Elektromagnetismoaren oinarri fisikoak

Ana Okariz

EUSKARA ETA ELEANIZTASUNEKO ERREKTOREOR-DETZAREN SARE ARGITALPENA

AURKIBIDEA

SARRERA

Elkarrekintza elektromagnetikoan adituak izango bagina, materiaren edozein jokabide azaltzeko gai izango ginateke, materia-ezaugarrien erantzulea indar elektromagnetikoak dira eta: indar grabitatorioak ahulegiak dira[1], eta nuklearrak eskala txikietan bakarrik dira eraginkorrak[2]. Molekulen eta atomo-osagaien arteko loturak elkarrekintza elektromagnetikoan datza.

Egia da mekanika kuantikoaren ondorioak ezagutu behar ditugula atomoen egituraren zenbait bereizgarri ulertzeko, adibidez, zergatik dauden elkarrekin protoiak eta neutroiak nukleoetan, edota zergatik ez dauden hurbilago elektroiak eta protoiak. Baina lehen aipatu dugunez, materiaren nolakotasuna atomoen eta molekulen arteko loturetan datza, eta indar elektromagnetikoei buruzko ezaguera sakona nahikoa da nolakotasun hori ulertzeko eta azaltzeko.

Indar elektromagnetikoak oso printzipio erraz batean oinarritzen dira: partikula kargatu baten gaineko indar elektromagnetikoa partikularen posizioaren, abiaduraren eta karga-balioaren mende dago. Eta honela kalkula dezakegu:

$$\vec{F} = q\left(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}\right)$$

non $\vec{E}, \vec{B}$ bi bektore baitira, kargaren inguruetan definitu ditugunak. Bektore horien bidez laburbilduko ditugu karga horrek dituen elkarrekintzak unibertsoko gainerako kargekin.

Hurrengo gaietan, beraz, bektore horiek aztertuko ditugu, eta haien arteko loturak ere bai. Egoera errazagoak aztertuz hasiko gara, hau da, kargak geldiunean dauden egoerak. Baina, jakina, gauzak ez dira horrelakoak izaten eskuarki, beraz, kontuan hartu beharko dugu…

---

[1] *Baina oso eskala handietan kontuan hartzekoak. Hori dela eta, planeten eta izarren higiduraren erantzuleak dira. Hain distantzia handietan, bakarrik indar grabitatorioak du eragina.*

[2] *Haien akzio-tartea distantziaren alderantzizko berbituarekiko indargabetzen da. Hori dela eta, hain zuzen, nukleoak oso handiak badira (uranioarena bezalakoa, esaterako) erradiaktiboak dira.*

I EREMU ELEKTRIKOA

*1.*SARRERA

Egungo unibertsoari buruzko teorian, naturan lau oinarrizko elkarreragin mota bakarrik gertatzen direla onartzen da: grabitazioa, elektromagnetismoa, indar nuklear ahulak eta indar nuklear sendoak. Eta elkarreragin bat ala bestea nagusitzen da distantzia tarte batean ala bestean: grabitazioa distantzia luzeko elkarreragina da, elektromagnetismoa distantzia ertainekoa, eta indar nuklearrak distantzia laburrekoak. Aztertzen dugun edozein indar makroskopikoa (normalak, marruskadura…) gertatzen da elkarreragin guztiak edo haietariko batzuk batera ari direlako.

Gai horretan eta hurrengoetan, oinarrizko elkarreraginetako bat aztertuko dugu: elektromagnetismoa, hain zuzen. Distantzia ertaineko elkarrekintza bat da, materiaren oinarrizko osagai-kohesioaren erantzuleetako bat, gure egungo teknologia sustatzen duena.

Mekanika arloan ez bezala, elektromagnetismoa ez zen sakonki garatu XIX. mendera arte, nahiz eta grekoen garaian jada fenomeno elektromagnetiko batzuk ezagunak izan. XIX. mendeko ikertzaileek pentsatzen zuten fenomeno elektrikoek eta magnetikoek ez zutela zerikusirik. Zientzialari askok hartu zuten parte ikerkuntza horretan eta azkenean, Maxwell-i esker, XIX. mendearen amaieran bi elkarrekintzak bateratu ziren. Egin dezagun historia pixka bat.

Lehen aipatu dugunez, lehenengo behaketak grekoek egindakoak ziren: anbar zatiak igurtzi eta gero, partikula txikiak erakartzen zituztela konturatu ziren. XVII. mendera arte ez zegoen aurrerapenik eta, garai hartan, indar elektrikoak erakarleak edo aldaratzaileak izan daitezkeela ondorioztatu zuten. Ondorioz, materian ezaugarri edo materia berezi bat zegoelako ideia sortu zen. Osagai horri "karga" izena eman zioten. Karga hori indar elektromagnetikoen iturria da.

Karga gorputz batetik bestera pasatzen ahal zela frogatzea lortu ondoren, karga fluido mota bat zelako ustea zabaltzen hasi zen. Hori dela eta, karga motaren izena: gehiegizko fluidoa zeinu positiboaren bidez adierazten zuten, eta fluidoren urritasuna, zeinu negatiboaren bidez. Hau da, egungo karga positiboa eta negatiboa, hain zuzen.

Franklin-en, Priestley-ren eta Cavendish-en ikerketek frogatu zuten indarraren magnitudea distantziaren berbituarekiko alderantziz proportzionala zela, eta azkenean, XVIII. mendearen amaieran Coulombek baieztatu eta osatu zuen emaitza, eta zehaztasun guztiak eman.

XIX. mendean magnetismoari buruzko egungo teoriak garatu ziren, Oersted-i, Ampere-ri eta Faraday-ri esker, besteak beste. Elektrizitatearekin zuen lotura frogatu zuten, eta 1860an, Maxwell-ek behin betiko bateratzea aurkeztu zuen.

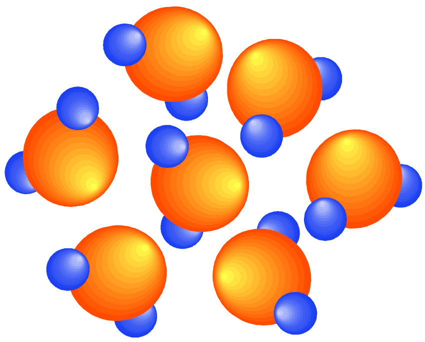
Aipatu beharra dago ez zela kargaren nolakotasuna zehatz-mehatz ezagutu atomoen behaketa esperimentala hasi arte. Ikerketa horien ondorioz, materiaren oinarrizko egiturari buruzko teoriak garatu ziren, haien ondorioz harrigarriak izanik. Zientzalari-erkidegoak azkenean onartu behar zuen maila atomikoan fisika-legeak ezberdinak direla, eta Mekanika Kuantikoa deritzon arlo berriaren formalismoa erabili behar dugula oinarrizko osagaien jokabidea ulertzeko. Gaur egun, mekanika kuantikoari esker, hainbat materiaren ezaugarri elektrikoak uler ditzakegu.

*2.*KARGA

Indar elektrikoaren iturria karga izeneko materiaren ezaugarria da, indar grabitatorioaren iturria masa den bezala. Baina sistema guztiek ez dute indar elektrikorik jasaten. Karga zero dute? Nondik sortzen da gorputz baten karga? Nola elektrizatzen (kargatzen) dira gorputzak?

Gaur egun materialen kargen ezaugarriak nahiko ondo ezagutzen ditugu: edozein material molekulaz eta atomoz osatuta dago, eta atomoak beraiek oinarrizko osagai kargatuz osatuta daude (ikusi I.1 irudia). Osagai batzuek karga negatiboa dute (elektroiek), beste batzuek positiboa (protoiek) eta hirugarren mota batekoak kargarik gabeko osagaiak dira (neutroiak). Protoiak eta neutroiak atomoaren erdiko espazio-alde txiki batean metatzen dira, nukleoan. Nukleoan metatzen da ia atomoaren masa osoa. Elektroiak, berriz, nukleoaren inguruan etengabe higitzen ari dira.

Atomorik sinpleena Hidrogenoarena da, elektroi bakar bat baitu. Nukleo baten tamaina 10^{-15} – 10^{-14} m da, eta nukleoaren eta elektroien arteko distantzia 10^{-9} m gutxi gorabehera. Distantzia horrek baldintzatzen du atomoaren tamaina[3].



(a)

(b)

I.1. *irudia. Atomoek materia osatzen dute, eta oinarrizko osagaiek, atomoak. (a) Ur-tanta baten osagaiak. H2O molekulaz osatuta dago, (urdinez Hidrogeno atomoak irudikatu dira, eta laranjaz, Oxigeno atomoak). Nabaria da haien arteko tamaina diferentzia. (b) Hidrogeno atomo baten argazkia handitu dugu. Elektroiak etengabe higitzen ari dira nukleoaren inguruetan, eta irudian adierazi egin da elektroia espazio-puntu bakoitzean aurkitzeko probabilitatea: espazio-puntu bat zenbat eta urdinagoa izan, orduan eta probabilitate handiagoa dugu puntu horretan elektroia aurkitzeko. Hutsune zuria, erdian dagoena, beraz, nukleoa da. Ez dago eskalan irudikatuta, horrela izango balitz, eskala horretan ezingo genuke nukleoa ikusi eta.*

Masa ez bezala, bi karga mota daude, eta horren ondorioz, indar elektrikoak erakarleak edo aldaratzaileak izan daitezke: mota berdineko kargek elkar aldaratzen dute eta mota desberdinekoek elkar erakartzen dute. Hori dela eta, atomoen kohesioa gertatzen da: haien osagaien arteko indar elektrikoak sortzen dira, eta, horrela, elkarrekin diraute, atomoak osatzen .

Beraz, edozein gorputz kargaz osatuta badago, zergatik ez da sistema guztien arteko indar elektrikorik gertatzen? Kontuan hartu behar dugu egoera normaletan atomoek bi karga motetako partikulen kopurua bera daukatela. Hori dela eta, elektrikoki neutralak direla esaten dugu: material neutro baten ondoan beste material neutro bat badago, nahiz eta biek karga asko eduki, indar erakarleek eta indar aldaratzaileek elkar deuseztatzen dute.

---

[3] *Hain txiki diren distantziak irudikatzea zaila egiten zaigu. Beste eskala bat erabiliz hobeto uler ditzakegu magnitudeak. Demagun Hidrogeno atomoaren nukleoak futbol-baloi baten tamaina duela. Elektroia, protoitik ia 18 km-ra egongo litzateke, eta haren tamaina ordenadore-pantaila baten pixelarena izango litzateke*

Elkarreragin elektrikoa sortzeko karga mota bat bakandu behar dugu. Hau da, material bati karga kopururen bat erauzi edo gehitu behar diogu. Horrela, kargen desoreka lortzen dugu eta materiala elektrizatuta (kargatuta) dagoela esaten dugu. Material horrek indar elektrikoak izango ditu, baldin eta beste karga edo gorputz bat hurbiltzen badiogu. Eta materialaren karga-kopurua gehiegizko karga-kopurua izango da, positiboa ala negatiboa.

2.1 Karga mota. Kargaren kuantizazioa

Esperimentalki honako hau baieztatzen dugu:

- Bi gorputz igurtziz kargatzen baditugu, kargatu ondoren elkar erakartzen dute.
- Beste bi gorputz era berean kargatzen baditugu, eta aurrekoei hurbiltzen badizkiegu, bi jokabide ikusten dugu: elkar erakarri ala aldaratzen dute.

Ondorioak, beraz, hauexek dira:

- Bi gorputz igurtziz kargatzean, karga kopuru bat gorputz batetik bestera lekualdatzen dugu. Horrela, bi gorputzak kargatzen ditugu, eta bata karga gutxiagorekin eta bestea gehiegizkoarekin uzten.
- Indarrak erakarleak ala aldaratzaileak izan daitezke. Horrek esan nahi du bi karga mota daudela. Karga gutxiago duten bi gorputz gerturatzen baditugu, indarrak aldaratzaileak dira. Gauza bera gertatzen da gehiegizko karga kopurua duten beste bi gorputzekin alboratzen baditugu. Baina gutxienezko karga duen gorputz bat eta gehiegizkoa duen beste bat inguratzen baditugu, elkar erakartzen dute. Bestela esanda, mota berdinetako kargek elkar aldaratzen dute eta mota ezberdineko kargek elkar erakartzen dute.

Konbentzioz, elektroiek karga negatiboa dutela esaten dugu, eta protoiek positiboa. NSn karga- unitatea coulomb (*C*) da, baina, coulomb bat oso karga handia denez, eskuarki azpi-multiploak erabiltzen ditugu: μC (10^{-6} *C*), n*C* (10^{-9} *C*), p*C* (10^{-12} *C*). Elektroien eta protoien karga hauxe da: $e^- = -1{,}6.10^{-19}$ *C*; $p^+ = +1{,}6.10^{-19}$ *C*. Unibertsoan, horrelako karga-kopurua baino txikiagoa aurkitzea ezinezkoa da, eta horregatik esaten dugu karga kuantizatuta dagoela (ikusi eranskina), kargaren magnituderik txikiena $1{,}6.10^{-19}$ *C* izanik.

Kargaren kontserbazioa Fisikako oinarrizko printzipioetako bat da: kargak gorputz batetik bestera lekualdatzen ditugu, baina ezin dugu karga sortu edo desagerrarazi.

2.2. Kargak materian

Ikusi dugunez, gorputz bat elektrizatzeko kargak erauzi edo gehitu behar dizkiogu, esaterako, gorputza igurtziz. Elektrizatzeko era horren arrazoia azalduko dugu eta beste elektrizatze mota batzuk ere aztertuko ditugu hemen.

Lehendabizi materiaren egitura atomikoa sakonkiago aztertu behar dugu. Gogora ezazu I.1 (b) irudia: atomo baten erdian nukleo positiboa dago, eta nukleoaren inguruan, elektroi-hodeia. Elektroiak etengabe mugitzen ari dira, eta askoz errazagoa da elektroiak aurkitzea nukleotik gertu[4]. Gainera, atomoa elektrikoki neutroa da; hau da, protoien eta elektroien kopurua berdina da.

Baina atomoa elektrizatu nahi dugu. Zer gertatzen da materiala igurzten badugu? Materialaren azaleko atomoetatik partikula kargatu batzuk erauzten ditugu! Baina bide hori erabiliz material mota batzuk bakarrik elektrizatzen ditugu, ez guztiak. Zergatik ez da gertatzen fenomeno bera material guztiekin?

Material guztiak ez daude molekula mota berdinez osatuta. Batzuek, (esaterako, plastikozkoek), oso molekula organiko handiak dituzte, eta igurztean molekula horien lotura ahulak apurtzea erraza da[5]. Beraz, igurzteko erabilitako zapian molekulen zati kargatuak geratzen dira eta azkenean, materiala eta zapia elektrizatzen dira, kontrako zeinuaren kargarekin (eta karga-magnitude berdinarekin).

Material batetik elektroiak erauztea zailagoa da, baina egin daiteke. Protoiak hartzea, ordea, ezinezkoa da: nukleoarekin oso lotura handia daukate eta. Beraz, igurtziz ioi positiboak, ioi negatiboak eta elektroiak bakarrik transferitzeko aukera dugu. Eta, jakina, igurtziz ioiak edo elektroiak lekualdatzea ez da beti posiblea: material bakoitzaren egitura atomikoak eta molekularrak era askotakoak direnez, ioiek eta elektroiek dituzten loturak ezin dira beti gainditu igurztean.

Gorputz bat elektrizatu ondoren, kargaren jarrera oso desberdina da materialaren arabera. Molekulen arteko elkarreraginetan datza arrazoia. Material batzuetan, elkarreragin horiek sendoak dira, eta elektroiek oso lotura handia

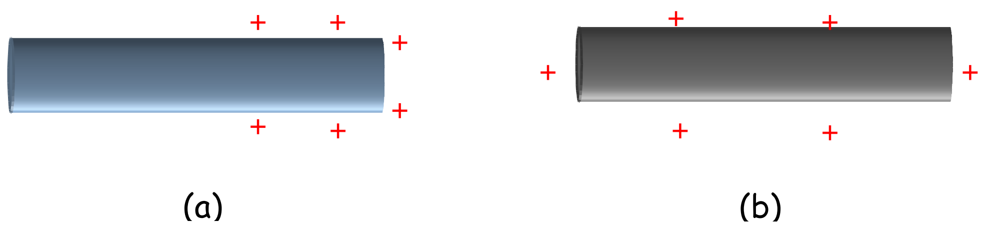
---

[4] *Aurrekoan aipatutako gutxienezko distantzia atxikiz, jakina*

[5] *Fenomeno horien arrazoia oraindik ez da oso ezaguna eta aztertzen ari da. Gainazaleko fenomenoa denez, ikerketa oso korapilotsua da, gainazalean dauden molekulen arteko elkarreraginak nahiko ezezagunak direlako. Gainera, materialen gainazalean ezpurutasun asko daude eskuarki, eta ondorioz ereduak zailtzen dira.*

daukate nukleoekin. Beste batzuetan, berriz, lotura ahulagoa da, eta ioi batzuk edo elektroiak materialean zehar higi daitezke.

Egoera desberdin horiek eragina daukate materiala kargatzen dugunean. Demagun bi hagatxo ditugula, bakoitza material batekoa. Mutur bat igurtzi eta gero, biak geratzen dira elektrizatuta, +Q kargarekin (ikusi I.2 irudia)



I.2.*irudia. Igurtzi ondoren materialetan ikusten den karga-banaketa. (a) Plastikozko hagatxo bat dugu, eskuineko muturra zapi baten bidez igurtzi ondoren, positiboki kargatu dugu. (b) Gauza bera egin dugu, baina orain hagatxoa metalezkoa da. Berriro, karga positiboa hartu du. Baina karga ez dago bakarrik igurtzitako aldean.*

Lehen kasuan, kargen higikortasuna txikia denez, kargak ez dira mugitzen eta igurtzitako aldean geratzen dira: haien arteko aldaratzea ez da atomoekiko lotura gainditzeko bezain indartsua. Baina bigarren kasuan, bai: materialaren egitura atomikoa oso desberdina da, eta atomoekiko lotura ahulagoa. Beraz, kargen arteko aldaratzearen ondorioz, lotura hori gainditzen dute eta materialaren gainazalean zehar uniformeki banatzen dira[6].

Lehenengo materialei isolatzaile edo dielektriko deritze, eta bigarrenei eroale. Kontuan hartu sailkapen hori egitura atomikoaren araberakoa dela, eta material bakoitzaren egitura era batekoa denez, askotariko jarrerak aurkituko ditugula bi muturreko kasu horien artean. Hau da, isolatzaile onak eta txarrak daude, eta, era berean, eroale onak eta txarrak.

2.3. Indukzioa eta eroapena

Indukzioa

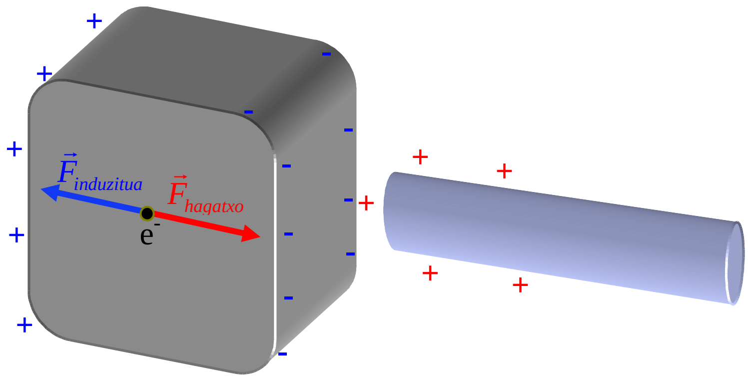
Igurztea ez da gorputz bat kargatzeko era bakarra. Indukzioa eta eroapena ere erabil daitezke. Demagun elektrikoki neutroa den gorputz bat dugula. Ikusi dugunez, nahiz eta elektrizatuta ez egon, gorputza kargaz osatuta dago, eta beste

[6] *Hagatxotik irteteko oso indar sendoak behar dira, baina lortu egin daiteke baldintzak egokiak badira.*

gorputz elektrizatu bat gerturatzen badiogu (esaterako, igurztearen bidez kargatutako plastikozko hagatxo bat, + Q karga duena), lehen gorputzaren kargek indar elektrikoak izango dituzte. Jarrera oso ezberdina da eroaleetan eta dielektrikoetan, jakina.

Eroaleak

Kasu horretan, elektroiak materialean zehar higitzeko gai dira. Beraz, indar erakarleen mendean elektroiak metatzen dira hagatxotik gertu dagoen gorputzaren muturrean. Elektroien desplazamenduaren ondorioz, beste muturrean elektroi-dentsitatea txikiagoa da: hagatxoak sortutako indar erakarlea dela eta, elektroi-hodei osoa higitzen da hagatxorantz. Karga-banaketa induzitu egin dugu eroalean.



