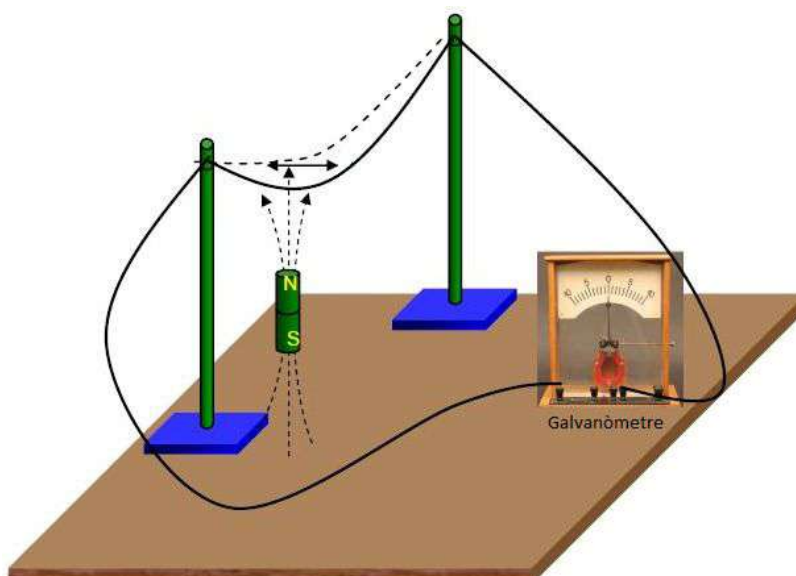


Figura 16



L'imant produeix un cert camp magnètic vertical i quan empenyem el cable transversalment al camp, els electrons del cable experimenten una força lateral, perpendicular al camp i al moviment. La força empeny els electrons al llarg del cable. Però, per què això fa moure al galvanòmetre que està tan lluny de la força? Perquè quan els electrons que experimenten la força magnètica s'intenten moure, empenyen, per repulsió electroestàtica, els electrons que estan una mica més enllà en el cable, a la vegada, aquests repel·len els electrons que estan una mica més lluny i així successivament.

A en Gauss i en Weber els hi va resultar tant impressionant (van ser els primers en construir un galvanòmetre) que van intentar de veure fins on arribaven les forces en el cable. Van estendre un cable a través de tota la seva ciutat. En un extrem, Gauss va connectar els cables a una bateria (es coneixien les bateries abans que els generadors) i en Weber va observar que el galvanòmetre es movia. Tenien una manera de transmetre senyals a grans distàncies. Va ser el principi del telègraf. És clar que, això no té res a veure directament amb la inducció, té a veure amb la manera en la que els cables transporten corrents.

Suposem que ara en la figura 16, en lloc de moure el cable movem l'imant. Encara observem un efecte sobre el galvanòmetre. Exactament com ho va descobrir Faraday, moure l'imant sota el cable, en un sentit, té el mateix efecte que moure el cable sobre l'imant, en l'altre sentit.

12.3 La tecnologia elèctrica

Quan Faraday va fer públic el seu descobriment que un flux magnètic variable produeix una **fem** (força electromotriu), li van preguntar (exactament com li pregunten a qualsevol quan descobreix un nou fet de la naturalesa): "per a què serveix?". Tot el que havia descobert era la particularitat que es produïa un corrent petit quan movia un cable a prop d'un imant. Quina podria ser la "utilitat" d'això? Ell va respondre: Quina és la utilitat d'un nadó acabat de néixer?".

Hi ha un interminable número d'aplicacions i problemes que es poden incloure en les lleis de la inducció. L'estudi del disseny de màquines elèctriques és un treball per a tota una vida. No es pot anar molt lluny en aquesta direcció, però s'ha de ser conscient que descobrint la llei de la inducció, s'ha connectat la teoria amb un desenvolupament pràctic enorme. Però, s'ha de deixar aquest tema als enginyers i als científics aplicats que estan interessats en resoldre els detalls de les aplicacions particulars. La física dóna únicament la base, els principis bàsics que seran desenvolupats per construir maquinària que ningú es podria haver imaginat mai.



La tecnologia elèctrica moderna va començar amb els descobriments de Faraday. El nadó inútil es va convertir en un prodigi i va canviar la Terra d'una manera que el seu orgullós pare mai s'hauria imaginat.

No podem parlar de l'energia del camp d'una càrrega puntual, el momentum del camp, la massa electromagnètica, la força d'un electró sobre si mateix i els intents de modificar la teoria de Maxwell per la complicació i l'elevat coneixement que s'ha de tenir de matemàtiques.

13. CONSTANTS FÍSQUES

Constant de Boltzman	k	$1'381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
Constant de Coulomb	k_0 (al buit)	$9 \cdot 10^{-9} \text{ N-m}^2/\text{C}^2$
Càrrega fonamental	e	$1'602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Massa de l'electró	m_e	$9'1095 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Massa del protó	m_p	$1'673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Massa del neutró	m_n	$1'675 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Permeabilitat de l'espai lliure	μ_p	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$
Constant de Planck	h	$6'626 \cdot 10^{-34} \text{ J-s}$
Velocitat de la llum	c	$2'998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$



14. PART PRÀCTICA

Pràctica 1: El deflector

Objectius

Entendre què és el camp elèctric i com desvia un feix de càrregues. Entendre què és el camp magnètic i com desvia un feix de càrregues. Entendre el concepte de camps creuats.