I.3.*irudia. Metalezko bloke bat plastikozko hagatxo kargatua hurbildu ondoren. Karga-banaketa induzituak sortzen dira karga-higikortasuna dela eta. Gorputzaren barruan irudikatu dira elektroi batek dituen indar elektrikoak*

Elektroiak metatzen hasten diren heinean, hagatxoaren kargek sortutako indar elektrikoaren kontra jo duen beste indar elektriko bat sortzen da gorputzean. Bigarren indar hori gero eta sendoagoa da, eta azkenean, bi indarrek elkar deuseztatzen dute: ez da karga gehiago higitzen, ezta muturretan metatu ere. Orekan dago eroalea. Prozesu hori azkar-azkar gertatzen da; une bat besterik ez dirau.

Beraz, nahiz eta gorputza oraindik elektrikoki neutroa izan, karga-banaketa dauka. Indukzioaren bidez karga-banaketa sortu dugula esaten dugu. Jakina, plastikozko barra urruntzen badugu, karga-banaketa induzitu hori desagertu egingo da.

Dielektrikoak
Orain, saiakuntza bera egingo dugu dielektriko batekin. Berriro, dielektrikoaren kargek izango dituzte barrak sortutako indar elektrikoak, baina material horietan, nukleoaren eta elektroien arteko lotura hain sendoa denez, elektroiak ezin dira mugitu materialean zehar, eroaleetan gertatzen den bezala, baina bai nukleotik pixka bat urrundu (ikusi I.4 irudia).

(a) (b)

I.4. *irudia. Atomo baten polarizazioa. (a) kasua: dielektrikoaren atomo bat hagatxoa gerturatu baino lehen. (b) kasua: atomo bera hagatxoa gerturatu ondoren. Karga-banaketaren simetria galdu, eta dipolo bat sortu da*

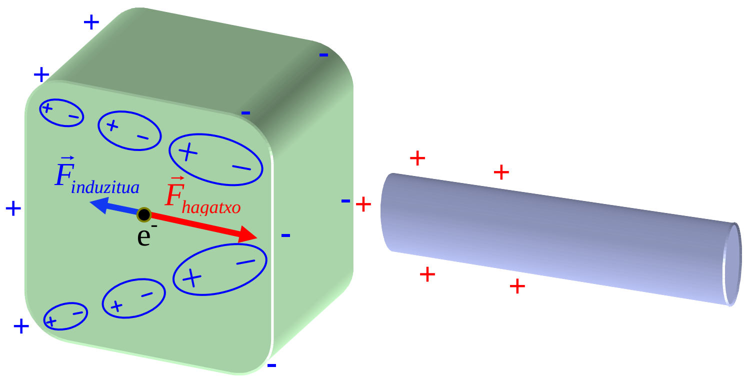
Hau da, atomo bakoitzaren elektroiek hagatxoak sortutako indar erakarlea jasaten dutenez[7], pixka bat higitzen dira, eta atomoaren karga positiboa eta negatiboa apur bat bereizten dira. Dipoloak sortzen direla esaten dugu. Zenbat eta urrunago egon atomoa hagatxotik, orduan eta txikiagoa da haren kargen arteko distantzia; hau da, polarizazio-efektua ahulagoa da, baina polarizazio-prozesua dielektriko osoan gertatzen da. Eroaleen kasuan bezala, polarizazioa induzitu

Dipoloak

Nahiz eta sistema elektrikoki neutroa izan, dipoloek oso eragin handia dute, eta ur-dipoloa horren adibide dugu. Ur-molekulak dipolo iraunkorrak dira, ez induzituak. Oxigeno atomoa Hidrogenoarena baino askoz handiagoa denez molekula osatzean oso asimetria handia sortzen da kargaren banaketan. Beraz, dipolo iraunkorra dela esaten dugu (ikusi I.1(a) irudia). Fenomeno ugariren erantzulea da polaritate hau. Esaterako, airearen hezetasuna nahikoa bada, gorputz kargatuek poliki-poliki galtzen dute karga. Ura polarra denez, indar elektriko erakarlearen mende gorputzari itsatsi eta bere gainazalean geruza mehea osatzen du. Oso disolbatzaile ona denez, bere ezpurutasunak eta gorputzaren gainazalekoak disolbatzen ditu, ioi positiboak eta negatiboak sortuz, eta ura oso eroale on bihurtuz. Beraz, beste sistema bat ukitzen badago, uraren bidez gorputza deskargatzen da. Horregatik, igurztearen bidezko kargatze-mekanismoa eguraldi lehorra dagoenean bakarrik ikusten da.

[7] *Eta nukleoaren protoiek indar aldaratzailea ere, baina nukleoak askoz finkoago daudenez, ez dira ia higitzen.*

egin dugula esaten dugu. Eta horren ondorioz, dielektrikozko blokean ere karga-banaketa induzitu dugu



I.5.*irudia. Polarizazioaren bidezko karga-banaketa induzitua dielektrikoetan. Hagatxoaren bidez, dipoloak induzitzen ditugu blokean, zenbat eta gertuago egon hagatxotik orduan eta eraginkorragoa da polarizazio hori. Blokearen gainazaletan karga-banaketa induzituak daude.*

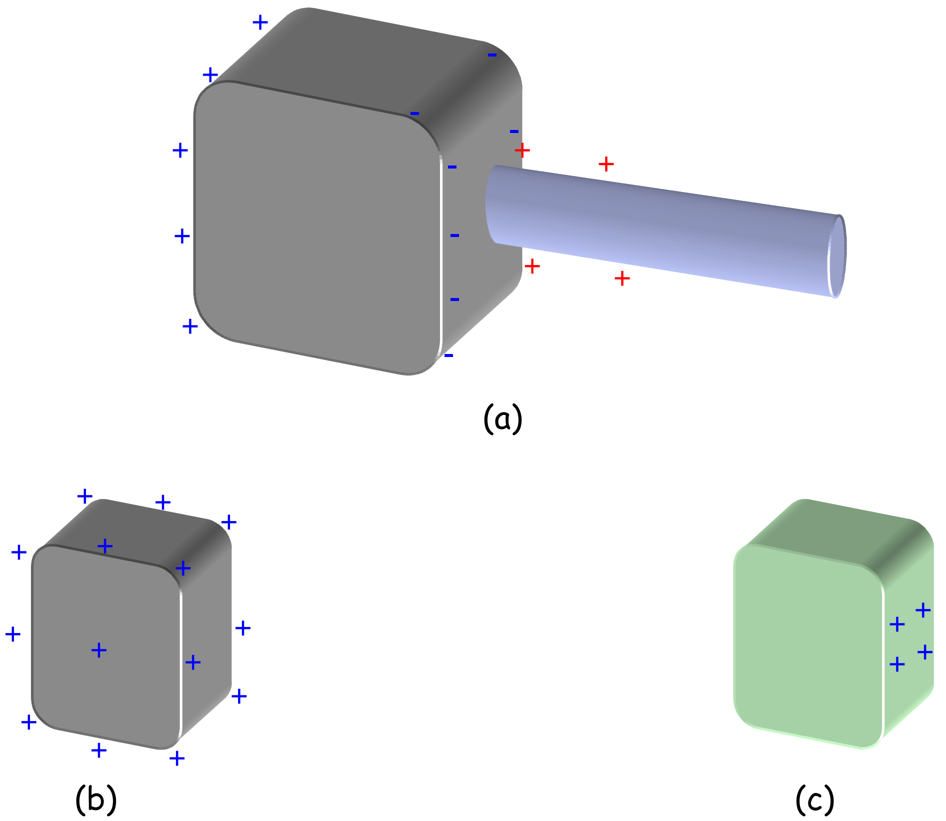
Orain ere, elektroi bakoitzak hagatxoak sortutakoaz gain, beste indar elektriko bat izango du, karga-banaketa induzituak sortutakoa hain zuzen. Baina indar hori ez da hagatxoarena deuseztatzeko bezainbeste indartsua.

Eroapena

Eroapen fenomenoak oso lotura handia dauka indukzioarekin: lehen azaldutako adibidean karga-banaketa sortu dugu indukzioaren bidez, hau da, karga gabeko gorputz bati gorputz kargatu bat hurbilduz, baina haien artean ukitu gabe. Orain, elkar ukitzen ipiniko ditugu eta zer gertatzen den aztertuko dugu.

Eroalearen kasuan, nahiz dielektrikoarenean, gorputz kargatua gerturatu ondoren karga-banaketa induzitua sortu da. Beraz, hagatxoa eta gorputza ukipean ipintzen baditugu, izaten dituen indar erakarleen ondorioz, gorputz batetik bestera lekualdatzen ahal dira karga batzuk, eta hasieran gorputz neutralak zirenak kargatuta geratzen dira. Kargatzeko era horrek eropenaren bidezko karga izena du.

Noiz amaituko da karga-transferentzia? Gorputzean zeinu berdina duten beste karga batzuk daudela kontuan hartu behar dugu: indar erakartzaileen eta aldaratzaileen artean oreka ezarri ondoren karga-transferentzia bukatuko da.

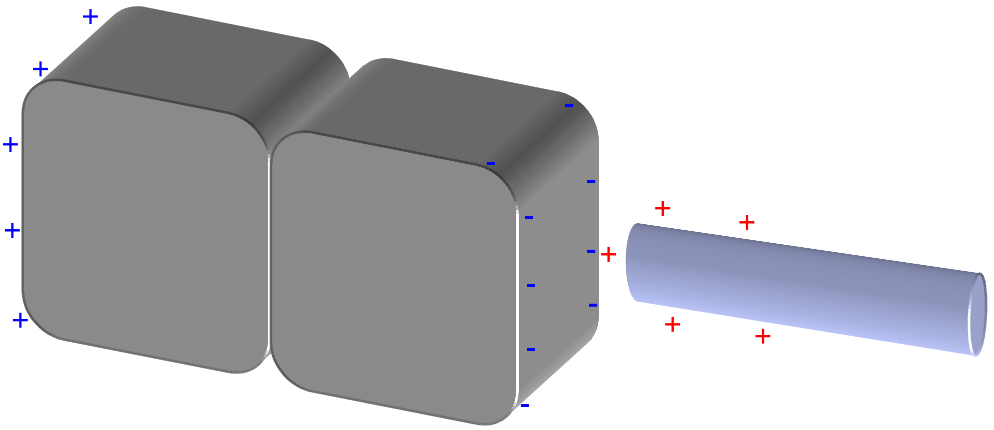


I.6.*irudia. Elkar ukitzean karga-banaketak induzitzen dira. (a) Blokea eta hagatxo kargatua elkar ukitzen ipini ditugu. Kargen arteko indar elektrikoak direla eta, karga kopuru bat lekualdatu eta blokea kargatzen da. (b) Metalezko blokearen karga-banaketa. (c) Dielektrikozko bloke baten karga-banaketa*

Lehen aipatu dugunez, fenomeno hori eroaleetan nahiz dielektrikoetan gertatzen da, baina, haien egitura atomikoa hain desberdina denez, karga-banaketa desberdina da. Eroaleetan, kargak gorputzean higitzeko askeak direnez, karga uniformeki banatzen da gainazalean zehar. Dielektrikoetan, berriz, kargak atomoekin lotura handia duenez, ukitze-aldean finkatuta geratzen dira (ikusi I.6. irudia).

Indukzioaren bidezko karga

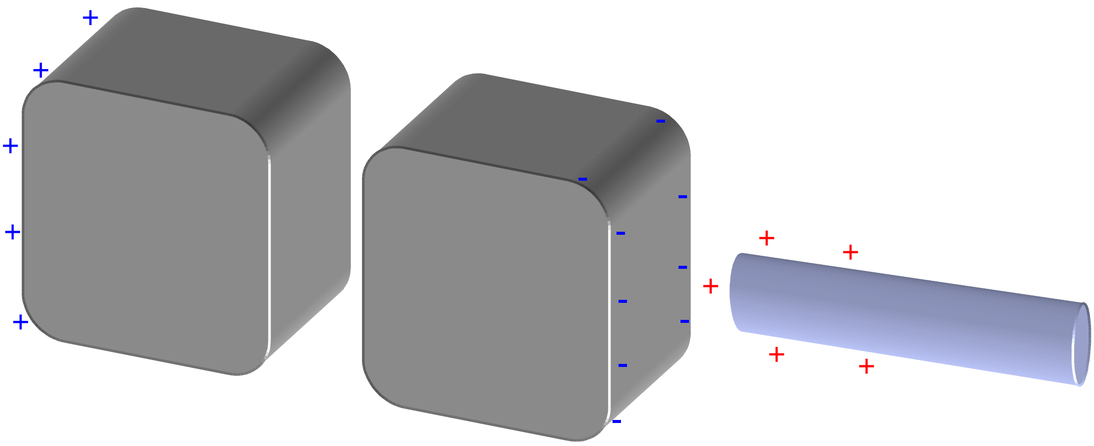
Indukzioaren bidez ere elektrizatzen ahal ditugu gorputz batzuk. Demagun bi gorputz eroale ditugula, eta elektrikoki neutralak direla. Elkar ukitzen dauden bitartean barra kargatu bat hurbiltzen badiegu, polarizazio induzitua sortzen da. Elkar ukitzen daudenez, eroale bat izango balira bezala jokatzen dute. Batean karga-banaketa positiboa eta bestean negatiboa induzitzen dira (ikusi I.7 irudia).



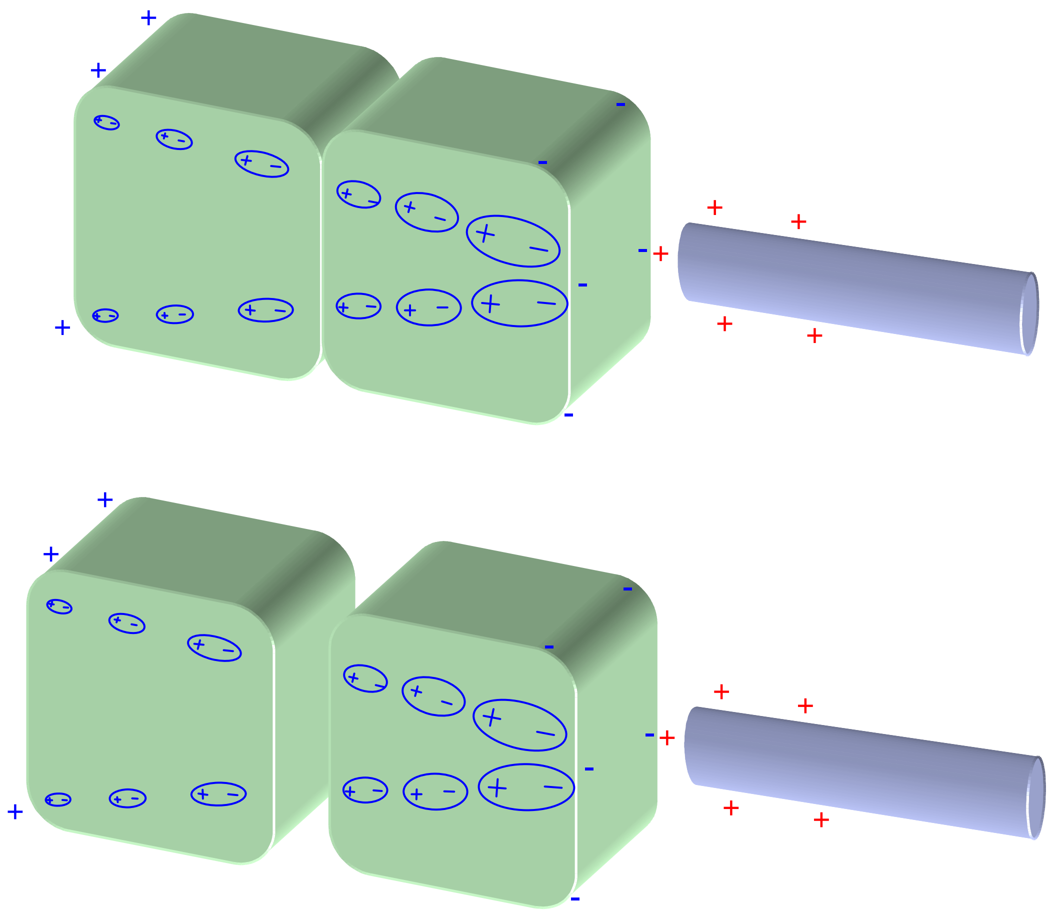
I.7.*irudia. Indukzioaren bidezko karga. Elkar ukitzen dauden bi eroale eta hagatxo kargatu bat aurrez aurre. Eroale bat izango balira bezala induzitzen dira karga-banaketak.*

Hagatxoa leku berean daukagun bitartean, karga- banaketak ere dagoen moduan dirau, eta horrela gaudela eroaleak baztertzen baditugu, bakoitzak gehiegizko karga du (ikusi I.8 irudia). Beraz, orain barra kargatua urruntzen badugu, eroaleak kargatuta geratzen dira.

Prozesu bera errepikatuko dugu, baina oraingoan bi dielektrikoekin. Bietan, jakina, polarizazio induzitua sortuko da: ez da egongo karga-higidurarik, baina dielektriko bakoitzean dipolo induzituak sortuko dira. Beraz, nahiz eta hagatxoa inguruetan atxiki, dielektrikoak baztertzen baditugu ez da inon egongo gehiegizko kargarik eta barra urrundu eta gero, hasierako egoerara itzuliko dira.



I.8.*irudia. Indukzioaren bidezko karga. Elkar ukitzen dauden bi eroale baztertu ditugu hagatxo kargatu bat aurrez aurre dagoela. Induzitutako karga-banaketek berdin diraute.*



I.9.*irudia. Indukzioa eta dielektrikoak: hagatxoa urrundu ondoren, dipolo induzituak desagertzen dira eta ez dugu lortzen ezer kargatzea*

3.COULOMB-EN LEGEA

Badakigu gorputz kargatuen artean indar elektrikoak sortzen direla, eta gure asmoa elkarrekintza elektrikoaren xehetasun guztiak ezagutzea denez, helburu hori betetzeko metodo esperimentala erabili behar dugu, Coulomb-ek berak eta beste ikertzaile askok egin zuten bezala. Horrela ondorioztatu zen geldirik dauden bi kargen arteko indar elektrikoen ezaugarriak honako hauek direla:

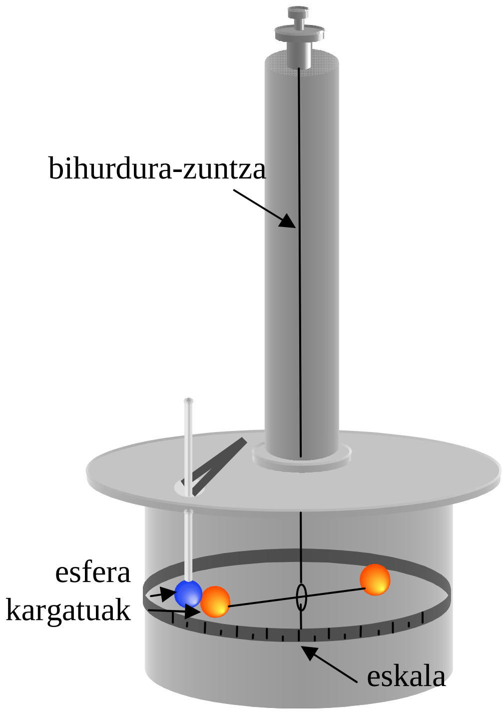
- Indarra zentrala da: norabidea, bi karga lotzen dituen zuzenarena.
- Indarraren magnitudea bi kargekiko proportzionala da.
- Mota bereko kargak badira, indarra aldaratzailea da, bestela, erakarlea.
- Indarraren magnitudea kargen arteko distantziaren berbituarekiko alderantziz proportzionala da.

Coulomb-en legea

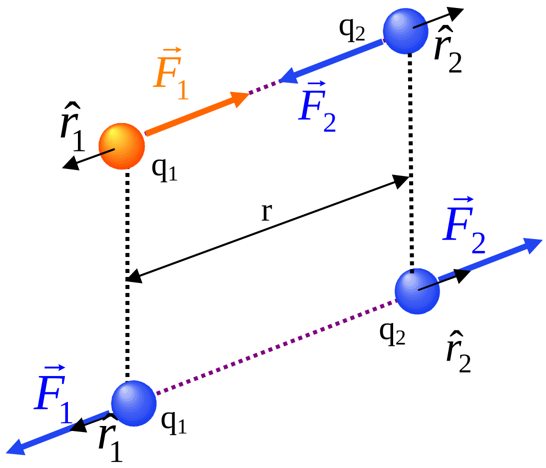
Elkarrekintza aztertzen hasi zen garaian, atomoen oinarrizko osagaiak ezezagunak ziren, eta, ondorioz, ikertzaileek ez zuten karga kontzeptua erabili. Horren ordez, indar elektrikoen sorkuntza azaltzeko, fluido berezi baten lekualdatzean oinarritu ziren. Nola sortu zuten, orduan, distantziaren karratuarekiko alderantzizko proportzionala den legea?

Priestley-ek igurztearen bidez kargatuta zeuden eroale esferikoen jokabidea aztertu zuen, eta haien barruan eremu elektrikorik ez zegoela konturatu zen. Emaitza harrigarri horrek Newton-ek frogatutako emaitza baten antza zuen. Newton-ek argitaratutako kalkuluen arabera, hutsik dagoen esfera baten barruan eremu grabitatorioak nulua izan behar du, indar grabitatorioa distantziaren karratuarekiko alderantzizko proportzionaltasuna dela eta, hain zuzen.

Bi emaitzen parekotasunean oinarrituta, Priestley-ek proposatu zuen elkarrekintza elektrikoak distantziarekin erlazio berdina zuela. Eta Cavendish-ek bere lagunaren ideiaren berria izan bezain laster, egokia zen bihurdura-balantza bat osatu zuen (ikusi irudia) indar elektrikoaren eta distantziaren arteko lotura frogatzeko ala baztertzeko.



Emaitza esperimentalei esker, erlazioa frogatu zuten, baina ez zuen lana argitaratu. Pixka bat geroago, Columb-ek, bere kabuz, neurketa esperimental berberak egin zituen, baina hark bai ezagutarazi egin zuen bere ikerketa-lana, eta legeak bere izena hartu zuen.



I.10. *irudia. Karga puntualen arteko indar elektrikoak. Goiko kasuan, karga motak ezberdinak dira, behekoan, berdinak*

Beraz, bektore unitarioen bidez, honela adierazten dugu karga bakoitzak izaten duen indarra:

$$\vec{F}_1 = K\frac{q_1 q_2}{r^2}\hat{r}_1 \qquad\qquad \vec{F}_2 = K\frac{q_1 q_2}{r^2}\hat{r}_2$$

non K proportzionaltasun-konstantea unibertsala eta r kargen arteko distantzia baitira. Konstantearen balioa (NSn) 9.10^9 Nm^2C^{-2} da.

Karga bakoitzak du indar elektriko bat, eta bi indar horiek magnitude be-rekoak eta kontrako noranzkokoak dira, Newtonen hirugarren legeak ezartzen duenaren arabera.

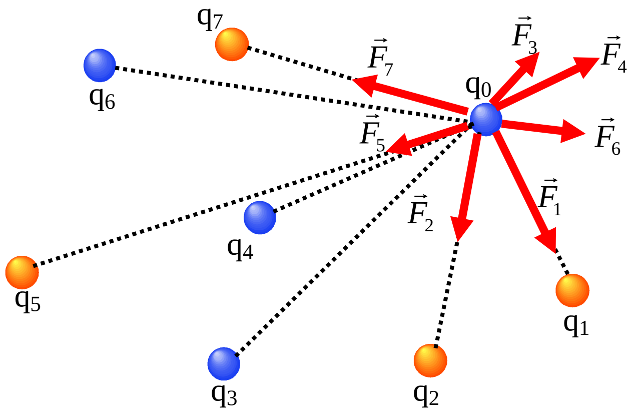
Gainezarmen-printzipioa

Eskuarki, karga bat baino gehiago izaten ditugu, edota gorputz kargatu bat. Baina Coulomb-en legea erabil dezakegu baldin eta soilik baldin sistema kargatuak karga puntualak badira. Orduan, nola zehaztu beste edozein karga-sistemaren artean sortzen diren indar elektrikoak?

Zorionez, elkarrekintza elektrikoak gainezarmen-printzipioa betetzen du. Demagun karga puntualen multzo bat dugula (ikusi I.11 irudia). Bakoitzak duen indarra besteek sortutakoen erresultantea da, eta indar bakoitza Coulumb-en legeak adierazitakoa da; hau da, karga bakoitzak besteak egongo ez balira bezala sortzen du indarra.

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3$$

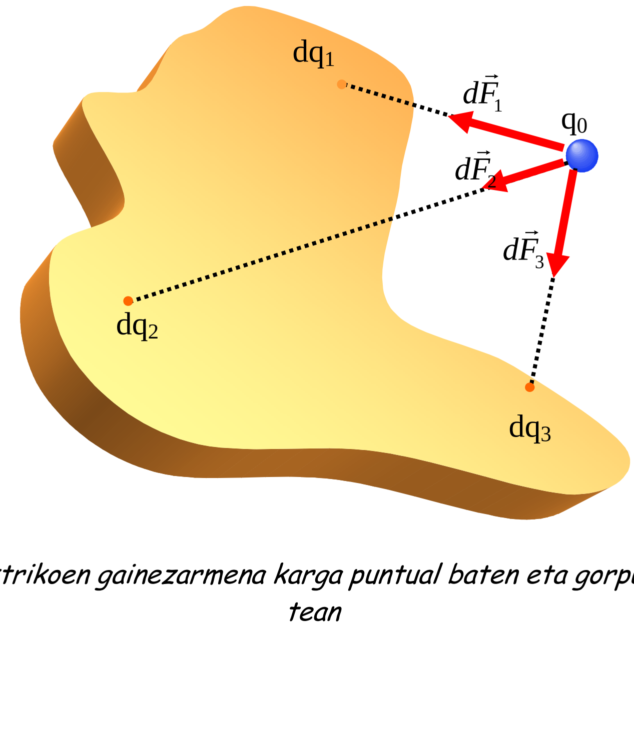
$$\vec{F} = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i = \sum_{i=1}^{n} K \frac{q_i q_0}{r_i^2} \hat{r}_i$$



I.11. *irudia. Indar elektrikoen gainezarmena karga puntualen artean*

Gorputz kargatu batean, karga-kopurua infinitua denez kalkulu integrala erabili behar dugu erresultantea kalkulatzeko:

$$\vec{F} = \int_V K \frac{q_0 dq}{r^2} \hat{r}$$



I.12.*irudia. Indar elektrikoen gainezarmena karga puntual baten eta gorputz kargatu baten ar-tean*

*4.*EREMU ELEKTRIKOA

Badakigu, nahiz eta elkar ukitzen ez egon, gorputz kargatuen artean indar elektrikoak sortzen direla. Hau da, esan dezakegu gorputz kargatuek indar-eremuak sortzen dituztela, urrun dauden beste gorputz kargatuen gainean eragina dutenak, eta materian sartzeko oztoporik ez dutenak. Nola ulertu urrun dauden partikulek indarra izatea? Eta are gehiago, urrutiko elkarreragina bada, partikula haietariko bat higitzen badugu, eta, ondorioz, haren posizioa aldatzen bada, beste kargek duten indarra une berean aldatzen da? Ala denbora-tartetxo baten ondoren?

Azalpena kontzeptu berri batean datza, eremu elektrikoan, hain zuzen. Pentsa dezakegu gorputz kargatuek eta kargek eraldatu egiten dutela inguratzen dituen espazioa. Eta espazio berri horretan beste gorputz kargatu batek elkarreragin elektrikoa izango du; horixe da, hain zuzen, espazio berezi horien froga. Espazio eraldatu horri eremu elektriko deritzo. Eta ezaugarriak honako hauek dira:

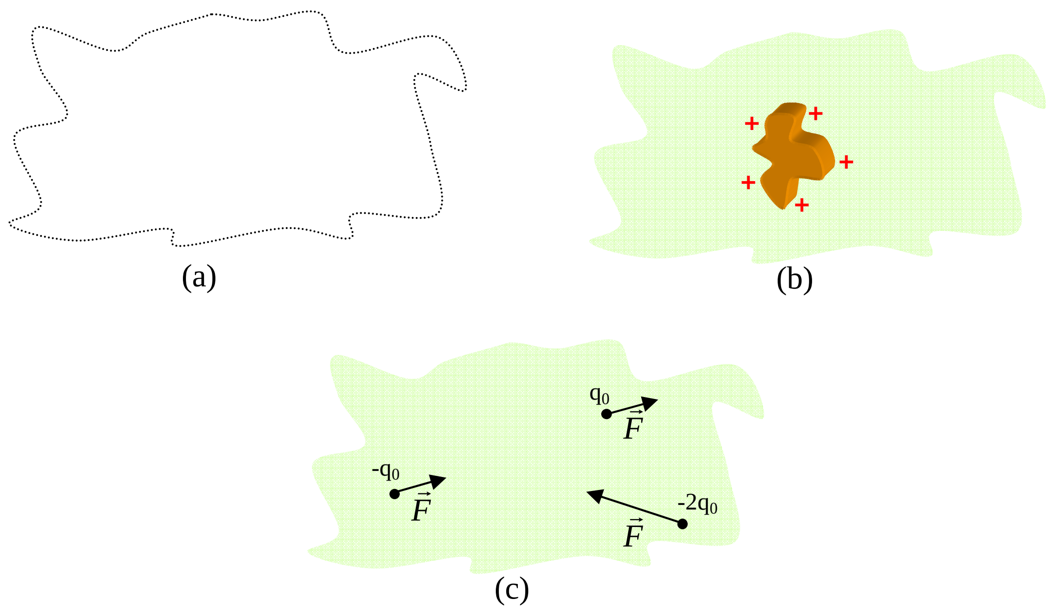
- Kargek inguratzen dituen espazio osoan sortzen dute eremu elektrikoa, une oro.
- Eremu elektrikoek ez dute materia oztopo.
- Eremua sortzen duen karga bat-batean kentzen badugu, denbora-tarte labur batean ere eremua ez da desagertuko. Beraz, eremuan karga-proba bat badago, nahiz eta karga-iturria desagertu, elkarreragin elektrikoak iraungo du denbora-tarte batez. Zenbat denbora eman behar da eremuaren aldaketak espazioan hedatzeko eta bigarren kargak indar elektrikorik ez jasateko? Informazio hori c abiaduraz zabaltzen da[8]; ondorioz, eremuaren aldaketa nabaria izango da espazio-alde bakoitzean distantziaren arabera: zenbat eta urrunago egon karga-iturritik orduan eta beranduago iritsiko da perturbazioa[9].

Eremuaren definizioa behar dugu. Hasteko, kontuan hartu behar dugu espazio-puntu guztietan zehaztu behar dugun magnitudea dela eremua, espazio-puntu bakoitzean balio bat duelako. Ezagunak diren adibide batzuk aztertuko ditugu. Demagun gela bateko tenperaturaren eremua erabiltzen dugula, hau da, espazio-puntu bakoitzeko tenperaturaren eremua. Kasu horretan, eremuaren bali-

---

[8] *Erlatibitate mugatuaren teorian datza baieztapen hau: ezinezkoa da edozein informazio mota argia baino azkarrago hedatzea.*
[9] *Esaterako: karga-iturria eskuinetara eta ezkerretara periodikoki mugitzen badugu, eremu elektrikoaren perturbazioa periodikoa eragiten dugu. Horiauek dira, hain zuzen, telebistan, irratian... erabiltzen ditugun uhin elektromagnetikoak. Eta jakina, c abia-duranz hedatzen dira.*

oak eskalarrak dira, tenperatura eskalarra delako, edo, bestela esanda, magnitudea besterik ez dauka. Baina gela berberaren haizearen fluxua aztertzen badugu, egoera oso bestelakoa da. Gelako puntu bakoitzean haizearen abiadurak, magnitudea izateaz gain, norabidea eta noranzkoa ere badauzka, eta, ondorioz, abiaduraren eremua bektoriala da. Hau da, gelako puntu bakoitzean abiadura-bektore bat definituta dago. Eremu elektrikoak, beraz, eremu bektoriala izan behar du, haize-fluxuarena bezalakoa: karga-proba bat eremu barruan kokatzen badugu, indar elektrikoa izango du, eta indarrak magnitude bektorialak dira.



I.13.*irudia. Eremu elektrikoa: espazioa ez da berbera behin gorputz kargatu bat sartuta ondoren. (a) Kargarik gabeko espazio-alde bat; (b) espazio-alde horretan gorputz kargatu bat sartu ondoren, espazioa eraldatu egin da. Nola dakigu espazioa eraldatu egin dela? Indar elektrikoak gertatzen direlako; (c) irudian, karga-proba batzuk indar elektrikoak dituzte. Beraz, gorputz kargatuak espazio berri bat sortu du: eremu elektrikoa.*

Eremu elektriko batean q_0 karga-proba bat barruratu dugu. Kargaren posizioko eremu elektrikoa eta indar elektrikoa horrela lotzen ahal ditugu: $\vec{F}(\vec{r}) = q_0\vec{E}(\vec{r})$, non $\vec{r}$ kargaren posizio-bektorea baita. Eremua, beraz, erlazioa erabiliz kalkula dezakegu, indarra ezaguna denean:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{\vec{F}(\vec{r})}{q_0}; \text{ (NSn, N/C)}$$

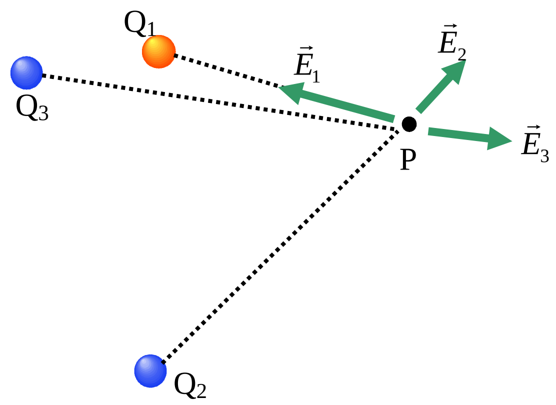
Definizio horien arabera, karga-proba positiboa nahiz negatiboa izan, puntu bateko eremuaren bektorea ez da aldatuko.

4.1 Gainezarmen -printzipioa

Indar elektrikoek gainezarmen-printzipioa betetzen dutela ikusi dugu. Beraz, eremu elektrikoaren definizioa kontuan hartuta, eremu-bektoreak ere printzipio hori betetzen duela ondorioztatzen dugu. Hau da, gorputz kargatu batzuk edo karga batzuk metatzen badira, sortutako eremu guztien erresultantea da:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3$$

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^{n} \vec{E}_i$$



I.14. *irudia. Eremu erresultantea eta gainezarmen -printzipioa: sortutako eremua karga bakoitzak sortutako guztien erresultantea da*

4.2. Eremu elektrikoa eroaleetan eta dielektrikoetan

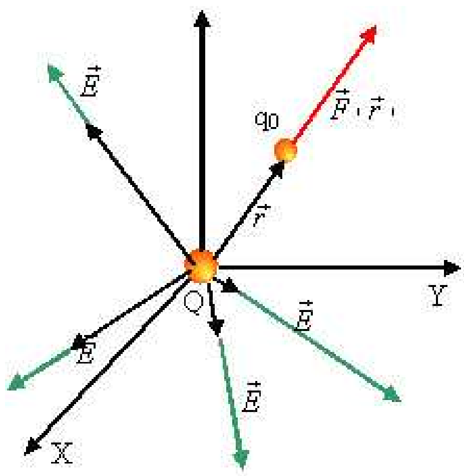
Aurrekoan esan dugunez, eremu elektrikoak ez du materia oztopo eta, horren ondorioz, materialen kargek ere eremuen eraginak izaten dituzte.

Eroaleen portaera aztertzen hasiko gara. Eroaleen ezaugarri berezia elektroien nukleoarekiko lotura ahula da. Beraz, elektroiak gorputzean zehar higitzeko gai dira, eta, gorputza eremu elektriko baten barruan gorputza kokatzen badugu, elektroiek indar elektrikoak izango dituzte eta indar horien mendean higitzen hasiko dira (gorputzetik irten gabe, jakina).

Noiz arte dirau prozesuak? Elektroiek indarrik ez izan arte! Eta, nola gerta daiteke horrelakorik eremu elektriko baten barruan? Kontrako joera duen beste indar bati esker. Kontuan hartu behar dugu elektroiak higitzean gorputzaren alde batean metatzen direla. Bestalde, kontrako aldean karga positibo gehiegi agertuko da. Edo bestela esanda, eremu elektrikoaren eraginez, karga-banaketa induzitua ezartzen da. Eta karga- banaketa horrek beste eremu elektriko bat sortzen du, kontrako noranzkoa duena.

Prozesu hasieran, muturretan gertatzen den karga- pilaketa ez da oso handia eta, eremu induzituaren magnitudea txikia denez, kanpoko eremuak badu eragina oraindik. Baina gero eta karga gehiago metatzen denez, azkenean eremu induzituak neutralizatu egiten du kanpoko eremua, eta oreka lortzen da: eroalearen barruan indar elektrikorik ez dagoenez, elektroiak ez dira higitzen. Prozesu hori guztia oso azkar gertatzen da. Orekan, bi eremu ditugu,: hasierakoa eta in-

Adibidea: karga puntual batek sortutako eremu elektrikoa



Coulomb-en legea erabiliz, nahiko erraz kalkula dezakegu bi karga puntualen arteko indarra. Kontuan hartu irudiko bi karga puntualak. q_0 kargak duen indar elektrikoa hauxe da:

$$\vec{F}(\vec{r}) = K\frac{Qq_0}{r^2}\hat{r}$$

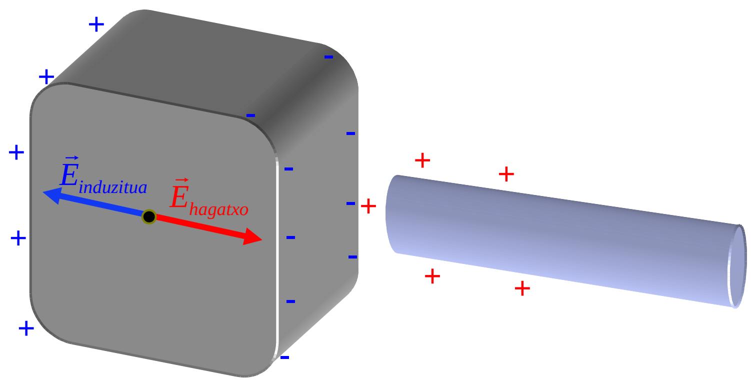
Q kargak sortutako eremu elektrikoa, beraz:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{\vec{F}(\vec{r})}{q_0} = K\frac{Q}{r^2}\hat{r}$$

Eta eremu bektore guztiek norabide erradiala dute, kanporantz abiatuta; eta zenbat eta urrunago Q kargatik, orduan eta ahulagoa da haien magnitudea.

duzitua, eta elkar deuseztatzen dute:

$$\vec{E}_{barruan} = \vec{E} + \vec{E}_{ind} = 0$$
$$\vec{E} = -\vec{E}_{ind}$$



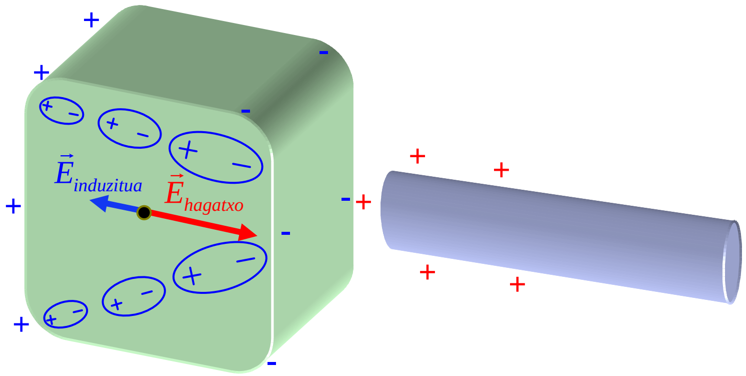
I.15. *irudia. Eremu elektrikoak eta eroaleak. Plastikozko barra kargatuta dagoenez, eremu elektrikoa sortzen du. Eremua dela eta, metalezko blokearen elektroiak higitzen hasten dira, karga-banaketa induzituak sortuz (ikusi 2.3.1. atala). Karga- banaketa induzituek ere eremu elektrikoak sortzen dutenez, eremua ez da barrak sortutakoa izango, baizik eta bien erresultantea. Eta blokearen barruan, nulua da, orekan dagoen bitartean.*

Dielektrikoetan polarizazioa eragiten da, eta karga-banaketa induzitua dipoloak sortutakoa da. Beraz, dielektrikoen barruan ere eremu elektriko induzitua agertzen da, baina, elektroiak askeak ez direnez, eroaleetan induzitutakoa baino askoz ahulagoa da. Kasu horretan ere kontrako noranzkoa du, baina ez da nahiko indartsu kanpokoa neutralizatzeko. Beraz, dielektrikoetan eremu elektrikoa ezartzen da, kanpokoa baino ahulagoa dena.