Marc teòric

En la pràctica disposem d'un tub de rajos catòdics que emet un feix de càrregues. És molt important que no es toqui cap connexió elèctrica per tal de no rebre una descàrrega. Dins del tub de rajos catòdics tenim dues plaques metàl·liques que les podem carregar i obtindrem un camp elèctric entre les plaques. Les plaques estan separades per 52 mm. També disposem de dues bobines de coure de 136 mm de diàmetre i 320 voltes per les que podem fer circular corrent i generant en aquest cas un camp magnètic en la direcció del seu eix. En la figura 17 es pot observar un esquema del deflector.

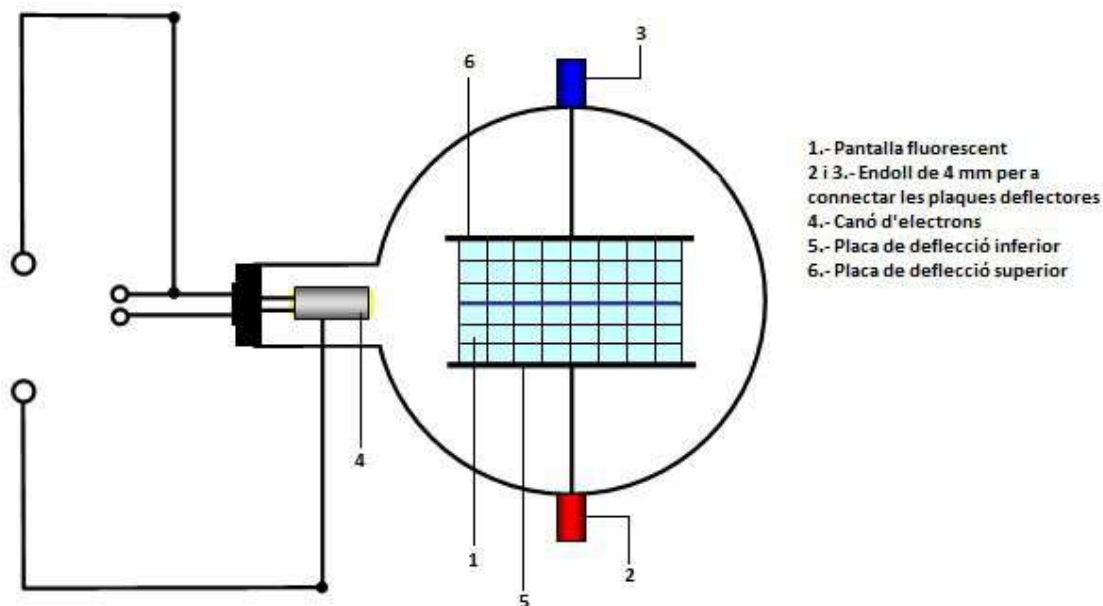


Figura 17



Quan una càrrega **Q** qualsevol està situada en un camp elèctric **E**, aquesta càrrega rep una força que és proporcional al camp i que s'expressa com:

$$F_e = Q E$$

Quan una càrrega **Q** està en moviment a velocitat **v** sota els efectes d'un camp magnètic **B**, la força que actua sobre la càrrega s'expressa com:

$$F_m = Q (v \times B)$$

Com que la força resulta del producte vectorial de **v** i **B**, aquesta força serà perpendicular a la velocitat. Això vol dir que la força no accelerarà el feix de càrregues sinó que només el desviarà.

Quan una càrrega està sotmesa a l'efecte d'un camp magnètic i un camp elèctric de manera que tots dos actuen en la mateixa direcció però en sentits oposats, la força resultant del camp elèctric pot arribar-se a compensar amb la força resultant del camp magnètic. Aleshores tindríem una situació on es compliria,

$$Q E = Q (v \times B)$$

Simplificant càrregues ens quedaria: $E = v \times B$

Aquesta és la situació de camps creuats i ens permet determinar la velocitat d'un feix de càrregues.

Per a crear un camp magnètic el deflector porta incorporades dues bobines de Helmholtz. Les bobines de Helmholtz es componen de dos solenoides situats en el mateix eix separats per una distància igual a la meitat del seu radi. Aquestes bobines són molt útils en experiments ja que creen un camp magnètic gairebé uniforme. Estan situades una a cada costat de l'àrea experimental.

Cal tenir present que el camp magnètic **B** creat per les bobines de Helmholtz es pot calcular a partir de l'expressió:

$$B = \frac{\mu_0 R^2 N I}{(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}}$$

on **R** representa el radi de les bobines, **N** el nombre de voltes, **I** la intensitat que hi circula i la **x** la distància respecte a una de les bobines on es vol calcular el camp magnètic.