Eremuaren indargetze hori ez da berdina material dielektriko guztietan, eta posiblea da materialaren konstante propio bat definitzea indargetze-maila adierazteko. Aurrekoa kontuan hartuta, materialaren barruko eremu erresultantea hauxe da:

$$\vec{E}_{barruan} = \vec{E} + \vec{E}_{ind} = \frac{\vec{E}}{\varepsilon_r}$$

non $\varepsilon_r \geq 1$ baita, materialaren permitibitate-dielektriko erlatibo deritzon konstantea. Airearen permitibitate-dielektriko erlatiboa 1 denez, ez dugu erabili orain arte. Beste materialek konstante handiagoak dituzte (ikusi taula)



I.16. *irudia. Eremu elektrikoak eta dielektrikoak. Berriro erabili dugu plastikozko barrak sortutako eremu elektrikoa. Dielektrikoaren polarizazioa dela eta, karga- banaketa induzituak sortu ditugu (ikusi 2.3.1. atala). Karga- banaketa induzituek ere eremu elektrikoak sortzen dute eta barruko eremua bien erresultantea da.*

Materialen konstante dielektrikoa

Material dielektrikoak ez dira polarizatzen era berean, batzuek besteek baino polarizazio handiagoak jasaten dituzte, eta eremuaren indargetzea nabariagoa da. Hona hemen zenbait materialen balio konstanteak:

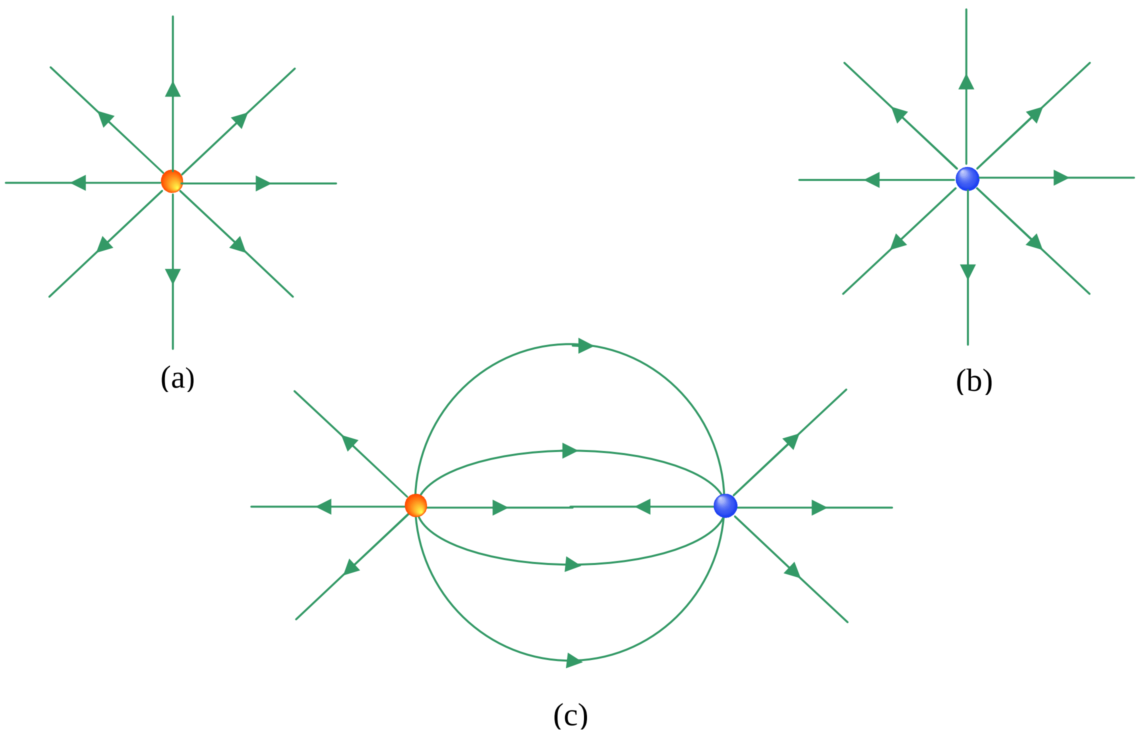
Materiala	ε_r
Olioa	2,24
Ura (20 ºC)	80
Airea	1,0006
Bakelita	4,9
Mika	5,4
Neoprenoa	6,9
Papera	3,7
Parafina	2,3
Plexiglasa	3,4
Portzelana	7
Pyrex-beira	5

4.3. Eremu-lerroak

Eremua irudikatzea komenigarria da, horrela, begiratu batean ezagutzen ahal ditugu eremuaren ezaugarriak. Eremua bektoriala denez, puntu bakoitzean bektorea irudikatzea izan daiteke aukera bat, baina bektore gehiegi dira guzti-guztiak irudikatzeko. Hori ikusita, bektore batzuk irudikatzea izan daiteke konponbidea. Baina, zein? Zein irizpide hartuko dugu?

Arazo horiek saihesteko eremu-lerroak erabiltzen dira. Haien esanahia ulertzeko kontuan hartu behar dugu zeintzuk diren irudikatu nahi ditugun eremuaren ezaugarriak. Honako hauek dira:

- Eremuaren magnitudea. Hau da, non da ahulagoa? Eta sendoagoa?
- Eremuaren norabidea
- Eremuaren noranzkoa



I.17*.irudia. Eremu elektriko batzuen eremu-lerroak: (a) karga positiboak sortzen duen eremua; (b) karga negatiboak sortutakoa; (c) dipolo batek sortutakoa*

Eremu –lerroek informazioa ematen digute:

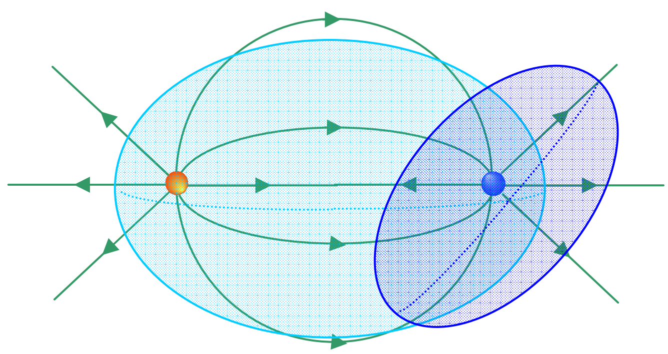
- Magnitudea: lerroen dentsitatearen arabera. Zenbat eta dentsitate handiagoa izan, orduan eta sendoagoa da eremua.
- Norabidea: espazioko puntu bakoitzean, lerroaren tangentearena da.
- Noranzkoa: gezi baten bidez adierazten dugu.

*5.*GAUSS-EN LEGEA

Eremu-lerroak erabiliz eremu elektrikoen oso ezaugarri oso berezi bat aurki dezakegu, Gauss-en legeak laburtzen duena. Lege hori eta Coulomb-en legea guztiz baliokideak dira baldin eta kargak geldiunean badaude, baina Gauss-en legeak badauzka abantaila batzuk.

Fisikan egoera konplexuak aztertzeko simetria erabiltzen dugu askotan, eta Gauss-en legearen bidez posible dugu simetria handiko karga-banaketa jarraituek sortutako eremu elektrikoak erraz eta azkar kalkulatzea. Edota, eremua ezaguna bada, espazio-alde bateko karga- banaketa zehaztea. Kalkulu horiek guztiak gauzatzeko magnitude berri bat erabiliko dugu, fluxu elektrikoa, hain zuzen.

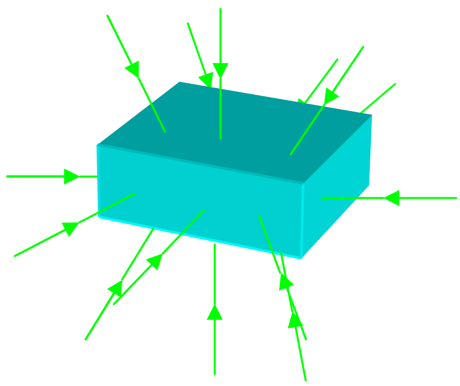
Posiblea da Gauss-en legea kualitatiboki adieraztea eremu-lerroak erabiliz. Demagun dipolo bat dugula (ikusi I. 18 irudia). Edozein gainazal itxi hartuta, gainazaletik irteten diren eta gainazalean sartzen diren eremu-lerroen kopurua berdina da. Lehenengoak positibotzat eta bigarrenak negatibotzat hartuko bagenitu, balantzea zero dela esango genuke. Eta horixe da, hain zuzen, Gauss-en legearen oinarrizko kontzeptua, orain ikusiko dugunez.



I.18.*irudia. Dipolo batek sortutako eremu elektrikoa. Edozein gainazal itxi hartuta (irudian bi ditugu), irteten ari diren eta sartzen ari diren eremu-lerroen kopuruak berdinak dira beti. Gauss-en legeak adierazten duen eremu elektrikoen ezaugarri berezia da, grafikoki azalduta.*

5.1. Fluxu elektrikoa

Karga-banaketa bat dugu, kutxa batek inguratuta. Horrela bada, ezin dugu jakin nolakoa den karga banaketa hori, baina, eremu-lerroak aztertuz, karga-banaketari buruzko ondorioak atera ditzakegun.



I.19.*irudia. Nahiz eta ezin den ikusi, kutxaren barruan kargaren bat dagoela baieztatzen ahal dugu, eta, horretarako, eremu-lerroak kutxaren azalean bakarrik aztertu ditugu. Are gehiago, irudia ikusita, barruko karga garbia negatiboa dela esango genuke.*

Beraz, gainazal itxi baten gainean eremu elektrikoa aztertuz informazio asko lortzen ahal dugu. Eta azterketa horiek egiteko beste magnitude bat definitu behar dugu: fluxu elektrikoa[10], hain zuzen. Honako ezaugarri hauek ditu:

a) Fluxuaren zeinua

Fluxua aldatu egingo da eremuaren norabidearen arabera; hau da, eremua kutxan sartzen bada (barruan karga negatiboa dagoela adieraziz) balio bat izango du, eta kutxatik irteten bada (karga positiboa barruan, beraz) beste balio bat. Eremu-noranzkoaren arabera fluxuaren zeinua aukeratzea da konponbiderik erosoena. Kasu berezi bat aurki dezakegu: eremu elektrikoa gainazalaren paraleloa bada: ez da sortzen ez irteten, eta fluxua zero izango da.

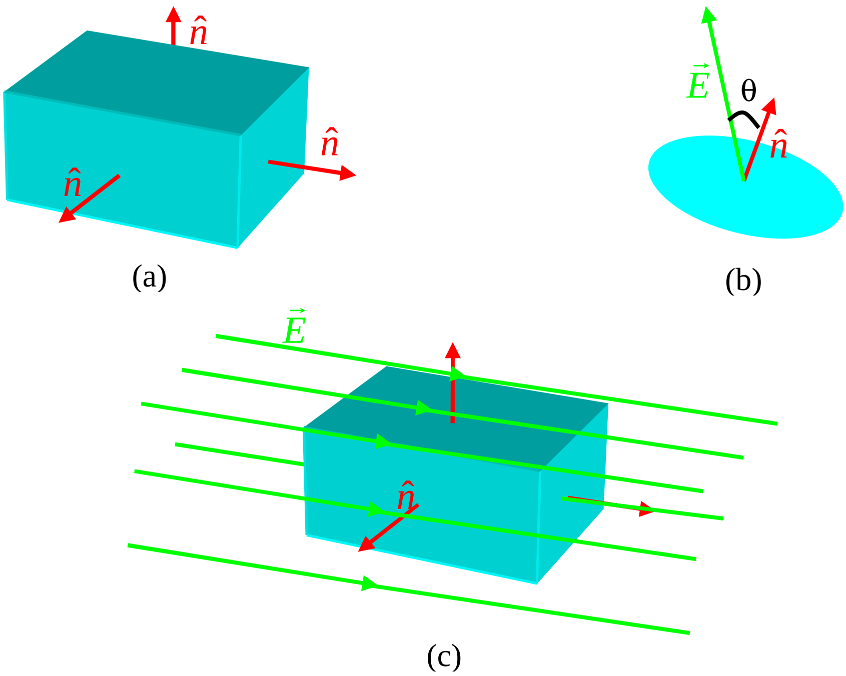
Hori guztia ikusita, eremuaren eta gainazalaren arteko angelu bat erabiliko dugu fluxua kalkulatzeko:

---

[10] *Fluxua:. Hitz horrek zerikusi handia dauka fluidoekin, haien higidurarekin. Baina elektromagnetismoan ez da ezer sartzen edota irteten, eta fluido baten higidura aztertzen badugu, fluidoaren masa zati bat sartzen edo irteten ari dela ikusiko dugu. Antzekoa da bero-fluxua: bero-fluxua kalkulatzen dugunean, bolumen batean sartzen (edo irteten) ari den energia kopurua kalkulatzen dugu.*

$$\vec{E} \parallel \hat{n} \Rightarrow \left|\vec{E}\right|\cos\theta = \left|\vec{E}\right|.1 = \left|\vec{E}\right|$$
$$\vec{E}\ \hat{n} - rekiko\ antiparaleloa \Rightarrow \left|\vec{E}\right|\cos\theta = \left|\vec{E}\right|.(-1) = -\left|\vec{E}\right|$$
$$\vec{E} \perp \hat{n} \Rightarrow \left|\vec{E}\right|\cos\theta = \left|\vec{E}\right|.0 = 0$$

$\hat{n}$ gainazalarekiko perpendikularra den bektore unitarioa da. Noranzkoa, gainazaletik kanpora.



I.20. *irudia. Eremu- eta gainazal-bektoreak gainazal baten gainean. (a) Gainazal itxi baten gainazal-bektoreak ezberdinak izan daitezke puntu bakoitzean. (b) Eremu- eta gainazal-bektoreen arteko θ angelua. (c) Kutxa bat (gainazal itxia) eremu elektriko baten barruan. Aurpegi batzuetan fluxua zero da.*

b) Fluxuaren balioa eta eremua

Fluxuaren balioak eremuaren magnitudearekin erlazionatuta egon behar du. Zenbat eta sendoagoa izan eremua (hau da, zenbat eta karga handiagoa izan kutxaren barruan), orduan eta handiagoa izango da fluxuaren balioa. Horrelaxe erabiliko dugu eremuaren magnitudea fluxuaren definizioan:

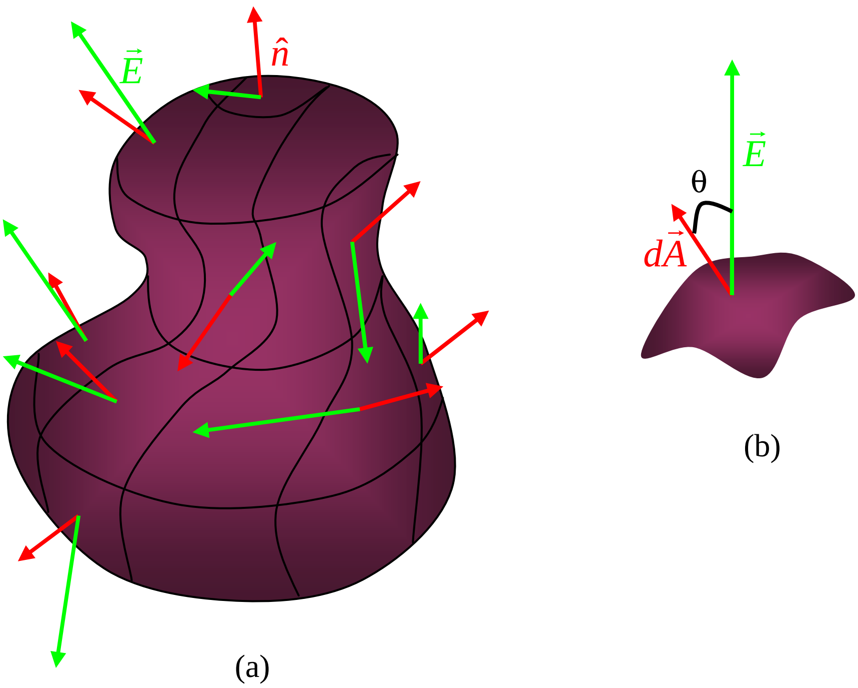
$$\phi \propto \left|\vec{E}\right|\cos\theta \Rightarrow \phi = \vec{E}.\hat{n}$$

c) Fluxuaren balioa eta erabilitako gainazala

Kasu gehienetan $\vec{E}.\hat{n}$ biderkaduraren balioa ezberdina da gainazalaren puntu bakoitzean. Konponbide bakarra gainazala zati -diferentzialetan banatzea da. Nola adierazi zati diferentziala dela? $d\vec{A} = dA\hat{n}$ bektorea erabiliz, non dA azalaren balioa baita. Zati bakoitzean fluxua kalkulatu ondoren, integrazioaren bidez kalkulatuko dugu haren balio osoa:

$$d\phi = \vec{E}d\vec{A} \Rightarrow \phi = \oint_S \vec{E}d\vec{A}$$

Fluxuaren unitateak NSn: Nm^2C^{-1}.



I.21. *irudia. Gainazalaren aldearen arabera eremu- eta gainazal-bektoreen arteko angelua ezberdina bada, (a) irudian ikusten den bezala, konponbide bakarra dago; (b) irudian dugu: gainazala zati diferentzialetan banatu, fluxua kalkulatu zatitxo horretan, eta zatitxo diferentzial guztien ekarpenak batu.*

5.2. Gauss teorema

Hasieran aipatu dugu eremuaren azterketaren ondorioz karga-banaketari buruzko informazioa lortzen ahal dugula. Fluxua definitu ondoren, fluxuaren eta karga-banaketaren arteko harremana ikusiko dugu.

Demagun Q karga puntuala dugula eta fluxua kalkulatzeko gainazal esferiko bat erabiliko dugula. Esferaren gainazal-zati diferentzialean zehar honako hau da fluxua:

$$d\phi = \vec{E}d\vec{A} = \vec{E}dA\hat{n} = dA.\vec{E}\hat{n} = EdA$$

Beraz:

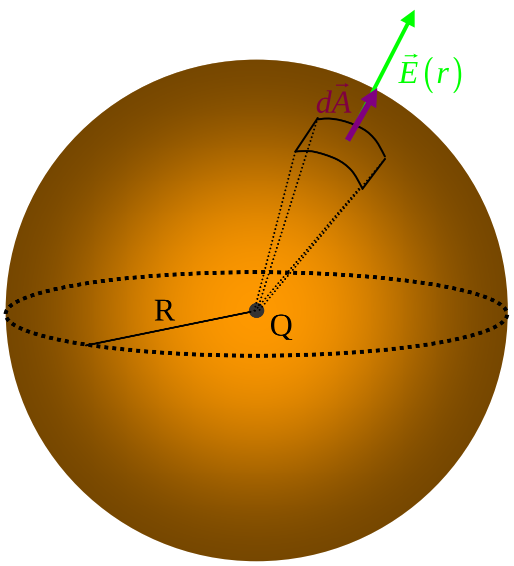
$$\phi = \oint_S E(r)dA = E(R)\oint_S dA = E(R)S = 4\pi R^2 E(R)$$

Zeren eta, eremuak balio bera baitu esferaren puntu guztietan: E(R)

Karga puntual batek sortutako eremua kontuan hartuta, emaitza hauxe da:

$$4\pi R^2 E(R) = 4\pi R^2 \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{R^2} = \frac{Q}{\varepsilon_0}$$

Baina, emaitza berdina da kasu guztietan? Kasu batzuk aztertuko ditugu:



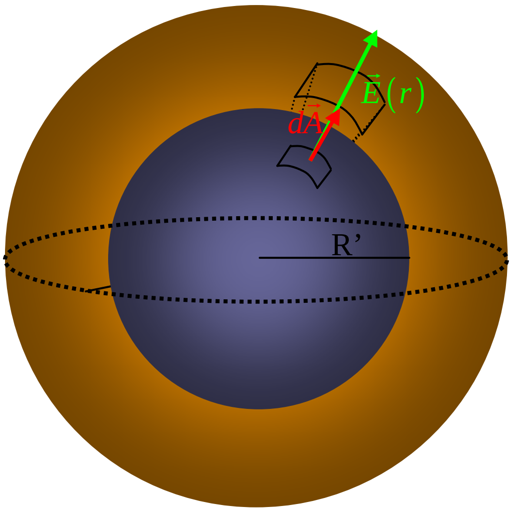
I.22.*irudia. Q kargak sortutako eremuaren fluxu- integrala kalkulatzeko aukeratu dugun gainazala. Eta eremu-bektorea esferaren zati diferentzial baten gainean*

1) Karga negatiboa bada:

$$\phi = \oint_S \vec{E}(r)d\vec{A} = \oint_S -E(r)dA = -E(R)\oint_S dA = -E(R)S = -4\pi R^2 E(R) =$$

$$= -4\pi R^2 \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{R^2} = -\frac{Q}{\varepsilon_0} = \frac{q_{bar}}{\varepsilon_0}$$

Kontuan hartu dugu eremua esferaren barrurantz bideratuta dagoela.



I.23. *irudia. Fluxua kalkulatzeko aukeratu dugun bigarren esfera txikiagoa da, baina egoera guztiz berdina da, emaitza ez da aldatu.*

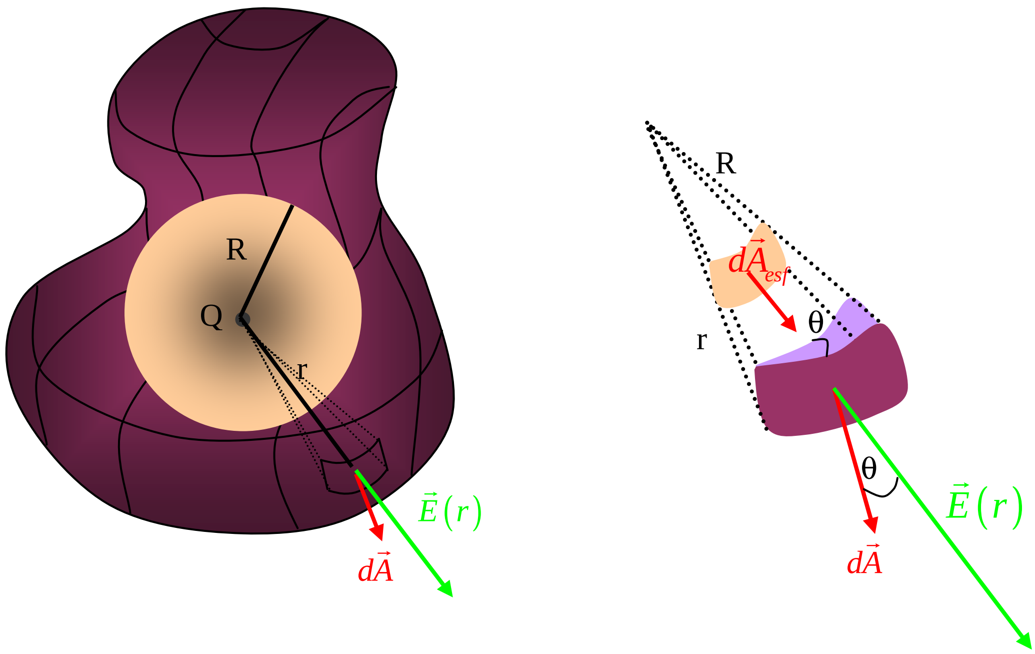
2) Esferaren erradioa ezberdina bada:

$$\phi = \oint_{S'} \vec{E}(r)d\vec{A} = \oint_{S'} E(r)dA = E(R')\oint_{S'} dA = E(R')S' = 4\pi R'^2\, E(R') = -4\pi R'^2 \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{R'^2} =$$

$$= -\frac{Q}{\varepsilon_0} = \frac{q_{bar}}{\varepsilon_0}$$

3) Edozein gainazaletan: gainazalaz gain, R erradioko beste esfera bat hartuko dugu kontuan (ikusi I.24 irudia). Gainazal- diferentzial bakoitza distantzia berean dagoen r erradioko esferan proiektatzen badugu, honako erlazio hau betetzen da: $d\phi = \vec{E}d\vec{A} = EdA\cos\theta = EdA_{esfera} = \vec{E}d\vec{A}_{esfera}$, non dA_{esfera} r erradioko esferaren gainazal- diferentziala baita. Beraz, fluxuaren kalkulua horrela garatzen ahal dugu:

$$\phi = \oint_{S'} \vec{E}(r)d\vec{A} = \oint_{S'} E(r)dA\cos\theta = \oint_{S} \vec{E}(r)d\vec{A}_{esf} = \frac{Q}{\varepsilon_0} = \frac{q_{bar}}{\varepsilon_0}$$



I.24. *irudia. Fluxua kalkulatzeko edozein itxuratako gainazal bat aukeratzen badugu emaitza bera lortuko dugu. Gainazal- zati diferentzial bakoitza proiektatzen ahal dugu distantzia berean dagoen beste gainazal- zati diferentzial batean, esfera itxura duen batean, hain zuzen.*

Hau da, edozein gainazal itxi erabilita, emaitza beti da bera! Gainazalaren barruko karga kopuru garbia zati ε_0 konstantea. Fluxua eta gainazaletik irtetaen/sartzen ari diren eremu-lerroen kopuru garbia proportzionalak dira. Hori dela eta, hasieran aipatutako dipolo-kasuan balantzea nulua da, eta barruan dagoen karga garbia ere zero da.

Hauxe da Gauss-en legea: gainazal itxi bat zeharkatzen duen eremu elektrikoaren fluxua kalkulatzen badugu, bere balioa beti izango da gainazalaren barruko kargarekiko proportzionala:

$$\phi = \oint_{S} \vec{E}(r)d\vec{A} = \frac{q_{bar}}{\varepsilon_0}$$

Lehen aipatu dugunez, kargak geldiunean badaude, Coulomb-en legea eta Gauss-en legea guztiz baliokideak dira. Baina haietariko bat higitzen ari bada, Coulomb-en legea ez da zuzena, Gauss-en legea, berriz, bai. Orokorragoa da, beraz.

5.3. Aplikazioak

5.3.1.Karga- banaketak zehaztu: eroaleak

Gauss-en legearen bidez karga-banaketak zehazten ahal dugula ikusiko dugu, baldin eta eremu elektrikoa ezaguna bada. Horrela aztertuko dugu eroaleen portaera, adibidez.

Orekan dagoen eroalearen barruko eremua zero dela kontuan hartuta, eroalearen barruan dagoen edozein gainazaletan fluxua zero da, nahiz eta eroalea kargatuta egon:

$$\vec{E}_{bar} = 0 \Rightarrow \phi = 0 \Rightarrow q_{bar} = 0$$

Hau da, eroalearen barruan ez dago kargarik, gainazalean bakarrik[11]. Eta egoera berdin-berdina da karga-banaketa induzitua denean.

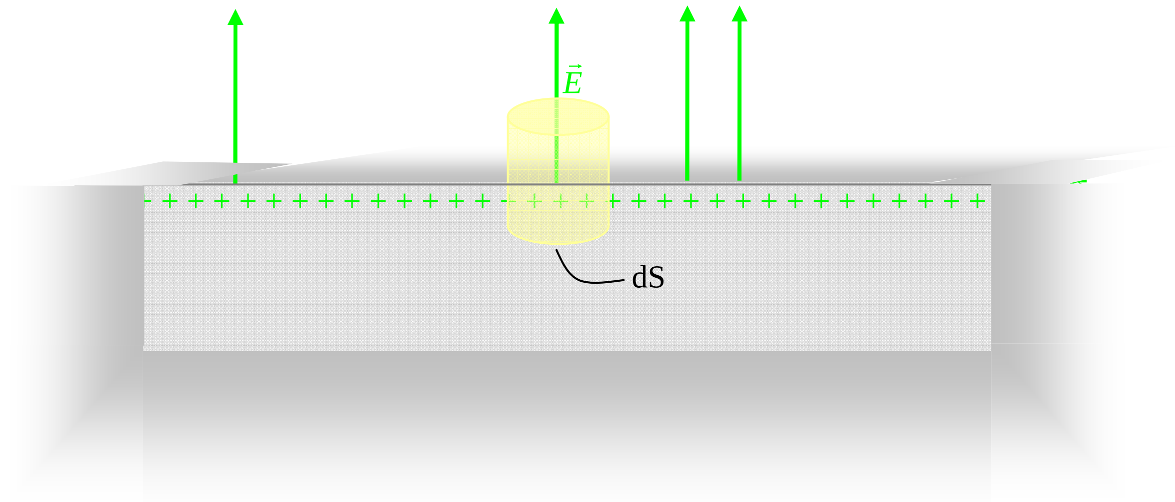
5.3.2.Eremu elektrikoak zehaztu: eroaleen inguruko eremu elektrikoa

Badakigu non kokatzen diren kargak eroaleetan, baina nolakoa da eremua eroalearen hurbil dauden espazioko puntuetan? Gauss-en legea erabiliko dugu erantzuna aurkitzeko.

Lehenik eta behin, aipatu behar dugu eremuak gainazalarekiko perpendikularra izan behar duela, bestela eroalea ez litzateke orekan egongo eta kargak higituko lirateke. Beraz, norabidea ezaguna da, baina magnitudea ez. Magnitudea kalkulatzeko Gauss-en legea erabiliko dugu. Hau da, lehenik eta behin gainazal itxi bat aukeratu, gainazal hori zeharkatzen duen eremu elektrikoa kalkulatu, eta Gauss-en legea aplikatuko dugu. Fluxu- integral bat ebatzi behar dugu, eta horretarako aukeratuko dugun gainazala ez da edozein izango, baizik eta integrala errazago ebazteko egokia den bat.

---

[11] Kontuz! Nahiz eta eroaleen kargak gainazaletik kanpo irudikatu, eroalearen barruan daude. Gainazaletik oso hurbil daude eta oso estu-estua den aldean kokatzen dira.



I.25.*irudia. Gauss-gainazala eremua kalkulatzeko., dS sekzio diferentzialdun zilindroa hartuko dugu, oinarriak eroalearen azalarekiko paraleloak dituena.*

Zein da egokiena? Aurpegiak eremuarekiko zut edota paralelo dituena, jakina. Beraz, I.25 irudiko zilindroa erabiliko dugu. Eremua uniformea ez dela uste dugunez, oso oinarri txikiak dituen zilindro bat aukeratuko dugu. Horrela, nahiz eta eremua aldatu, kontuan hartzen ahal dugu guk aukeratutako gainazalean uniformea dela. Fluxuaren balioa, beraz, aurpegi bakoitza zeharkatzen duen fluxuen batura da:

$$\phi = \phi_{kanpoko\ oinarria} + \phi_{barruko\ oinarria} + \phi_{albo-aurpegia} = EdS$$

non kontuan hartu baitugu honako hau: $\phi_{kanpoko\ oinarria} = EdS$; $\phi_{barruko\ oinarria} = \phi_{alboko\ aldea} = 0$ barruko oinarria eroalearen barruan dagoelako (eta barruko eremua zero delako, jakina) eta, albo-aurpegia eremuarekiko paraleloa denez, fluxua nulua delako aur-

Faraday kaiola

Metalezko kutxa baten barruan ez dugu inoiz jasango kanpoko eremu elektromagnetikoen eraginik. Zergatik? Eremuek ez dute kutxaren hormak zeharkatzeko oztoporik, ezta kutxaren barruan sartzeko ere, baina, hori egitean, metalezko kutxan eremu horiek deuseztatzen dituzten karga-banaketak sortzen dira. Eta kutxaren barruan kanpoko eremuen estaltzea gertatzen da. Kutxaren barruan gaudela, ez dugu nabarituko kanpoko eremurik, nahiz eta oso sendoa izan.

Faraday kaiola izeneko gailu horiek oso erabiliak dira interferentzia elektromagnetikorik gabeko inguruneetan lan egin edota ikertu behar bada. Baina baita kontrako egoeretan ere; hau da, eremu elektromagnetikoa esparru batean mugatu nahi badugu (esaterako, mikrouhin-labe baten barruan). Gorputz kargatu bat Faraday kaiolaren barruan sartu eta kaiola lurrarekin konektatu ondoren, kaiolan gorputzaren kontrako karga izango dugu eta, kanpoan, bi eremuek (gorputzarenak eta kaiolarenak) elkar deuseztatuko dute. Beraz, gorputzaren eremua mugatu egin dugu kaiolaren barruan.

pegi horretan. Gauss-en legea erabiliz, emaitza hauxe da:

$$\left.\begin{array}{r}\phi = EdS \\ \dfrac{q_{bar}}{\varepsilon_0} = \dfrac{\sigma dS}{\varepsilon_0}\end{array}\right\} \Rightarrow EdS = \frac{\sigma dS}{\varepsilon_0} \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

non σ eroalearen karga- dentsitatea azalera- unitateko baita.

5.3.3.Eremu elektrikoak zehaztu: hari kargatuak sortutako eremua

Simetria handiko egoeretan ere posible da Gauss legea erabiltzea eremu elektrikoa kalkulatzeko. Demagun hari kargatu oso luze bat dugula. Edo, haritik oso hurbil dauden puntuetan bakarrik interesatzen zaigula eremua kalkulatzea. Hain hurbil dauden puntuak non hariaren dimentsioak infinituak baitira distantzia horiekin alderatuta. Infinitua dela kontuan hartuta, hariaren kargaren ordez askoz erabilgarriagoa da, askotan, karga-kopurua luzera-unitateko erabiltzea, hau da: $\lambda = Q/L\ Cm^{-1}$

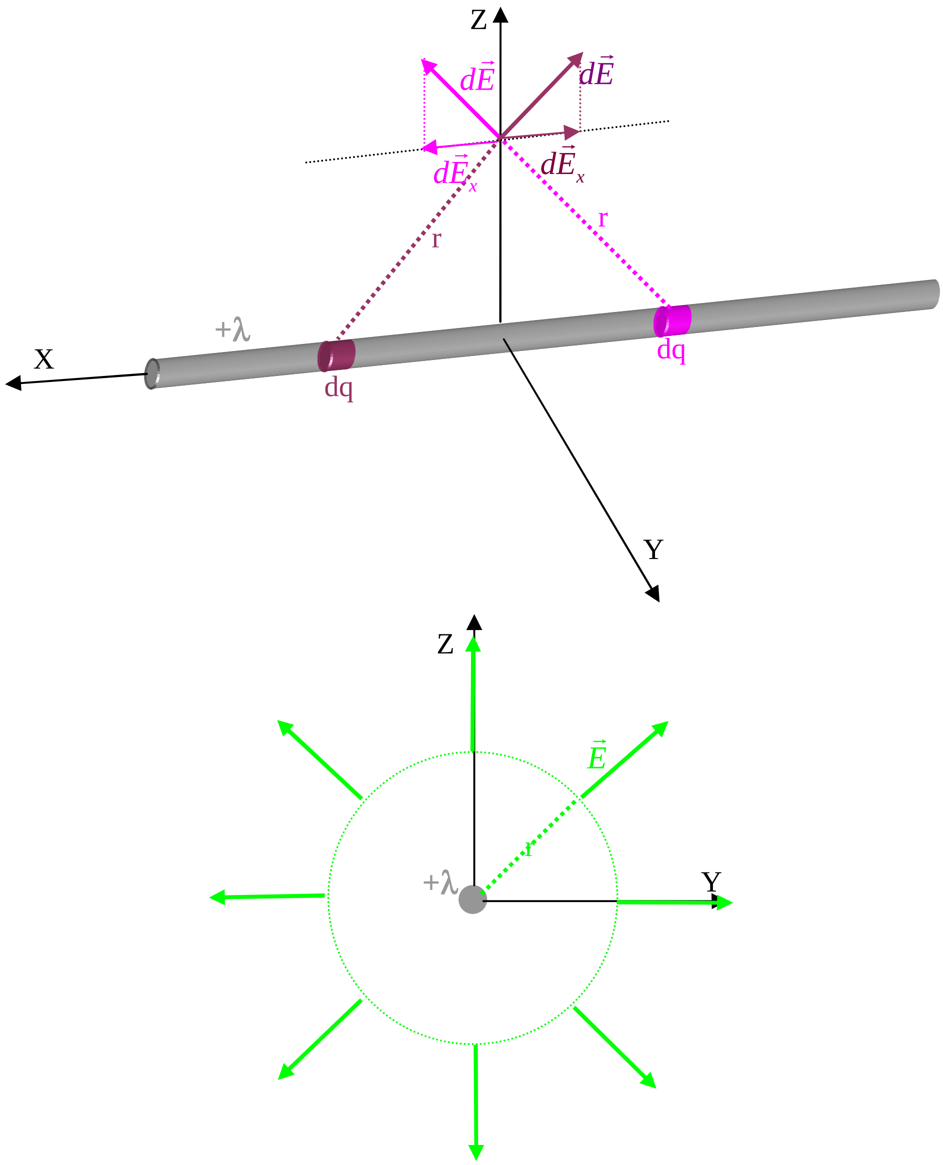
Gauzak horrela, simetria dela- eta badakigu hariak sortutako eremu elektrikoa norabide erradialean bideratuta egongo dela. Eta haren magnitudea, hariaren ardatzarekiko distantziaren mende dagoela: $\vec{E}(r) = E(r)\hat{r}$ (ikusi I.26 irudia)

Datu hori kontuan hartuta, Gauss-en legea erabiliko dugu eremuaren magnitudea kalkulatzeko. Fluxu- integrala kalkulatu beharko dugunez, kasu horretan ere ebazpena errazagoa egiten zaigun gainazala aukeratuko dugu, hau da, I.27 irudiko zilindroa. Zilindroen oinarrietan eta albo-aurpegian bananduko dugu fluxu -integrala, eremu elektrikoaren eta gainazal-bektoreen arteko biderketa eskalarra ezberdina baita.

$$\phi = \oint_{S_{zil}} \vec{E}(r)\,d\vec{A} = \int_{(1)oin} \vec{E}(r)\,d\vec{A} + \int_{(2)oin} \vec{E}(r)\,d\vec{A} + \int_{albo} \vec{E}(r)\,d\vec{A}$$

Oinarrietan: $\vec{E}(r)\,d\vec{A} = 0$ eta albo-aurpegian: $\vec{E}(r)\,d\vec{A} = E(r)\,dA$ bektoreak elkarzutak eta paraleloak direlako, hurrenez hurren. Integrala, beraz:

$$\phi = \oint_{S_{zil}} \vec{E}(r)\,d\vec{A} = \int_{(1)oin} \vec{E}(r)\,d\vec{A} + \int_{(2)oin} \vec{E}(r)\,d\vec{A} + \int_{albo} \vec{E}(r)\,d\vec{A} = \int_{albo} E(r)\,dA$$



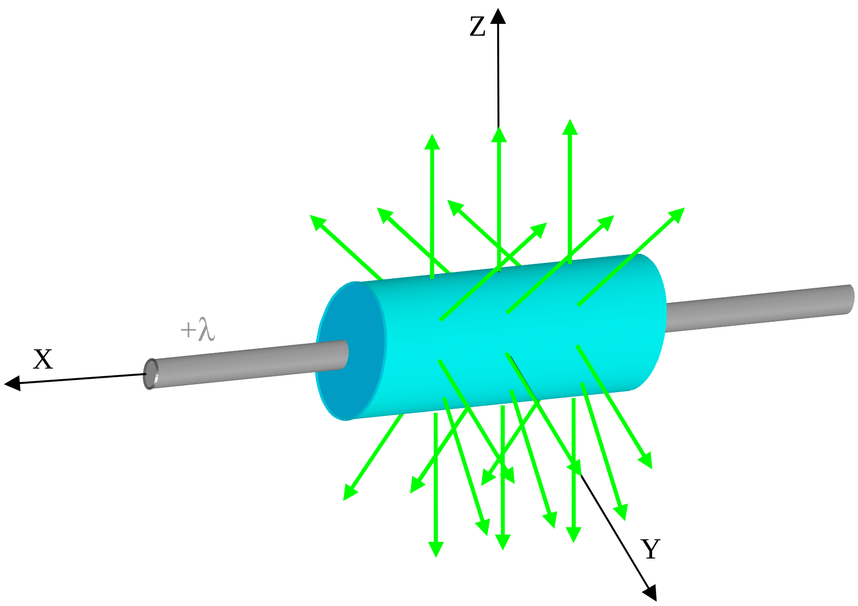
I.26.*irudia. Hari kargatuak sortutako eremuaren norabidea. Kontuan hartu, hariaren simetria dela eta, hariaren karga diferentzial bakoitzak sortutako eremua eta hariaren erditik distantzia berean dagoen beste batek sortutakoa gainezartzean, hariarekiko paraleloak diren eremu-bektoreen osagaiek elkar deuseztatzen dutela. Eta haria infinitua denez, eremu erresultanteak norabide erradiala izango du beraz.*

Bestalde, albo-aurpegian eremu- bektorearen balioa bera da, puntu guztiak hariarekiko r distantzian daude eta. Beraz, emaitza hauxe da:

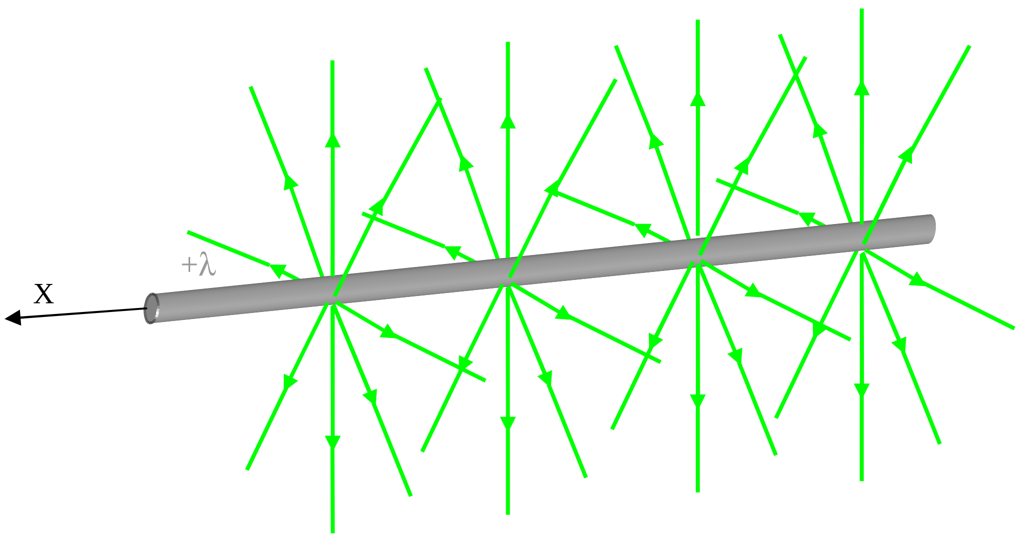
$$\phi = \int_{albo} E(r)\, dA = E(r) \int_{albo} dA = E(r)\, A_{albo} = 2\pi r L E(r)$$

non L zilindroaren luzera baita. Gauss-en legearen arabera, balio hori eta barruko karga zati ε_0 berdinak dira:

$$\left.\begin{array}{l}\phi = 2\pi r L E(r) \\ \phi = \dfrac{q_{bar}}{\varepsilon_0} = \dfrac{\lambda L}{\varepsilon_0}\end{array}\right\} \Rightarrow 2\pi r L E(r) = \frac{\lambda L}{\varepsilon_0} \Rightarrow E(r) = \frac{\lambda}{2\pi r \varepsilon_0}$$



I.27. *irudia. Hariak sortutako eremua elektrikoaren fluxua ardazkidea den zilindro batean.*



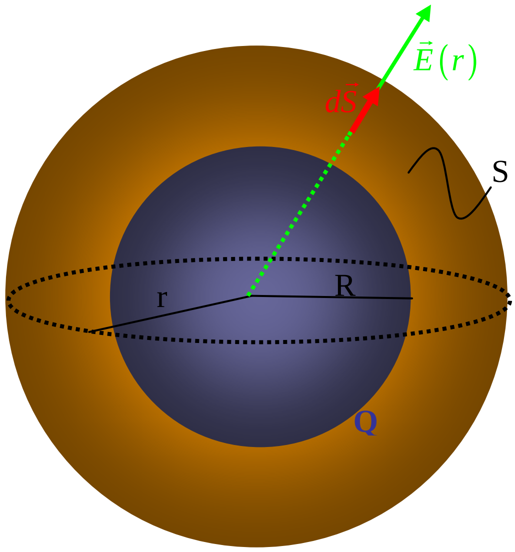
I.28.*irudia. Haria kargatuak sortutako eremu-lerroak*

Eta eremua elektrikoaren magnitudea zehaztu egin dugu! Hau da, eremua, hauxe da:

$$\vec{E}(r) = \frac{\lambda}{2\pi r \varepsilon_0}\hat{r}$$

5.3.4.Eremu elektrikoak zehaztu: esfera kargatuak sortutako eremua

Orain esfera kargatu bat dugu. Plastikozkoa da eta uniformeki kargatuta dago. Horrek esan nahi du karga-kopurua berdina dela bolumen-unitateko, bere puntu guztietan. Eta balioa: $\rho = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{4\pi R^3/3}$ Cm^{-3} da, non Q karga osoa eta R esferaren erradioa baitira, hurrenez hurren.