Material

- Deflector (5500 V)
- Generador



Procediment

- 1.- Connectar el deflector al generador
- 2.- Observar el feix sense camps
- 3.- Aplicar el camp elèctric i observar
- 4.- Aplicar el camp magnètic i observar l'efecte dels dos camps
- 5.- Desactivar el camp elèctric i observar l'efecte de $\mathbf{B}$

Resultats obtinguts

1.- Feix de càrregues sense cap camp

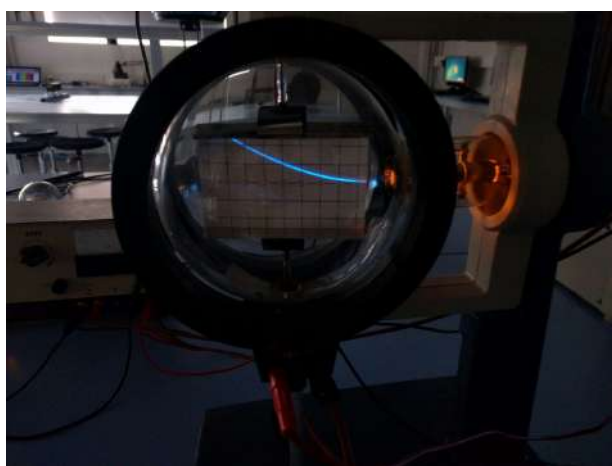


Figura 18

2.- Feix de càrregues en un camp elèctric

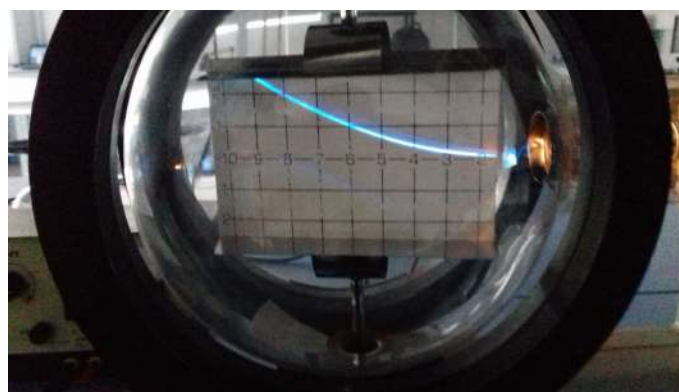


Figura 19

3.- Feix de càrregues en un camp magnètic



Figura 20

4.- Feix de càrregues en un camp elèctric i potenciant el camp magnètic



Figura 21



Interpretació dels resultats

En la figura 18 podem observar una corba cap amunt que en teoria no hi hauria de ser, hauria de ser una línia recta ja que no hi actuen ni camps elèctrics ni magnètics en el feix de càrregues.

En la figura 19 podem observar com el feix de càrregues descriu una corba cap amunt. El camp elèctric actua correctament.

En la figura 20 on s'hi ha aplicat només el camp magnètic observem que el feix de càrregues segueix una línia recta, però tenint en compte que hi actua un camp magnètic hauria de descriure una corba cap amunt o cap avall en funció de la càrrega elèctrica que tinguin les partícules.

En la figura 21 on hi actuen al mateix temps els camps elèctric i el magnètic potenciat s'observa que el feix de càrregues forma una corba cap avall.

Si apliquem tot el que hem estudiat ràpidament ens adonem que els resultats obtinguts no tenen gens de sentit. Com pot ser que si no actua cap camp elèctric ni magnètic el feix de càrregues descriu una corba? Com pot ser que només actuant el camp magnètic el feix descriu una recta? Aquí podem donar dues possibles explicacions, la primera: hem oblidat algun detall quan realitzàvem l'experiment o la segona i menys probable: les lleis conegudes fins ara de l'electromagnetisme són errònies.

Ja que un experiment mai és totalment verídic si només es realitza una vegada vam decidir fer-ne una rèplica per obtenir més resultats.

Resultats de la rèplica

5.- $E = 0$, $B = 0$

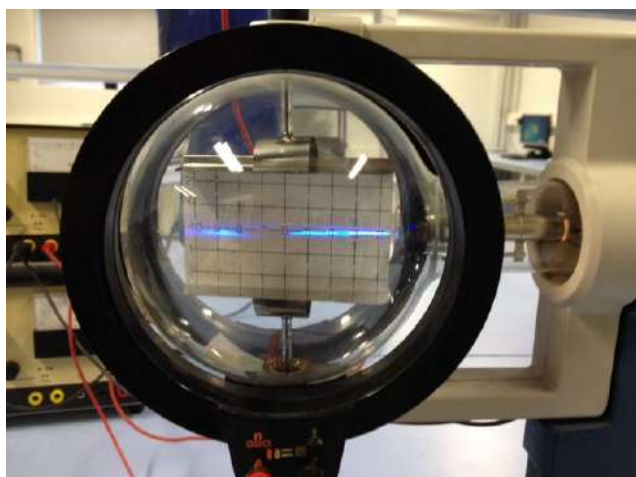


Figura 22

6.- Amb E , però $B = 0$

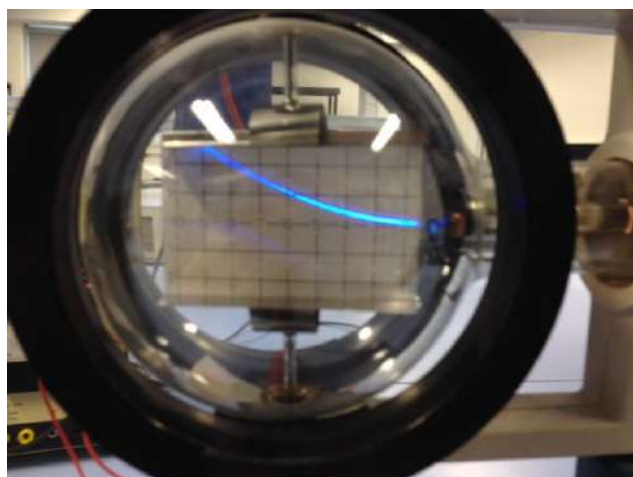


Figura 23



7.- Amb E, i B compensant-lo aproximadament (es veu $I = 0.458 \text{ A}$)

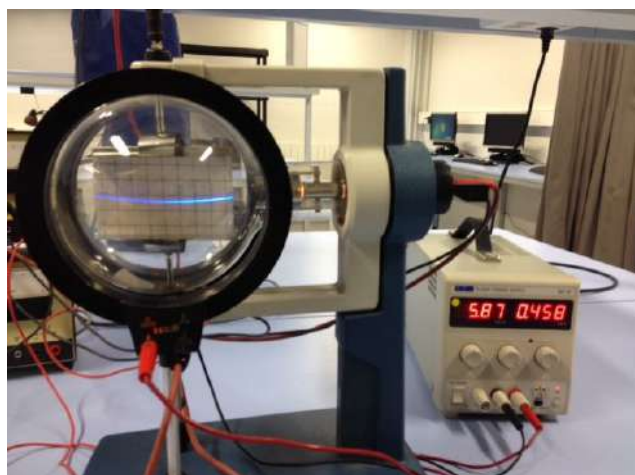


Figura 24

Quan vam realitzar la segona prova amb el deflector, i canviant el xip, vam veure que el problema que teníem era un detall que ens havíem deixat. La raó de perquè vam obtenir uns resultats erronis va ser la següent: quan desconnectàvem les plaques deflectores, que generen el camp elèctric, només ho feia la superior, la inferior quedava activada. Cal desconnectar les dues plaques, perquè si no la placa encara queda amb un cert potencial i produeix un camp elèctric romanent, el que vèiem. L'opció de que les lleis de l'electromagnetisme siguin falses queda descartada.

Interpretació dels resultats de la rèplica

En la figura 22 observem com el feix de partícules segueix una trajectòria recta sense cap desviació ni cap amunt ni cap avall ja que tant el camp elèctric com el magnètic estan desactivats.

En la figura 23 podem observar l'efecte del camp elèctric sobre les partícules carregades que descriuen una corba cap amunt.

En la figura 24 observem com el camp magnètic contraresta la força exercida pel camp elèctric descrivint una recta gairebé perfecta. A la dreta de la imatge podem observar la intensitat elèctrica que hem hagut de subministrar per crear un camp magnètic que exerceixi una força igual a la del camp elèctric.



Identificar el tipus de partícules del feix

El camp elèctric que crea el deflector surt des de la placa deflectora superior i acaba en la placa deflectora inferior. Recordem que el camp sempre surt de la càrrega positiva i acaba en la càrrega negativa, per tant, la placa superior té carrega positiva i la inferior té carrega negativa. Quan apliquem **E** en el feix, observem que descriu una corba cap amunt. Per tant, s'allunya del negatiu i s'acosta al positiu. Les partícules que coneixem que repel·len les càrregues negatives i atrauen càrregues positives són els electrons. Amb aquesta afirmació podem extreure la conclusió de que les partícules que constitueixen el feix són electrons ja que es veuen repel·lits per la càrrega del seu mateix signe i atrets per la càrrega del signe contrari.

Velocitat a la que viatgen les partícules

$$\Delta E_m = 0 \quad E_{m_0} = E_{m_f} \quad E_{p_e} = E_c$$

Per calcular la velocitat a la que viatgen els electrons hem utilitzat les fórmules de l'energia mecànica. Hem igualat l'energia mecànica inicial amb l'energia mecànica final ja que no hi intervenen forces externes perquè on es desapareixen els electrons hi ha el buit. L'energia que tenen inicialment els electrons és energia potencial elèctrica i l'energia que tenen al final és energia cinètica.

$$E_{p_e} = k \frac{Q_1 Q_2}{r} \quad V = k \frac{Q}{r} \quad E_{p_e} = Q \Delta V \quad Q \Delta V = \frac{1}{2} m v^2$$

En la fórmula de l'energia potencial elèctrica hi intervenen dues càrregues, però podem substituir una part de l'expressió pel voltatge que sí que coneixem deixant així la fórmula de l'energia potencial elèctrica amb només càrrega multiplicada pel voltatge. Igualem l'energia cinètica amb la potencial elèctrica

$$1'6 \cdot 10^{-19} \cdot 5500 = \frac{1}{2} 9'1 \cdot 10^{-31} v^2 \quad v = \sqrt{\frac{1'6 \cdot 10^{-19} \cdot 5500 \cdot 2}{9'1 \cdot 10^{-31}}} = 43,978,016'49 \text{ m/s}$$

Substituïm els valors que coneixem i aïllem la velocitat per conèixer com de ràpid es mouen les partícules.



$$\frac{43,978,016'49 \text{ m/s}}{299,792,458 \text{ m/s}} \cdot 100 = 14'67 \%$$

Sembla que la velocitat obtinguda és una velocitat molt alta, però si la comparem amb la velocitat de la llum calculem que només és un 14'67% de la seva velocitat.