I.29. *irudia. Q karga duen esferak sortutako eremuaren fluxua kalkulatzeko, r erradioko eta S azalerako gainazal esferikoa erabiliko dugu.*

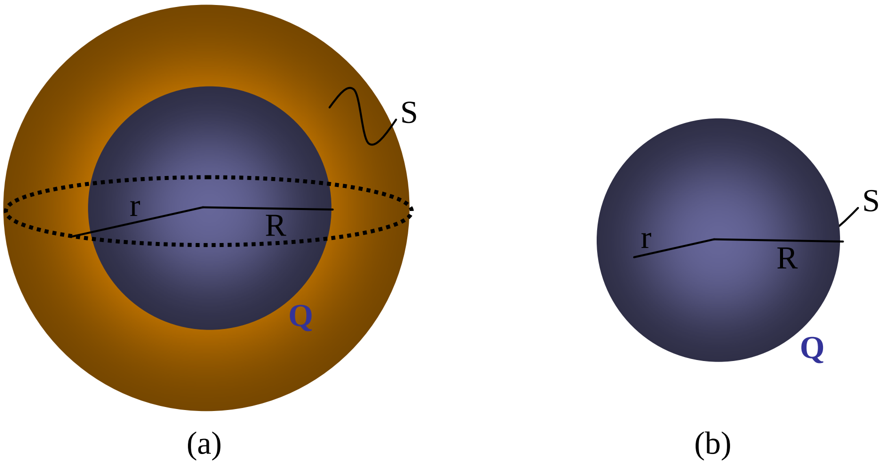
Simetria dela eta, badakigu eremuaren norabideak erradiala izan behar duela. Gainera, bere magnitudea esferarekiko distantziaren mende bakarrik egongo da, hau da: $\vec{E}(r) = E(r)\hat{r}$. Beraz, kasu horretan ere posiblea da Gauss-en legea erabiltzea magnitudea kalkulatzeko. Eremuaren ezaugarriak kontuan hartuta, fluxu- integrala garatzeko r erradioko esfera erabiliko dugu (ikusi I.29 irudia).

$$\phi = \oint_{S_{esf}} \vec{E}(r)\, d\vec{A} = \int_{S_{esf}} E(r)\, dA = E(r) \int_{S_{esf}} dA = E(r) S_{esf} = 4\pi r^2 E(r)$$

non kontuan hartu baitugu eremua eta gainazal-bektoreak paraleloak direla eta eremuaren magnitudea konstantea dela gainazal esferikoaren puntu guztietan. Orain kalkulatu behar dugu esferaren barruan dagoen karga-kopurua, baina horixe ezberdina da r distantziaren arabera. Ez du balio bera gorputz kargatuaren barruan eta kanpoan (ikusi I.30. irudia). Hori da:

$$r \geq R \rightarrow q_{bar} = Q = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho$$

$$r < R \rightarrow q_{bar} = V_{esf}\, \rho = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho$$



I.30.*irudia. Esferak sortutako eremu-fluxuaren kalkuluak. (a) Kanpoko espazio-aldeko eremuaren fluxua. Karga osoa dugu Gauss-gainazalaren barruan. (b) Barruko espazio-aldean, berriz, ez da horrela; esfera kargatuaren zati bat bakarrik dago barruan.*

Eta eremua ezberdina da kanpoko eta barruko aldeetan:

$$\phi = 4\pi r^2 E(r) = \frac{q_{bar}}{\varepsilon_0} = \begin{cases} r \geq R \rightarrow \dfrac{4}{3\varepsilon_0}\pi R^3 \rho \\ r < R \rightarrow \dfrac{4}{3\varepsilon_0}\pi r^3 \rho \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} r \geq R \rightarrow \vec{E} = \dfrac{R^3 \rho}{3 r^2 \varepsilon_0}\hat{r} = K\dfrac{Q}{r^2}\hat{r} \\ r < R \rightarrow \vec{E} = \dfrac{r\rho}{3\varepsilon_0}\hat{r} \end{cases}$$

Jokabidea guztiz ezberdina da bi espazio-aldeetan.

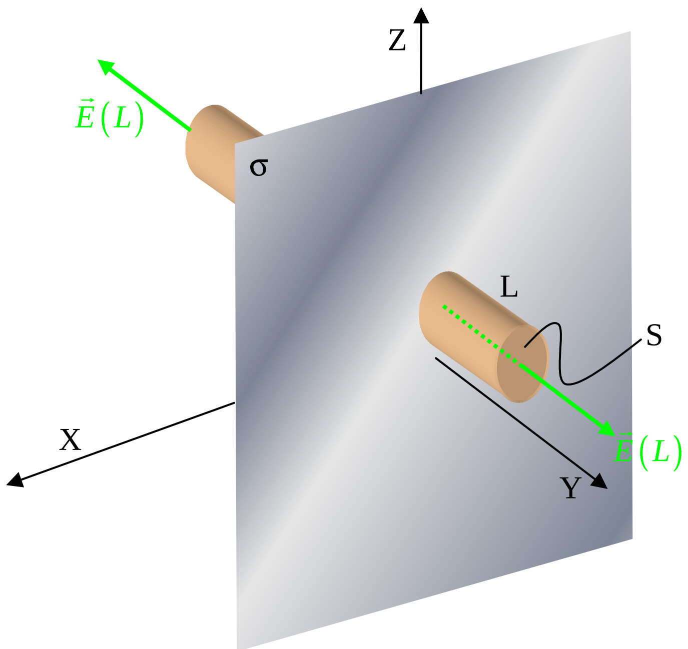
5.3.5.Eremu elektrikoak zehaztu: xafla kargatuak sortutako eremu elektrikoa

Eta, zer gertatzen da karga- banaketa laua bada? Simetria handiko beste kasu bat dugu, baldin eta karga uniformeki banatuta badago eta xaflen dimentsioak oso handiak badira, jakina. Orduan baieztatzen ahal dugu eremua xaflarekiko zuta dela (ikusi I.31 irudia). Hau da, $\vec{E} = E_y \hat{j}$. Xaflaren karga osoa Q bada, karga-dentsitatea azalera- unitateko $\sigma = \dfrac{Q}{S}$ Cm^{-2} da, S xaflaren azalera izanik.

Zein da gainazal egokia fluxu-integrala kalkulatzeko? Oinarriak xaflare-kiko paralelo dituen zilindro bat, hain zuzen (ikusi I.31 irudia). Horrela, albo-aurpegian fluxua nulua izateaz gain, oinarrietan eremuaren balioa bera dela ziur-tatzen dugu. Emaitza hauxe da:

$$\phi = \oint_{S_{zil}} \vec{E}(y)\, d\vec{A} = \int_{(1)oin} \vec{E}(L)\, d\vec{A} + \int_{(2)oin} \vec{E}(L)\, d\vec{A} + \int_{albo} \vec{E}(y)\, d\vec{A} =$$

$$= \int_{(1)oin} E(L)\, dA + \int_{(2)oin} E(L)\, dA = 2\pi r^2 E(L)$$



I.31.*irudia. Xaflak sortutako eremua eta Gauss-gainazala*

Eta barruko karga kalkulatu ondoren, Gauss-en legea erabiliko dugu:

$$\left.\begin{array}{r}\phi = 2\pi r^2 E\left(L\right)\\ \dfrac{q_{bar}}{\varepsilon_0} = \dfrac{\sigma S_{oinarria}}{\varepsilon_0} = \dfrac{\sigma \pi r^2}{\varepsilon_0}\end{array}\right\} \Rightarrow 2\pi r^2 E\left(L\right) = \frac{\sigma \pi r^2}{\varepsilon_0} \Rightarrow E\left(L\right) = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

Hau da, eremuaren magnitudea konstantea da! Eta ez dago xaflarekiko distantziaren mende. Emaitza hau zuzena da ipinitako baldintzak betetzen badira bakarrik, jakina. Hau da, karga- banaketa uniformea da eta xaflaren dimentsioak oso handiak dira xaflarekiko distantziarekin alderatuta.

ERANSKINA: MATERIAREN OINARRIZKO OSAGAIAK ETA MEKANIKA KUANTIKOA

Materiaren oinarrizko osagaiak zein diren ulertzea ez zen lan erraza. Onartuta zegoen grekoek proposatutako atomo-eredua; hau da, materia oso txikiak diren (gaur egun mikroskopikoak esango genuke) osagarriz osatuta zegoela. Baina, nolakoak ziren osagai horiek? Eta atomo horiek, beste osagai batez osatuta zeuden?

1752an, Thomas Melvill, fisikari eskoziarrak, gas batzuk berotu eta igortzen duten argia aztertu zuen. Argiaren izaera ikertzeko, prismak[12] erabili zituen, haien espektroak gauzatu zituen, eta gasen espektroak eta solidoenak oso ezberdinak direla aurkitu zuen. Gasenetan lerro distiratsuak agertzen dira, eta, gainera, lerro-patroia aldatu egiten da gasaren arabera. Bestela esanda, gasaren hatz aztarnak dira.

Lerro horiek eta egitura atomikoa elkartzeko asmoz, fisikariak Hidrogenoaren espektroa aztertzen hasi ziren, atomorik sinpleena dela eta. 1862an Ångström-ek (1814-74) zehatz neurtu zituen Hidrogenoaren espektroko maiztasun ikusgaian gertatzen diren lau lerroak. Urte batzuk pasatu ondoren, 1885ean, Balmer-rek (1825-98) lerroen maiztasunei buruz lan teorikoa gauzatu zuen. Lerro- maiztasunen balioak kalkulatzeko formula bat ondorioztatu zuen, baina, ez zuen erabili fisikaren printzipiorik, baizik eta zenbakiak soilik. Hain zehatzak ziren haien iragarpenak, non ezinezkoa baitzen emaitza kontuan ez hartzea. Fisikaren legeak atomoari ezarri ondoren, posiblea izan beharko zuen formula bera ondorioztatzeak.

1890ean atomoaren izaera ezezaguna zen artean; baina mendearen amaieran Thomson-ek (1856-1940) elektroiaren karga-masa erlazioa esperimentalki neurtu zuen, elektroia partikula bat zela, ez izpi katodikoa, frogatuz. Thomsonek eta Kelvin-ek egitura atomikoa azaltzen zen eredu bat garatu zuten: esfera positibo batean elektroi negatiboak banatu egiten dira. Barruko dinamikak Newton-en legeei jarraitu behar zien eta atomoak igorritako erradiazioa Maxwell-en

[12] Prisma bat zeharkatzean argiaren maiztasunak baztertzen ditugu; hori dela eta, argia prismatik irtetean ortzadar- gisako patroi bat ikusten dugu:, maiztasun bakoitzari argi-kolore bat dagokio eta. Eta gasek izan ezik, beste gorputzek ere horrelako espektroak dituzte.

teoria elektromagnetikoaren bidez azaldu behar zen. Baina eredu horrek batere egonkorrak ez ziren atomoak aurresan zituen eta, azkenean, baztertu egin behar izan zuten.

Orduan, Rutherford-i (1871-1937) atomoak zundatzeko alfa partikula erabiltzea bururatu zitzaion. Nola? Masa handiko partikula horiek atomoen kontrako jaurtigai gisa erabiliz. Eta bere irakasle bati, Geiger-i (1882-1945), zundaketa egiteko agindu zion.

Geigerrek partikulak bidali zituen oso mehea zen urrezko xaflara eta haien dispertsioa neurtu zuen pantaila fluoreszente batekin jotzean sortzen zituzten dirdirak aztertuz. Emaitzak harrigarriak ziren: partikula alfetariko batzuk atzera egin zuten![13] Nola azaldu gertatzen zen talka hori?

Azalpen bakarra da atomoen masa gehiena nukleo ñimiño batean metatzen dela da. Atomoa ia hutsik dago eta nukleoak espazioaren bilioiren bat bakarrik betetzen du. Hori dela eta, alfa partikula gehienek metalezko xaflen geruza asko zeharkatzen ahal dituzte eta haietariko batzuek noizbehinka talka egiten dute nukleo batekin.

Nukleo batera hurbiltzean, bere energia zinetikoa poliki-poliki murriztu egiten da kargen arteko indar aldaratzaileak direla eta. Azkenean geldirik geratzen da, eta, energia- kontserbazioa erabiliz, hurbiltze handienaren distantzia kalkula dezake. Dispertsioaren emaitza esperimentalekin alderatuz, atomoaren tamaina neurtzean lortu zuten.

Eta elektroiak? Nola kokatzen dira nukleoaren inguruan? Negatiboak badira, zergatik ez dira jaisten nukleora? Rutherford-ek indar elektriko honrrek grabitatorioa gisa jokatzen duela proposatu zuen: planeten artean ere sortzen dira indar erakarleak, baina, kasu horretan, biratzeko beharrezko indarrak dira, eta planetaek ez dute batak bestea jotzen. Antzekoa gertatuko litzateke, beraz, elektroien eta nukleoaren artean.

Baina arazo bat zegoen: elektroiek nukleoaren inguruan egingo balute bira, uhin elektromagnetikoak igorri eta energia galduko lukete. Eta orduan bai, nukleora jaitsiko lirateke, eta, gainera, segundoa baino denbora-tarte txikiagoan. Berriro ere eredua baztertu behar zuten...

---

[13] Paper baten kontra jo ondoren, bala batek atzera egingo balu bezala!

Niels Bohr Manchester-era iritsi zenean, Rutherford-ek proposatutako eredua pil-pilean zegoen. Haren taldean hasi zen lanean, eta hasieratik susmatu zuen arazoa zein zen: fisika klasikoa ez zen baliokoa atomoen barruan. Planck-en eta Einstein-en lanak ezagutzen zituen, eta kontuan hartu zituen bere eredua garatzeko. Bohr-ek pentsatzen zuen egonkorrak ziren elektroi-orbita berezi batzuk bakarrik zirela posible: elektroiek nukleoaren inguruetan egiten dute bira, mekanika eta elektromagnetismoaren legeei atxikita. Baina ezin dute haien orbitetatik irten erradiazio-igortzearen ondorioz, energia kuantuetan soilik igortzen ahal dutelako, eta ez era jarraituan, fisika klasikoan baieztatzen den moduan. Orbita egonkor batzuk izango dira, energia- kopuru jakin batzuei dagozkieonak. Eta erdian, ezer ez, energia-kuantu zatiak beharrezkoak izango liratekeelako. Batetik bestera lekualdatzeko, elektroiek energia-kuantu bat xurgatu edo igorri behar dute. Balmer-en formula ezagutu bezain laster burutu zuen eredu teorikoa eta azaldu zuen formula.

Bi postulatu adierazi zituen:

1.a) Elektroiak orbita berezi batzuetan higitzen dira, egoera egonkor deritzon eta, erradiaziorik igorri gabe. Egoera egonkorretan, elektroien momentu angeluarrek $n(h/2\pi)$[14] balio dute, non n zenbaki osoa baita[15]. Hau da, L momentu angeluarrak ez du edozein balio, baizik eta balio jakin batzuk. Lehenengo orbitan $1(h/2\pi)$, bigarrenean $2(h/2\pi)$, hirugarrenean $3(h/2\pi)$, …

2.a) Elektroiren bat egoera egonkor batetik beste batetara aldatzen bada, erradiazioa igorri edo xurgatuko da. Erradiazio horien maiztasunak Planck/Einsteinen erlazioari atxikitzen dizkio: $hf = E_i - E_f$, non E_i eta E_f hasierako eta amaierako energiak baitira.

---

[14] "h" Planck konstantea da, bere balioa: $h = 6{,}626.10^{-34}$ Js

*[15] Emaitza hori Nicholson-ek (1881-1955) egindako lanean oinarritu zuen. Maila atomikoan **h** konstantea garrantzi handikoa da; Nicholson-ek pentsatzen zuen elektroiak gehitzean edo erauztean atomoaren momentu angeluarra kopuru diskretuetan bakarrik handitzen edo gutxitzen ahal dela. Momentu angeluarra kuantizatu zuen Hidrogenoaren balioa kalkulatuzen: $L = mvR = n(h/2\pi)$, non m, v eta R elektroiaren masa, abiadura eta orbita-erradioa baitira, hurrenez hurren.*

II POTENTZIAL ELEKTRIKOA

1. SARRERA

Erabilera elektrikoetan tentsio magnitudeaz baliatzen gara beti. Zer da, zehatz-mehatz, tentsio hori? Zer lotura du eremu eta indar elektrikoarekin? Zergatik erabiltzen dugu magnitude hori eta ez eremu elektrikoa?

Ikusiko dugunez, instalazio elektrikoak gauzatzeko tentsioa askoz magnitude erosoagoa da eremua baino, eta energiarekin zerikusi handia du. Energia da egunero erabiltzen dugun kontzeptua, eta horixe da elkarte elektrikoari ordaintzen diogun kontsumo-ondasuna, hain zuzen.

Hurrengo ataletan, beraz, elkarreragin elektrikoak berriro aztertuko ditugu, baina orain energia erabiliko dugu. Hau da, beste ikuspuntu bat erabiliko dugu sistema elektriko bati zer gertatuko zaion aurresateko.

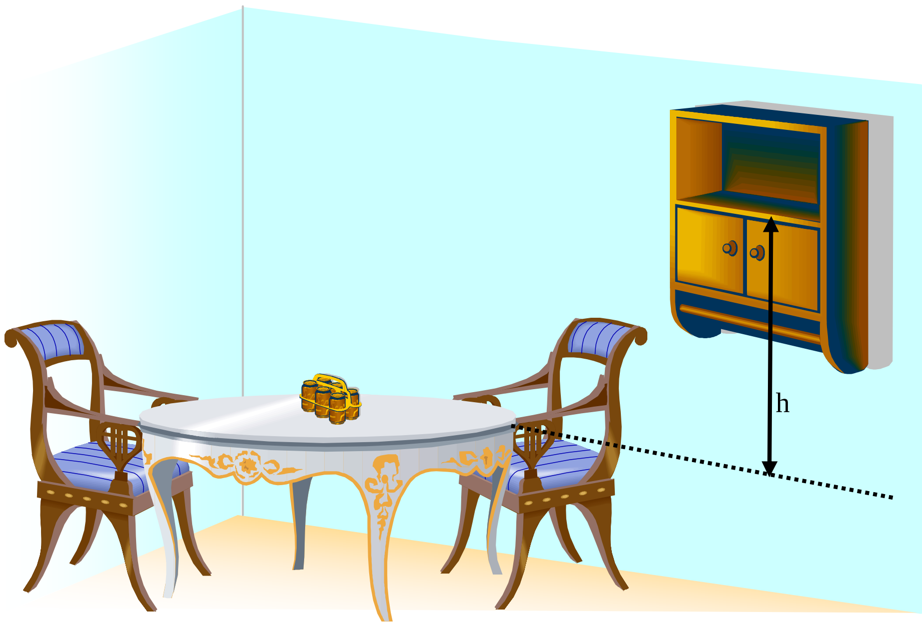
2. ENERGIA POTENTZIAL ELEKTRIKOA

Lehenik eta behin, kontzeptu berri hori hobeto ulertzeko, ezaguna den beste egoera bati erreferentzia egingo diogu. Denok dakigu edozein gorputz zorutik mahai batera igotzeko energia eman beharko diogula, edo, bestela esanda, bultzatu egin beharko dugula, pisuaren kontra jotzen duen indarra erabiliz. Eta, gainera, gorputza zenbat eta astunagoa izan, orduan eta indar gehiago eman beharko diogu! Oso pisu handiko gorputza bada, energia asko emango diogu eta nekatu egingo gara.

Fisika arloan oso kasu ezaguna denez, dagoeneko badakigu kalkulatzen edozein gorputz h altuerara igotzeko eman beharko diogun energia: mgh da, non m gorputzaren masa eta g Lurraren gaineko grabitazio-azelerazioa baitira.