Quina intensitat s'ha d'aplicar a les bobines de Helmholtz per a què la força magnètica sigui igual a la força elèctrica quan actuen els dos camps a la vegada?

Càlcul de la força elèctrica:

$$F_e = Q E \quad E \simeq \frac{\Delta V}{d} \quad E = \frac{5500}{0'052} = 105,769'23 \text{ N/C}$$

La fórmula de la força elèctrica és igual a càrrega per camp elèctric. El camp elèctric podem dir que és equivalent a dividir el voltatge per la distància que hi ha entre les plaques deflectores que creen el camp.

$$F_e = 1'6 \cdot 10^{-19} \cdot 105,769'23 = 1'69 \cdot 10^{-14} \text{ N}$$

Càlcul de la intensitat per a produir una força magnètica igual a la força elèctrica:

$$B = \frac{\mu_0 R^2 N I}{(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \quad x = \frac{R}{2} \quad B = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \cdot \frac{\mu_0 N}{R} \cdot I$$

Per a calcular la intensitat que volem trobar hem d'utilitzar aquesta fórmula que calcula el camp magnètic creat per les bobines de Helmotz, que simplificada (sabent que $x=R/2$) trobem l'expressió de la dreta.

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \cdot \frac{4\pi 10^{-7} \cdot 320}{0'068} \cdot I = I \cdot 4'23 \text{ mT/A}$$



Substituint totes les dades que coneixem obtenim 4'23 mT en funció de la intensitat.

$$F_m = F_e$$

Per poder aïllar la intensitat de la fórmula anterior necessitem igualar les forces elèctriques i magnètiques (la força elèctrica ja la coneixem perquè l'hem calculat abans).

$$F_m = Q (v \times B) = 1'69 \cdot 10^{-14} N \quad B = \frac{1'69 \cdot 10^{-14}}{43,978,016'49 \cdot 1'6 \cdot 10^{-19}} = 2'4 \text{ mT}$$

Substituint els valors que coneixem a la fórmula i aïllant el camp magnètic obtenim que és igual a 2'4 mT.

$$B = I \cdot 4'23 \quad 2'4 = I \cdot 4'23 \quad I = \frac{2'4}{4'23} = 0'57 \text{ A}$$

Recordant el resultat obtingut per calcular el camp magnètic que creen les bobines de Helmholtz en funció de I, substituïm el resultat calculat amb la fórmula de la llei de Lorentz i obtenim que la intensitat necessària per a igualar la força elèctrica amb la força magnètica és 0'57 A.

Experimentalment vam trobar que la intensitat necessària aproximada és d'uns 0'46 A, que no és igual a la que hem estimat teòricament de 0'57 A, per tant, la desviació relativa és de:

$$\frac{100 \cdot (0'46 - 0'57)}{0'57} = -19'3 \%$$

Dades:

Càrrega de l'electró: $1'6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Voltatge del deflector: 5500 V

Distància entre plaques deflectores: 0'052 m

Permeabilitat magnètica (μ_0): $4\pi 10^{-7} \text{ N/A}^2$

Radi de les bobines: 0'068 m

Nombre de voltes de les bobines: 320 voltes

Velocitat de les partícules (calculada anteriorment): 43,978,016'49 m/s



Pràctica 2: Màquina de moviment perpetu amb imants

Objectiu:

Falsejar la teoria que diu que el moviment perpetu no existeix construint una màquina que sigui impulsada per la repulsió i l'atracció d'imants.

Material:

- 6 imants de neodimi
- 1 ventilador (es pot extreure d'un ordinador vell)
- Cola instantània

Marc teòric:

Una màquina de moviment perpetu és una màquina que funciona de manera ininterrompuda sense combustible ni ajuda de cap font extra d'energia.

La teoria diu que el moviment perpetu com a tal no existeix, però i els planetes i els asteroides què? Si un asteroide rep un impuls en un espai perfectament buit, llavors l'asteroide començaria a allunyar-se a una velocitat constant per la resta de l'eternitat.

Però, això passaria en un buit perfecte. En realitat, en l'espai no està completament buit, també hi ha matèria, molt poca, entre 0'1 i 100 àtoms per centímetre cúbic segons on es mesuri. Com que els asteroides i planetes es troben de tant en tant algun àtom en mig de la seva trajectòria que s'oposi al seu moviment, sempre existirà una molt i molt petita fricció.

Aquesta força serà extremadament petita. Un asteroide tardaria milers de mil·lions, si no bil·lions d'anys en aturar-se en l'espai real. Per això precisament els planetes poden donar voltes a les estrelles en òrbites estables. Els planetes perden una mica de velocitat quan interaccionen amb la matèria de l'espai, però es tracta d'una magnitud tan ridícula que per notar els seus efectes s'haurien d'observar durant un període de temps increïblement llarg, però finit. Per tant, el moviment vertaderament perpetu etern, no existeix ni tan sols en l'espai, el lloc on les coses experimenten la menor fricció possible. És per això que, precisament, la fricció és el principal enemic de les màquines de moviment perpetu.

Fins i tot sense tenir en compte la fricció de les peces amb l'aire, totes les màquines de moviment perpetu deixen de funcionar després d'un període de temps més o menys llarg



per aquest motiu: estan compostes per peces mòbils que es troben en contacte entre si quan es mouen i allà on existeixi un moviment i dues superfícies en contacte, hi haurà una fricció. De fet, la fricció és el motiu pel qual una part de l'energia de les màquines mai arriba a convertir-se en moviment. Per exemple, l'energia alliberada en un motor d'un cotxe es perd per la fricció en forma de calor.

Procediment:

1.- Enganxar amb cola instantània quatre imants de neodimi seguits en les fulles del ventilador de manera que tots els imants tinguin el mateix pol apuntant cap al mateix lloc, o cap amunt o cap avall.

2.- Amb els imants sobrants, els acostem a l'aparell.

3.- Observem què passa.

Resultats:



Figura 25

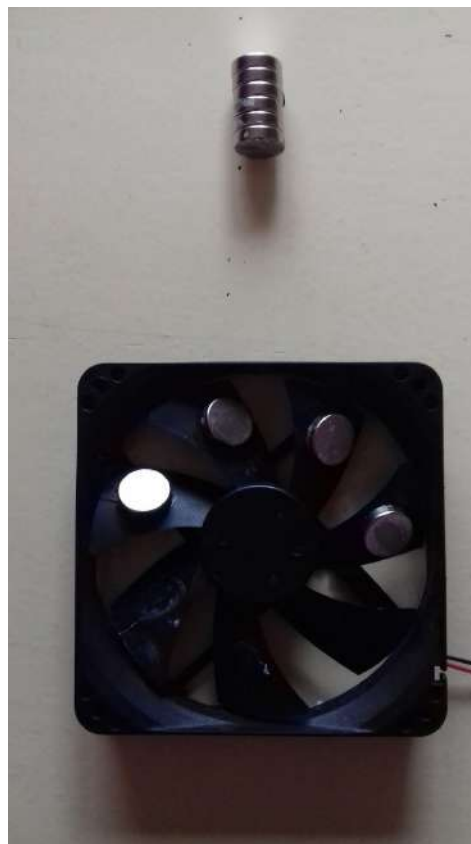


Figura 26



Interpretació dels resultats:

En la figura 25, on els imants són repel·lits, es pot observar que els imants enganxats al ventilador resten en repòs a la màxima distància possible dels imants exteriors.

En la figura 26, on els imants són atrets, es pot observar que els imants del ventilador resten a la mínima distància possible dels imants exteriors.

En cap dels dos casos el ventilador ha començat a girar impulsat per la repulsió o l'atracció dels imants exteriors, la única manera d'aconseguir que el ventilador s'accelerés era movent els imants exteriors i si movem els imants exteriors estem gastant energia, per tant, ja no és una màquina de moviment perpetu, ja que consumeix energia.

En els dos casos els imants han romàs en el punt on són mecànicament són més estables.



Pràctica 3: Observació del camp magnètic

Objectiu:

Observar el camp magnètic d'ímants amb diferents forces.

Material:

- Ímants de neodimi
- Ímants fets per aliatges
- Pols de ferro
- Full de paper (A3)

Procediment:

- 1.- Col·locar sota el full un ímant fet per aliatges.
- 2.- Escampar les llimadures de ferro sobre el full..
- 3.- Amb la mà, distribuir les llimadures per la zona dels voltants de l'ímant.
- 4.- Reproduir els passos 1,2 i 3 amb els ímants de neodimi.

Resultats:

Imatges del camp magnètic dels ímants d'aliatges:



Figura 27



Figura 28



Imatges del camp magnètic d'ímants de neodimi:

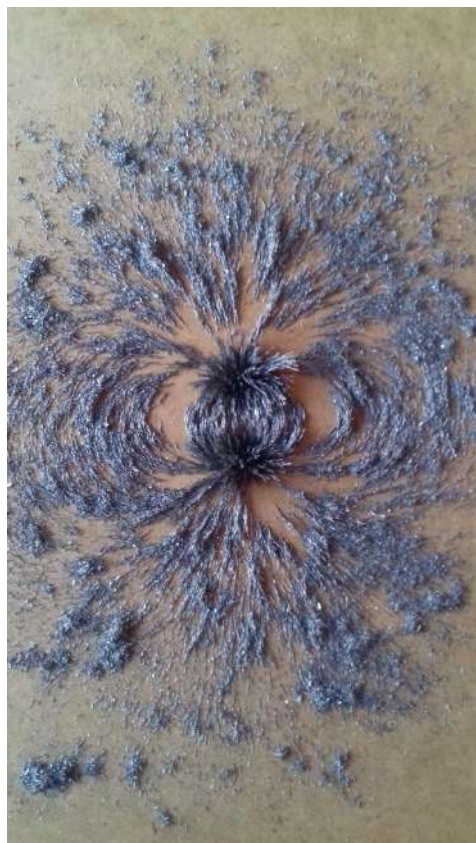


Figura 29



Figura 30

Interpretació dels resultats:

Les línies que podem observar gràcies a les llimadures de ferro són les línies de camp magnètic. Podem apreciar que la major concentració de línies de força està a prop dels pols, on és major la intensitat del camp.