Gorputza altuera batean dagoenean, aske uzten badugu berriro zorura iritsiko da, abiadura zehatz bat duenean. Indarrak erabiliz erraz azal dezakegu prozesua: gorputza Lurraren eremu grabitatorioaren mende dagoenez, indar grabitatorioa jasan eta zorurantz abiatuta azeleratzen hasi da. Baina beste azalpen posible bat honako hau da: gorputza igotzeko gorputzari berari eman diogun energia sisteman bertan metatu da. Sistema aske geratzen denean, metatutako energia hori, potentziala deritzona, energia zinetiko bihurtu da, eta zorura iritsi da. Hau da:

Emandako energia = metatutako energia potentziala: $mgh = \Delta U_P$
Metatutako energia = amaierako energia zinetikoa: $\Delta E_z = E_{z,\,amaiera} = -\Delta U_p = mgh$



II.1. *irudia. Energia potentzial grabitatorioa. Garagardoak mahaitik apalera igo ondoren sistemak energia gehiago du: igotzeko eman dioguna. Bere balioa, mgh da, non m garagardoen masa baita.*

Metatutako energia sistemak duen energia potentziala dela esaten dugu, zinetikoarekin ez nahasteko. Energia potentziala, beraz, elkarreragina duten sistemen arteko distantziaren mende dago, eta elkarreragin horren mende zinetikoa bihur daiteke[16]. Horixe da, hain zuzen, energia-kontserbazioaren printzipioa: sistemak ez badu jasaten elkarreragin ez kontserbatzailerik, bere energia mekanika ez da murrizten, eta energia potentzialak energia zinetiko bihurtzen du: $\Delta E_z + \Delta U_p = 0 \Rightarrow \Delta U_p = -\Delta E_z$

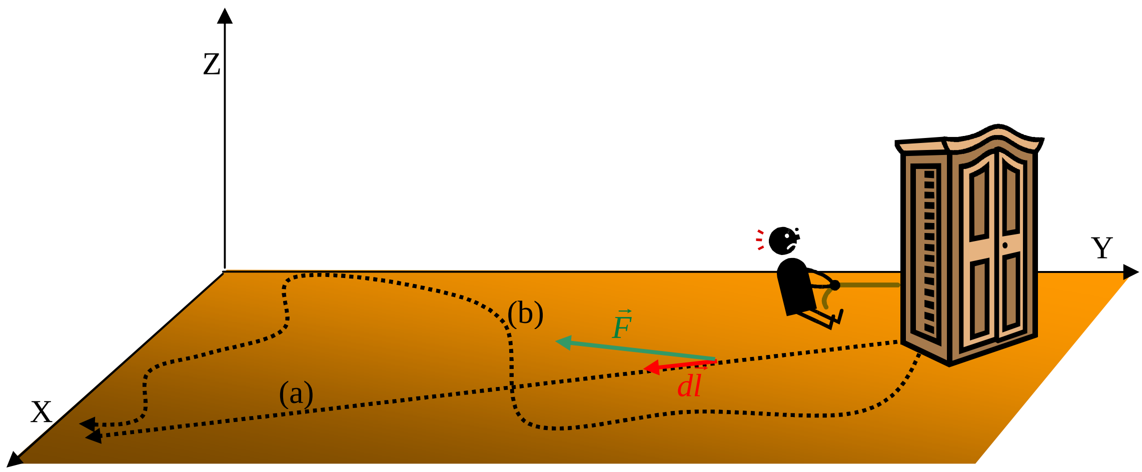
Indarren bidez sistemarekin trukatutako energiari lan deritzo, eta horrela kalkulatzen dugu (ikusi eranskina):

---

[16] *Eta horixe da osatzen den prozesua zentral hidroelektrikoetan. Ura metatzean, energia kopuru handi bat metatzen dugu energia potentzial gisa. Uhatea irekiz gero, horrela metatutako energia zinetiko bihurtzen da eta urak turbina bat bultzatzen du . Komeni zaigun unean erabil dezakegu urtegian metatutako energia.*

$$W = \int_{\vec{r}_{hasiera}}^{\vec{r}_{amaiera}} \vec{F} d\vec{r} = \Delta E_z$$

non $\vec{F}$ sistemaren gaineko indarra baita eta $\vec{r}_{hasiera}$, $\vec{r}_{amaiera}$ hasierako eta amaierako posizio-bektoreak, hurrenez hurren, indarraren mende zegoela ibilbide zehatz bat osatzean.



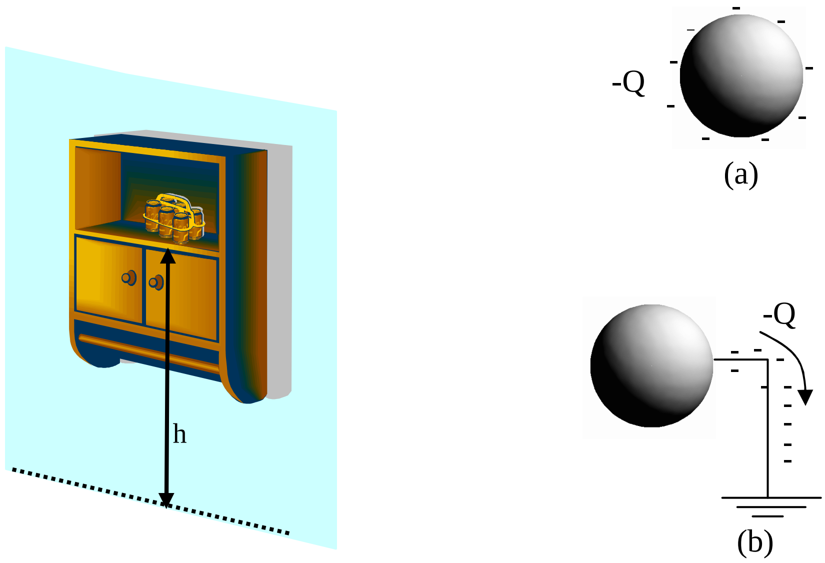
II.2. *irudia. Lana kalkulatzeko ibilbidea. Mutilak egindako lana ez da berdina ibilbidea aldatzen badau: (a) ibilbidea (b) baino laburragoa denez, ez da hainbeste nekatuko. Lana kalkulatzeko, ibilbidea zatitxo- diferentzialetan banandu, zatitxo horretan egindako lana kalkulatu, eta ekarpen guztiak batu ditugu.*

Hau da, kontuan hartzen ditugu ibilbidea nahiz egindako indarra. Emaitza ibilbidearen mende dago, salbuespen batzuk izan ezik. Salbuespen horietan osatutako ibilbideak ez du eraginik, eta indarraren lana bakarrik dago hasierako eta amaierako posizioen mende (ikusi eranskina). Eta sistemari emandako energia sisteman bertan metatzen ahal dugu,; horixe da sistemaren energia potentziala, hain zuzen! Indar berezi horiei kontserbatzaile deritze.

Indar elektrikoa indar kontserbatzailea da (ikusi eranskina). Beraz, sistema kargatu bati eman diogun energia sisteman bertan metatzen ahal dugu energia potentzial elektriko gisa, eta une egoki batean, energia zinetiko gisa berreskuratzen ahal dugu. Bere balioa, beraz:

$$\Delta U_E = -\Delta E_z = -W = -\int_{\vec{r}_{hasiera}}^{\vec{r}_{amaiera}} \vec{F}_{elek} d\vec{r}$$

Unitatea, beste energia- motetan bezala, joulea (J) da, SIk ezarri bezala.

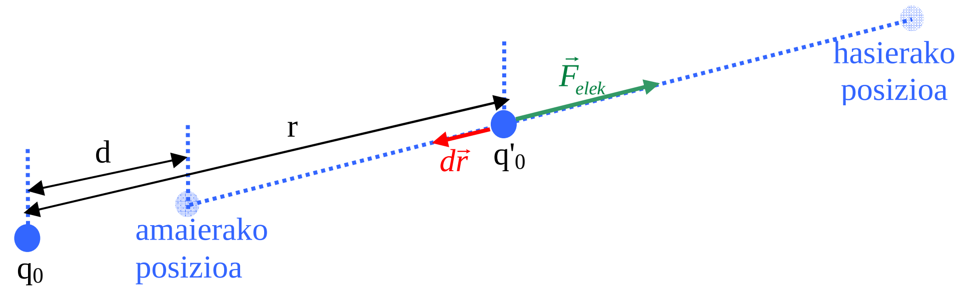


II.3. *irudia. Energia-kontserbazioa. Sisteman bertan energia potentzial gisa metatutako energia berreskuratzen ahal dugu geroago. Apalean gorde ditugun garagardoak apaletik erortzen utziko bagenitu, haien energia potentzial grabitatorioa zinetiko bihurtu eta zorura iritsiko litzateke, v abiaduran. Gauza bera gertatzen zaie kargei. (a) Gorputz batean kargak metatzeko energia eman, eta energia potentzial (elektriko) gisa metatu dugu esferan. (b) Lurrarekin konektatzen badugu, kargak aldendu egingo dira. Metatutako energia potentzial elektrikoa erabili eta zinetiko bilakatuko da.*

2.1. Bi partikula kargatuen energia potentziala

Demagun bi karga puntual ditugula, eta bata bestearekiko "d" distantziara daudela. Zenbat energia metatu dugu sistema horretan? Hau da, zenbatekoa da sistema horren energia potentziala?

Aurreko formula erabiliko dugu: $\Delta U_E = -\Delta E_z = -W = -\int_{\vec{r}_{hasiera}}^{\vec{r}_{amaiera}} \vec{F}_{elek} d\vec{l}$. Baina, zein da higitu den sistema eta hark egindako ibilbidea?



II.4. *irudia. q_0 karga geldirik dago, eta q'_0 ekarri dugu infinituan dagoen espazio-aldetik*

Bi kargak bata bestearen alboan egoteko, haien posizioetan kokatu behar ditugu. Eta karga bat espazio-alde batean badago, beste bat alboan ipintzeko indar elektrikoaren kontra jo behar dugu. Bigarren karga hori bere amaierako posiziora eramateko energia eman beharko diogu, eta horixe da sisteman metatu dugun energia potentzial elektrikoa. Kalkulua, beraz, horrela garatuko dugu:

$$\Delta U_E = -\int_{\vec{r}_{hasiera}}^{\vec{r}_{amaiera}} \vec{F}_{elek} d\vec{r} = -\int_{\vec{r}_{hasiera}}^{\vec{r}_{amaiera}} K\frac{q_0 q_0'}{r^2}\hat{r} d\vec{r} = -\int_{\infty}^{d} K\frac{q_0 q_0'}{r^2} dr = -Kq_0 q_0' \int_{\infty}^{d} \frac{dr}{r^2} = K\frac{q_0 q_0'}{d}$$

Baina bi karga, edo haietariko bat, aske utziko bagenitu, energia hori zinetiko bihurtuko litzateke. Demagun q_0 karga aske utzi dugula. Beste kargatik urruntzen, energia potentziala murrizten eta zinetiko bihurtzen hasiko da:

$$\Delta E_z + \Delta U_E = 0 \Rightarrow \Delta E_z = -\Delta U_E = \int_{\vec{r}_{hasiera}}^{\vec{r}_{amaiera}} \vec{F}_{elek} d\vec{r} = \int_{\vec{r}_{hasiera}}^{\vec{r}_{amaiera}} K\frac{q_0 q_0'}{r^2}\hat{r} d\vec{r} =$$

$$= \int_{d}^{\infty} K\frac{q_0 q_0'}{r^2} dr = Kq_0 q_0' \int_{d}^{\infty} \frac{dr}{r^2} = K\frac{q_0 q_0'}{d}$$

Kargaren amaierako abiadura, beraz, hauxe izango da:

$$\Delta E_z = K\frac{q_0 q_0'}{d} \Rightarrow \frac{1}{2}mv^2 = K\frac{q_0 q_0'}{d} \Rightarrow v = \sqrt{2K\frac{q_0 q_0'}{md}}$$

3. POTENTZIAL ELEKTRIKOA

Orain arte ikusi dugunez, edozein karga edo karga-banaketa eremu elektriko baten iturria da, kargaren inguruetan sortzen dena. Eta eremu horrek eragina du beste edozein kargaetan, espazio eraldatu horretan sartzen badugu.

Egoera hori energiaren ikuspuntutik aztertzen badugu, eremuan sartutako kargaren energia potentziala erabiltzen dugu indar elektrikoaren ordez. Baina beste magnitude erabilgarriago bat definitzen ahal dugu: potentzial elektrikoa. Potentziala karga-iturriaren araberako funtzioa da. Eta beste q_0 partikula kargatu bat eremuan sartu eta eremuan zehar higitzen bada, q_0 kargaren energia potentzialaren aldaketa kalkula dezakegu potentzial funtzioa erabiliz, horrela:

$$U_E\left(\vec{r}_{amaiera}\right)-U_E\left(\vec{r}_{hasiera}\right)=q_0\left[V\left(\vec{r}_{amaiera}\right)-V\left(\vec{r}_{hasiera}\right)\right]\Rightarrow \Delta U_E=q_0\Delta V\Rightarrow$$
$$\Rightarrow \Delta V=\frac{\Delta U_E}{q_0}$$

non V potentzial funtzioa baita. Potentzialaren unitateak voltak (V) dira NSn.

3.1. Eremua eta potentziala

Potentzial-aldaketak karga-probarekiko askeak direnez, posible izan behar du eremu elektrikoan oinarrituz potentzial-funtzioa kalkulatzea. Kargaren desplazamendua oso txikia (diferentziala) bada:

$$\left.\begin{aligned} dU_E &= -\vec{F}_e d\vec{l} = -q_0\vec{E}d\vec{l} \\ dV &= \frac{dU_E}{q_0} \end{aligned}\right\}\Rightarrow dV=-\vec{E}d\vec{l}\Rightarrow \Delta V=-\int_{\vec{r}_h}^{\vec{r}_a}\vec{E}d\vec{l}$$

Beste lerro- integral bat dugu hemen.

Baina, askotan, ezagutzen dugun edota erabiltzen dugun magnitudea potentziala bera da. Eremuaren eta potentzialaren artean lotura zein den jakinda, nola kalkulatzen ahal dugu eremua? Horrela:

$$dV=-\vec{E}d\vec{l}\Rightarrow \vec{E}=-\frac{dV}{d\vec{l}}$$

Deribatu hori oso berezia da. $d\vec{l}$ desplazamendua eremuaren norabidekoa bada, beste norabideetan baino azkarrago aldatzen da potentziala. Eremu bektorial guztietan horrelako bektore berezia definitzen ahal dugu: gradiente- bektorea. Norabidea eta noranzkoa, eremuarenak dira. Norabide horretan gertatuko dira potentzial-aldaketarik handienak, eta gradientearen magnitudea da puntu bakoitzeko potentzial-aldaketarik handienaren balioa, hain zuzen. Beraz, eremu elektrikoa kalkulatzeko, potentzialaren gradiente-bektorea kalkulatu behar dugu[17]. Eta horrela adierazten dugu: $\vec{E} = -\nabla V$

Eremu elektriko batean potentzial- berean dauden puntuek gainazal-bereziak osatzen dituzte, gainazal-ekipotentzialak deritzenak. Aurrekoa kontuan hartuta, gainazal ekipotentzialak erabil daitezke eremu elektrikoaren ezaugarri nagusiak ezagutzeko (ikusi II.4 irudia).

Elektrostatikoaren aplikazioetan potentzialaren aldaketak dira garrantzitsuenak, eta ez puntu bakoitzeko potentzialaren balio zehatza. Arrazoia ulertzeko, grabitazioaren adibidea hartuko dugu kontuan berriro: lehenengo solairutik bosgarrenera igotzeko egin behar dugun ahalegina eta hamargarrenetik hamabosgarrenera igotzeko egin beharrekoa berdinak dira. Gauza bera gertatzen da elektrostatikoan,: garrantzitsuena dela puntu batetik beste batera iristeko kontsumitzen den energia- kopurua, eta ez hasieran eta amaieran dugun energia-kopuru osoa.

3.2. Partikula kargatuaren potentziala

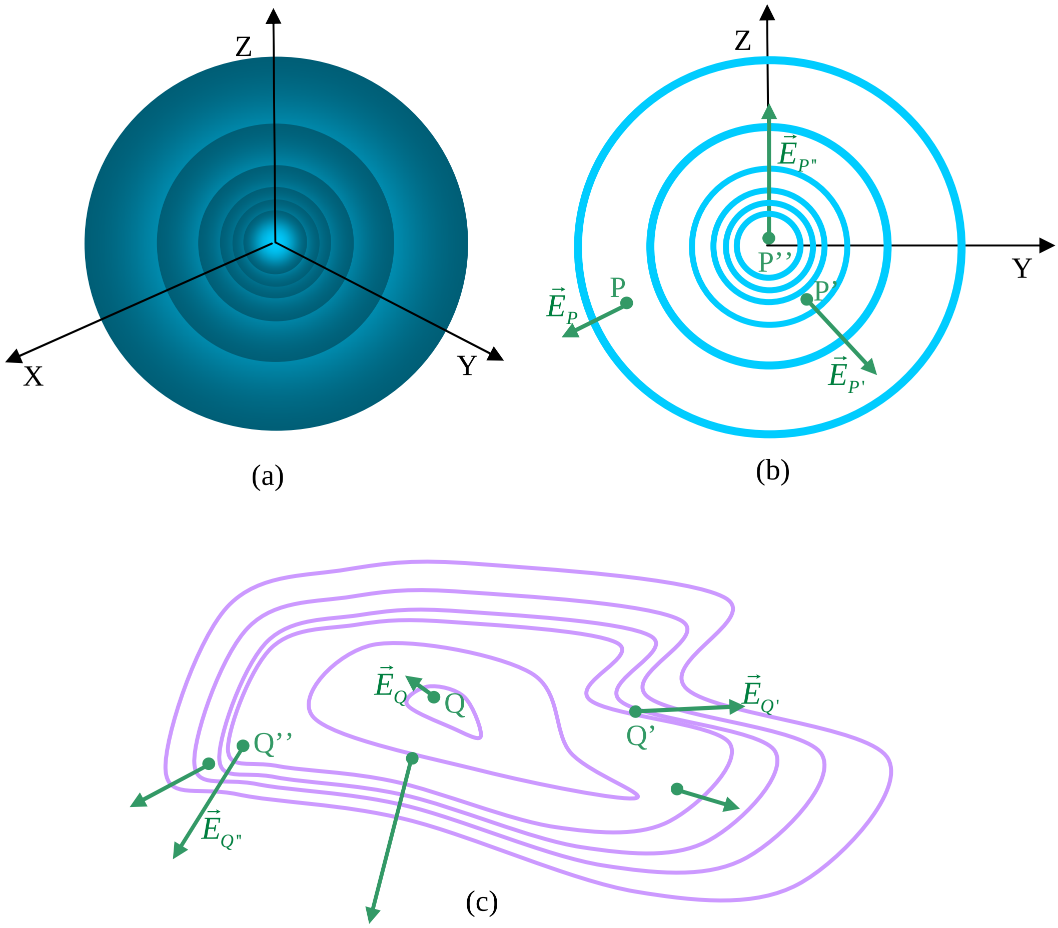
Zenbatekoa da q_0 karga puntual baten potentziala? Bere eremua ezaguna denez, potentzial funtzioa kalkulatuko dugu eremu hori erabiliz, hau da:

$$\Delta V = V(\vec{r}) - V(\vec{r}_{erref}) = -\int_{\vec{r}}^{\vec{r}_{erref}} \vec{E}d\vec{r} = -\int_{\vec{r}}^{\vec{r}_{erref}} K\frac{q_0}{r^2}\hat{r}d\vec{r} = -Kq_0\int_{r}^{r_{erref}} \frac{dr}{r^2} = K\left[\frac{q_0}{r}\right]_r^{r_{erref}} \Rightarrow V(r) = K\frac{q_0}{r}$$

non kontuan hartu baitugu elkarreragina nulua dela kargatik oso distantzia handietan, eta, ondorioz, potentziala ere bai. Potentzialaren erreferentzia gisa hartu dugu puntu hau: $r_{erref} = \infty$. Eta kargatik oso urrun dauden espazioko puntuetan potentzialaren balioa zero dela erabiliko dugu (ikusi 3.3. atala).

---

[17] *Gradientearen beste adibide bat plano topografikoak ditugu. Badakigu sestra-kurbek lurraren altuera adierazten dutela, eta metatzen diren tokietan malda handia dela, hau da, aldapa handia dagoela. Esaterako, mendi batera igotzeko, mapa aztertu ondoren, badakigu nondik doazen aldapa handietako ibilbideak. Ba horiexek dira gradiente- bektoreen norabide eta noranzkoak. Modulua aldaparen malda da. Geure kasuan, lurraren altueraren ordez, potentziala dugu. Potentzial-gradienteak, beraz, potentzial-aldaketaren balio maximoa eta zein norabidetan gertatzen den zehazten du.*



II.5.*irudia. Eremu-lerroak eta gainazal ekipotentzialak. (a) Karga puntual batetik distantzia berean dauden puntu guztietan potentzialak balio bera duenez, gainazal- ekipotentzialak esferak dira. (b) Haien sekzioa irudikatu ondoren, hobeto ikus dezakegu eremuaren norabidea eta modulua. Gainazalen arteko distantziarik laburrenak (malda handienak), adierazten du norabidea, kasu horretan, norabide erradiala. Eta zenbat eta handiagoa izan malda, orduan eta handiago da modulua ere. (c) Beste karga- banaketa baten gainazal- ekipotentzialen sekzioa.*

Orain, eremuaren norabidea bestelakoa da espazio-aldearen arabera.