Les imatges que veiem són només una part del camp magnètic, ja que el que hem observat és en dues dimensions perquè les llimadures de ferro són sobre un full i el camp magnètic és present també en la tercera dimensió.

En les figures 28 i 30 podem observar les línies verticals del camp magnètic.

En la figura 29 podem observar el camp magnètic lateralment.

En la figura 31 podem observar el camp magnètic en l'eix transversal d'un sol pol.



Explicació:

Les interaccions magnètiques, igual que les gravitatòries o les elèctriques, són forces a distància. Al voltant dels imants, o de les càrregues elèctriques en moviment, es crea un camp de forces que s'anomena camp magnètic.

El camp magnètic es pot estudiar a partir del concepte de les línies de força, exposat per Faraday l'any 1831. Les propietats de les línies de força són les següents:

- Les línies de força surten per pol nord i entren pel pol sud.
- Les línies no es tallen ni es creuen en cap moment, són línies tancades.
- La quantitat de línies en un punt és proporcional a la intensitat del camp en aquest punt.
- La recta tangent a la línia de camp en un punt, indica la direcció del camp magnètic en aquest punt.

L'orientació de les llimadures de ferro ens permet fer-nos una idea de com és la direcció del camp magnètic i la seva intensitat, que és major on hi ha més concentració de llimadures.

En el sistema internacional (SI) la unitat per expressar la intensitat del camp magnètic és el Tesla (T).



15. CONCLUSIONS

A l'inici d'aquest treball es van plantejar uns objectius que eren conèixer i aprofundir en les lleis de l'electromagnetisme, observar la interacció de camps magnètics i camps elèctrics sobre un feix de partícules carregades elèctricament, falsejar la teoria que diu que el moviment perpetu no existeix i observar els camps magnètics d'imants amb diferents forces magnètiques.

En la pràctica 1, es va poder observar com els camps elèctric i magnètic repel·lien o atreïen el feix de càrregues. El camp elèctric sortia de la placa superior i acabava en la placa inferior, de manera que en la superior hi havia el camp elèctric positiu i en la inferior el camp elèctric negatiu. Observant el feix de càrregues que es desplaçava cap amunt vam poder concloure que les càrregues eren electrons ja que es veien atretes per la placa positiva i repel·lides per la placa negativa.

Observant quin efecte tenia el camp magnètic sobre el feix d'electrons es va poder determinar que el camp magnètic era invertit respecte el camp elèctric ja que la corba que descrivien els electrons era una corba cap avall.

En la pràctica 2, dels resultats obtinguts en l'intent de falsejar la teoria del moviment perpetu impulsat per imants es pot afirmar que si a un sistema no se li aplica una força externa per accelerar-lo, aquest sistema no canvia la seva velocitat de moviment.

Quan es van aplicar forces de repulsió en el sistema d'imants, l'únic moviment que va fer va ser el d'allunyar-se al màxim dels imants exteriors i quan es van aplicar forces d'atracció, els imants del ventilador es van moure de manera que estiguessin a la mínima distància possible de l'imant exterior.

En cap dels dos casos el ventilador va començar a girar impulsat per la repulsió o l'atracció dels imants exteriors, la única manera d'aconseguir que el ventilador s'accelerés era movent els imants exteriors i si movem els imants exteriors estem gastant energia, per tant, ja no és una màquina de moviment perpetu, ja que consumeix energia.

En els dos casos els imants han romàs en el punt on mecànicament són més estables.

Circulen per internet molts experiments i teories que diuen que és possible aquest moviment, que l'energia "gratuïta" és possible, però cap dels experiments disponibles a la xarxa tenen un procés experimental rigorós en el qual es pot observar al llarg del temps l'evolució de la màquina. Que les màquines funcionin al principi és degut al petit impuls que se'ls hi dona a l'inici de l'experiment. Pot ser que aquestes màquines només perdin un tant



per cent molt baix d'energia, però amb el temps aquestes màquines acabaran parant-se per l'energia que es perd pel fregament entre les mateixes peces del sistema i les peces en contacte amb l'aire.

En la pràctica 3, estudiant teòricament el camp magnètic es va afirmar que els camps magnètic i elèctric no són perceptibles als nostres sentits, per tant, per observar el camp es va necessitar quelcom que interactués amb ell. Les llimadures de ferro van ser les que van permetre que el nostre sentit de la vista pogués apreciar el camp magnètic.

Les línies de força del camp magnètic sempre sortien d'un pol i entraven en l'oposat. Com més a prop de l'imat, més llimadures de ferro hi havia, per tant, eren atretes amb més força.

Quan s'observava els imants fets per aleacions, es formaven poques línies de força comparades amb el camp magnètic dels imants de neodimi, que n'hi havia moltes més. Per determinar si un camp magnètic és més potent o més dèbil que un altre, cal observar la quantitat de línies de força que apareixen quan s'escampen les llimadures de ferro. A més concentració de llimadures, més intensa és la força magnètica.

Amb la informació recollida i els experiments realitzats he pogut assolir el meu objectiu principal que era conèixer i aprofundir en les lleis de l'electromagnetisme. Voldria comentar que ha estat una experiència molt positiva tant la realització de les pràctiques com l'aprenentatge del marc teòric. Tot i que alguns aspectes eren de difícil comprensió i el procediment experimental no era fàcil de dur a terme, he gaudit molt realitzant aquest treball i en un futur m'agradaria continuar investigant en aquest àmbit, tot cursant el Grau de Física, raó per la qual he volgut estudiar els fenòmens electromagnètics en l'apartat teòric que introdueix les experimentacions.



BIBLIOGRAFIA

FEYNMAN, Richard; LEIGHTON, Robert B. (1987). *The Feynman Lectures on Physics, Mainly Electromagnetism and Matter, Volume II*. 1a Edició: Wilmington, Delaware, E.U.A.: ADDISON-WESLEY IBEROAMERICANA.

L. D. LANDAU, E. M. LIFSHITZ. (1971). *The Classical Theory of Fields*. 3a Edició. Pergamon Press.

MERCADÉ, Joan; SERRA, Salvador; ARMENGOL, Montserrat. (2009). *Física Batxillerat 2*. 1a Edició. Aravaca (Madrid).

PEREIRA, Jordi. *¿Es posible construir una “máquina de movimiento perpetuo”?* [en línia]. 22 de novembre de 2015. [Consultat el juliol de 2017].

<<http://cienciadesofa.com/2015/11/es-posible-construir-maquina-movimiento-perpetuo.html>>

TIPLER, Paul A. (1987). *Física Tipler tomo II*. 2a Edició. Barcelona: EDITORIAL REVERTÉ, S.A.

VIQUIPÈDIA. *Camp magnètic* [en línia]. Viquipèdia. 25 de juliol de 2017. [Consultat el setembre de 2017].

<https://ca.wikipedia.org/wiki/Camp_magn%C3%A8tic>

WHITTAKER, Edmund Taylor. *A History of the Theories of Aether and Electricity: From the Age of Descartes to the Close of the Nineteenth Century* (en anglès). 2a Edició. Forgotten Books.

XTEC. *Efectes del magnetisme* [en línia]. Xtec. [Consultat el juny de 2017].

<http://www.xtec.cat/iesemperadorcarles/webfq/elisa/efectesmagnetisme/campmagnetic.htm>



INFOGRAFIA

Figura 1:

http://ioc.xtec.cat/materials/FP/Materials/2201_SMX/SMX_2201_M01/web/html/WebContent/u1/a1/continguts.html

Figura 2:

<http://www.tutorvista.com/content/physics/physics-iv/electric-charges/electric-flux.php>

Figura 3:

<https://earangoblog.wordpress.com/2012/01/29/regiones-equipotenciales-resumen/>

Figura 4:

<http://www.electrontools.com/Home/WP/2016/04/16/calculo-de-resistencias-en-paralelo-y-en-serie/>

Figura 5:

<http://www.electrontools.com/Home/WP/2016/04/16/calculo-de-resistencias-en-paralelo-y-en-serie/>

Figura 6 i 7: <https://www.slideshare.net/xrourai/camp-magntic-7377453>

Figura 8:

http://rabfis15.uco.es/proyecto/Fund_teoricos/movimiento%20de%20una%20particula%20en%20un%20campo.htm

Figura 9 i 10: http://www.upv.es/apnl/glossari_definitiu/magnetismo/ayuda/hlpciclo_v.htm

Figura 10 i 11:

http://www.loseskakeados.com/joomla/index.php?option=com_content&view=article&id=10192:meteorologa-electricidad-en-la-atmosfera&catid=347&Itemid=298

Figura 12:

http://ioc.xtec.cat/materials/FP/Materials/2201_SMX/SMX_2201_M01/web/html/WebContent/u1/a1/continguts.html



Figura 13: <http://www.enciclopedia.cat/EC-GEC-0084214.xml>

Figura 14: https://ca.wikipedia.org/wiki/Camp_magn%C3%A8tic

Figura 15: <https://brilliant.org/wiki/magnetic-field-lines/>

Figura 16:

http://www.cyberphysics.co.uk/Q&A/KS4/magnetism/motorEffect/questions_motor.html

Figura 17: <https://eficienciaenergeticaainversion0.files.wordpress.com/2011/02/dibujo1.jpg>

Figura 18:

http://www.schoolphysics.co.uk/age14-16/Atomic%20physics/text/Cathode_ray_deflection_tube/index.html

Figura 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29 i 30: Pròpia