Gainezarmen-printzipioa erabiliz, posiblea da beste edozein gorputz kargatuaren potentziala kalkulatzea emaitza horretan oinarrituta: gorputzean dauden karga puntual bakoitzeko potentzialen batura da. Dipoloaren kasuan, esaterako:

$$V(r) = V_+(r) + V_-(r) = +K\frac{q_0}{r_+} - K\frac{q_0}{r_-} = Kq_0\left(\frac{1}{r_+} - \frac{1}{r_-}\right)$$

non r+ eta r- karga positibotik eta negatibotik dauden distantziak baitira, hurrenez hurren.

3.3. Potentzial funtzioaren kalkulua

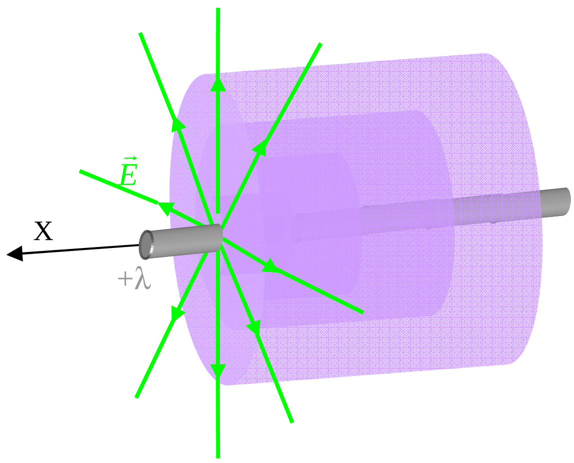
Aurreko gaian kalkulatu genituen eremuen potentzialak kalkulatuko ditugu orain, potentzial funtzioaren kalkuluan trebatzeko.

3.3.1.Hari kargatuaren potentziala

Eremua hauxe da: $\vec{E}(r)=\dfrac{\lambda}{2\pi r\varepsilon_0}\hat{r}$ (ikusi I.30 irudia). Beraz, potentzial funtzioa kalkulatzeko ibilbide integral bat garatu behar dugu:

$$\Delta V = V(\vec{r})-V(\vec{r}_{erref})=-\int_{\vec{r}}^{\vec{r}_{erref}}\vec{E}d\vec{l}=-\int_{\vec{r}}^{\vec{r}_{erref}}\frac{\lambda}{2\pi r\varepsilon_0}\hat{r}d\vec{l}\Rightarrow V(r)-V(r_{erref})=-\int_{r}^{r_{erref}}\frac{\lambda}{2\pi r\varepsilon_0}dr$$

Hau da, potentzial funtzioa hariarekiko zuta den r distantziaren mende dago. Gure arazoa indeterminazioa da: potentzial-diferentziaren eta eremuaren arteko erlazioa definitu dugunez, ezin dugu espazio-puntu bakoitzeko balio zehatza ezagutu, baizik eta bi punturen arteko diferentzia. Erabiltzeko, geuk aukeratuko dugu potentzialaren erreferentzia. Bestela esanda, espazio-puntu bati potentzialaren balio zehatz bat emango diogu, eta gero potentzial-diferentziak erabiliko ditugunez, balio horrek ez du eraginik izango emaitzetan.



II.6. *irudia. Hariaren gainazal ekipotentzialak: hariarekin ardazkideak diren zilindroak dira.*

Zein puntu aukeratu? Erosoena, jakina. Azter dezagun eskuratutako emaitza:

$$\Delta V = V(r) - V(r_{erref}) = -\int_{r_{erref}}^{r} \frac{\lambda}{2\pi r \varepsilon_0} dr = -\frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\int_{r_{erref}}^{r} \frac{dr}{r} = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\left[\ln(r_{erref}) - \ln(r)\right]$$

Logaritmo funtzioak zero balioa hartzen du r_{erref} = 1 bada, beraz, hauxe izango da geure erreferentzia: $V(r_{erref} = 1) = 0$. Ondorioz, potentzial funtzioa hauxe da:

$$\Delta V = V(r) = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\ln(r)$$

3.3.2. Esfera kargatuaren potentziala

Kasu horretan, bi espazio-alde bereizitu behar ditugu:

$$\vec{E} = \begin{cases} r \geq R \rightarrow \vec{E} = \dfrac{R^3 \rho}{3r^2\varepsilon_0}\hat{r} = K\dfrac{Q}{r^2}\hat{r} \\ r < R \rightarrow \vec{E} = \dfrac{r\rho}{3\varepsilon_0}\hat{r} \end{cases}$$

Hau da, eremua ez da bera gorputzaren barruan eta kanpoan, eta gauza bera gertatuko zaio potentzialari, jakina. Aurreko kasuan bezala garatuko dugu emaitza:

$$\Delta V = V(\vec{r}) - V(\vec{r}_{erref}) = \begin{cases} r \geq R \rightarrow -\displaystyle\int_{\vec{r}_{erref}}^{\vec{r}} \vec{E}d\vec{l} = -\int_{\vec{r}_{erref}}^{\vec{r}} K\frac{Q}{r^2}\hat{r}d\vec{l} \Rightarrow V_{kan}(r) - V_{kan}(r_{erref}) = -KQ\int_{r_{erref}}^{r}\frac{dr}{r^2} \\ r \leq R \rightarrow -\displaystyle\int_{\vec{r}_{erref}}^{\vec{r}} \vec{E}d\vec{l} = -\int_{\vec{r}_{erref}}^{\vec{r}} \frac{r\rho}{3\varepsilon_0}\hat{r}d\vec{l} \Rightarrow V_{bar}(r) - V_{bar}(r_{erref}) = -\frac{\rho}{3\varepsilon_0}\int_{r_{erref}}^{r} rdr \end{cases}$$

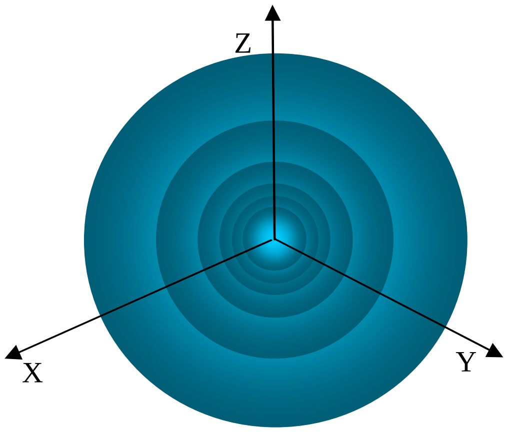
Potentzial-erreferentzia aukeratu behar dugu. Lehen bezala egingo dugu: erosoena erabiliko dugu. Esferatik kanpoko potentzial funtzioarekin hasiko gara. Emaitzaren arabera:

$$\Delta V_{kan} = V(r)_{kan} - V_{kan}(r_{erref}) = -KQ\int_{r_{erref}}^{r}\frac{dr}{r^2} = KQ\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_{erref}}\right)$$

Erreferentzia-punturik sinpleena r_{erref} = ∞ da, hau da, $V(r_{erref} = \infty) = 0$. Gauzak horrela, kanpoko potentziala: $V_{kan}(r) = \dfrac{KQ}{r}$

Orain barruko potentzial funtzioa kalkulatuko dugu:

$$V_{bar}(r)-V_{bar}(r_{erref})=-\frac{\rho}{3\varepsilon_0}\int_{r_{erref}}^{r} rdr=\frac{\rho}{6\varepsilon_0}\left(r_{erref}^2-r^2\right)$$



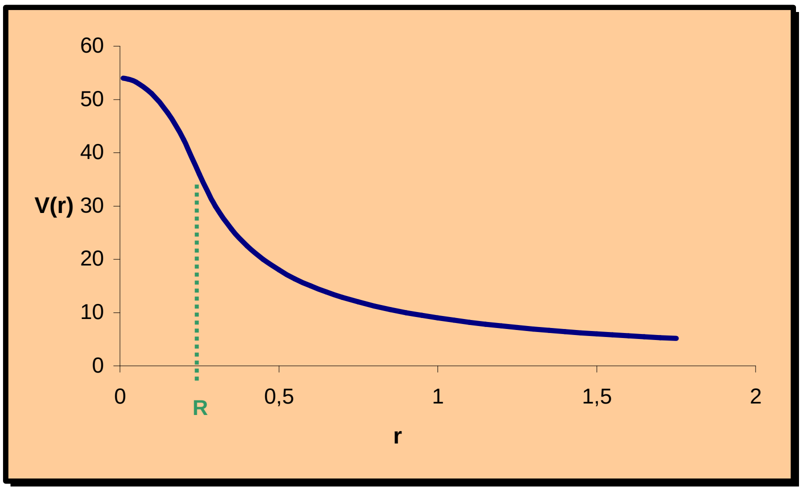
II.7.*irudia. Esfera kargatuaren gainazal ekipotentzialak. Karga puntualarenak bezalakoak dira: esferak.*

Baina ezin dugu nahi dugun erreferentzia hartu, potentzial funtzioak jarraitua izan behar duelako esferaren gainazalean. Horrek esan nahi du barruko potentzial funtzioa nahiz kanpokoa erabiliz gero, balio bera eskuratu behar dugula r = R puntuetan. Hori ziurtatzeko, kanpoko funtzioaren balioa gainazalean hartuko dugu erreferentzia: $V_{kan}(R)=\frac{KQ}{R}\Rightarrow V_{bar}(r_{erref}=R)=\frac{KQ}{R}$. Ondorioz:

$$V_{bar}(r)-V_{bar}(r_{erref}=R)=\frac{\rho}{6\varepsilon_0}\left(R^2-r^2\right)\Rightarrow V_{bar}(r)=V_{bar}(r_{erref}=R)+\frac{\rho}{6\varepsilon_0}\left(R^2-r^2\right)\Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{bar}(r)=\frac{KQ}{R}+\frac{\rho}{6\varepsilon_0}\left(R^2-r^2\right)=\frac{KQ}{2R}\left(3-\frac{r^2}{R^2}\right)$$

Funtzioaren gainazal ekipotentzialak irudikatzeaz gain (ikusi II.6 irudia), haren balioaren jokabidea irudikatzen ahal dugu distantziaren mende:

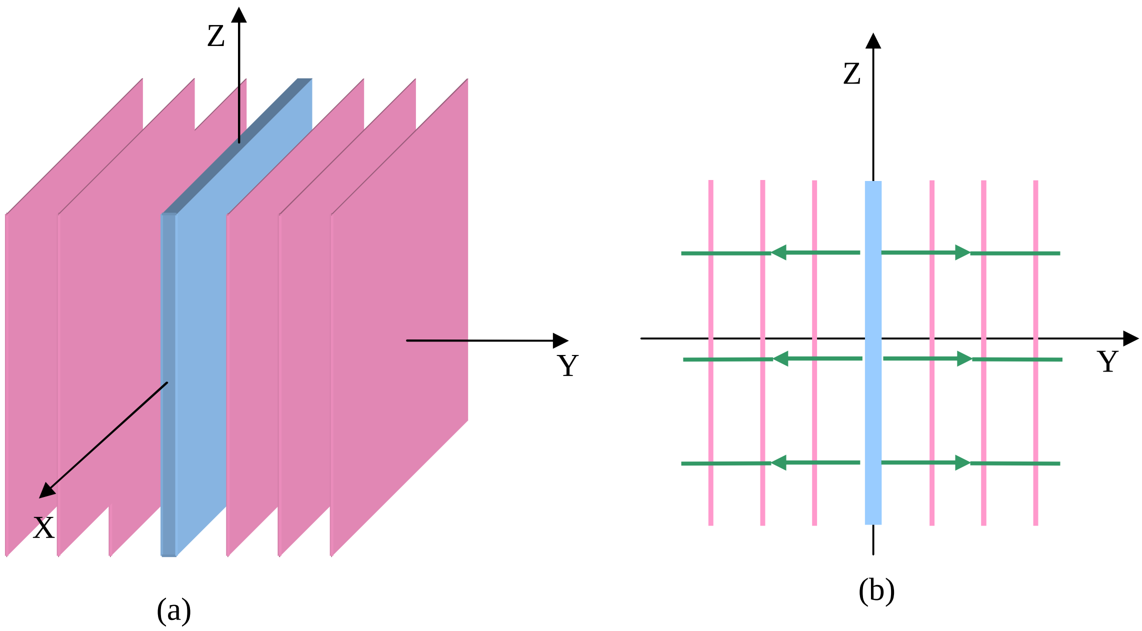


II.8.*irudia. Esferaren potentzial funtzioa distantziaren mende. Behin esferaren barruan, (hau da, r<R puntuetan), funtzioaren joera bestelakoa da, baina funtzioa bera jarraitua da.*

3.3.3.Xafla kargatuaren potentziala

Kasu horretan uniformea den eremu bat dugu: $\vec{E} = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}\hat{j}$. Potentziala, beraz, hauxe da:

$$\Delta V = -\int_{\vec{r}_{erref}}^{\vec{r}} \vec{E}d\vec{l} = -\int_{\vec{r}_{erref}}^{\vec{r}} \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\hat{j}d\vec{l} = -\frac{\sigma}{\varepsilon_0}\int_{y_{erref}}^{y} dy \Rightarrow V(y) - V(y_{erref}) = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}(y_{erref} - y)$$



II.9.*irudia. Xafla kargatuaren gainazal ekipotentzialak. Lauak dira, eta, eremua uniformea denez, distantziakideak era bai.*

Erreferentzia horrela hartuko dugu: $V\left(y_{erref}=0\right)=0$. Emaitza beraz, hauxe da:

$$V(y)=-\frac{\sigma}{\varepsilon_0}y$$

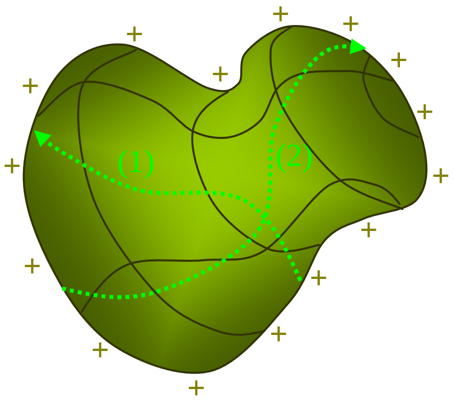
4.EROALEAK ETA DIELEKTRIKOAK

4.1. Eroaleak

Badakigu orekan dagoen eroale baten barruko eremua zero dela. Horren ondorioz, eroale baten bi puntutako potentzialek balio berdina dute:

$$\Delta V=-\int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}}\vec{E}d\vec{l}=0\Rightarrow V=kte$$

Horrek hainbat ondorio dakartza.



II.10.*irudia. Orekan dagoen eroale bat. Bi punturen arteko potentzial-diferentzia kalkulatzeko bi ibilbide irudikatu ditugu, baina, edozein ibilbide eta puntuak aukeratuta, emaitza bera lortuko dugu beti: zero. Hau da, gorputzaren zati guztietan potentzial bera dugu.*

4.1.1.4.1.2. Eroaleen puntak

Aurreko gaian ikusi genuen eroaleen karga gainazalean banatzen dela. Gainera, gainazaletik hurbil dauden espazioko puntuetan eremua ere kalkulatu genuen. Baina ezin genuen baieztatu karga- banaketa homogeneoa den.

Demagun I.11 irudian dugun eroalea kargatuta dagoela. Karga nola banatzen den hobeto ulertzeko beste eredu bat, sinpleagoa, erabiliko dugu: bi esfera, hari eroale baten bidez lotuta. Esfera eroaleen potentzialak kalkulatu ditugu:

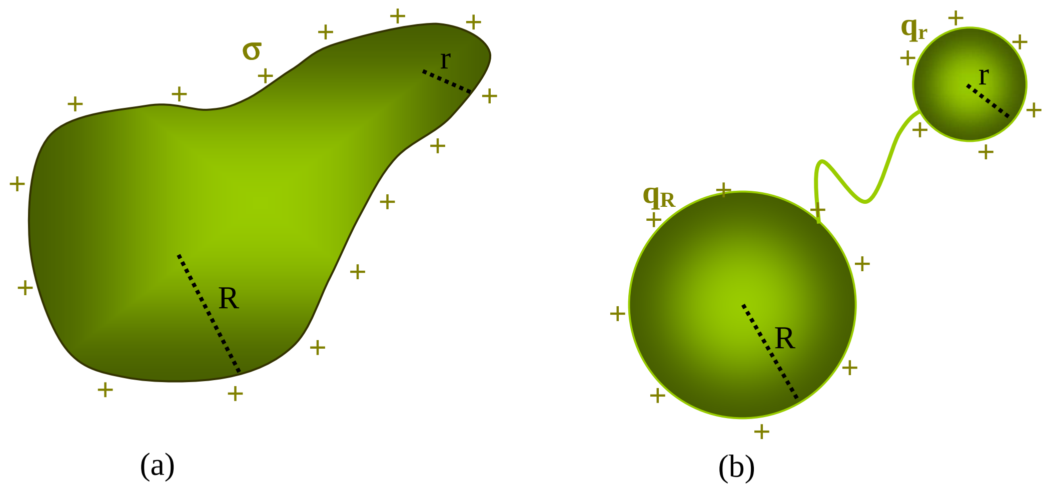
$$V(r)=K\frac{q_r}{r}; \qquad V(R)=K\frac{q_R}{R}$$

Eroalea orekan badago, V konstantea da, beraz:

$$V(r)=V(R)\Rightarrow\frac{q_r}{r}=\frac{q_R}{R}$$

Bestalde:

$$\sigma_r=\frac{q_r}{4\pi r^2}\Rightarrow q_r=4\pi r^2\sigma_r;\ \sigma_R=\frac{q_R}{4\pi R^2}\Rightarrow q_R=4\pi R^2\sigma_R$$



II.11.*irudia:. Orekan dagoen eroale bat: (a) eroale kargatuak mutur zorrotz bat du. (b) Egoera sinplifikatzeko bi esferekin ordezkatuko dugu eroalea. Batak, txikienak, mutur zorrotzari dagokio, besteak, gorputzaren beste aldeari. Hari eroale baten bidez lotuko ditugu biak.*

Emaitzak kontuan hartuta:

$$\frac{q_r}{r}=\frac{q_R}{R}\Rightarrow r\sigma_r=R\sigma_R\Rightarrow\frac{\sigma_r}{\sigma_R}=\frac{R}{r}$$

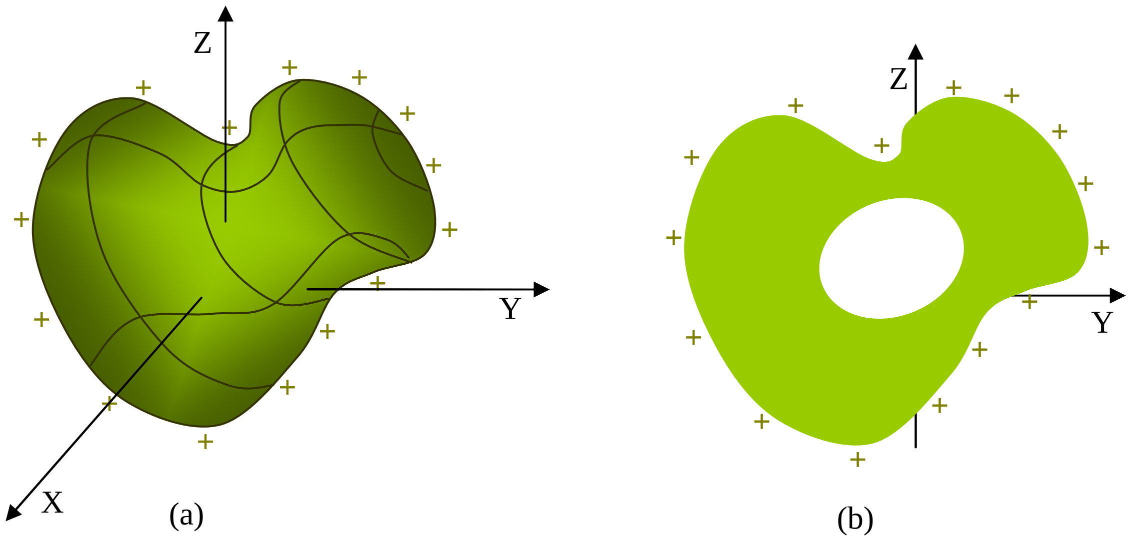
Beraz, karga-dentsitatea alde batzuetan beste batzuetan baino handiagoa da, eta, horren ondorioz, eremu elektrikoa indartsuagoa da alde horietan.

Efektu hori garrantzi handikoa da, punta zorrotza erabiliz oso eremu indartsuak ezartzea posiblea baita, nahiz eta potentzial txikiak erabili. Hain eremu indartsuak agertzen direnez, dielektriko-etendura gertatzen da. Hau da, eremuaren ondorioz dielektrikoa eroale bihurtu eta deskarga gertatzen da

4.1.2.Eroaleen barruko hutsuneko karga-banaketa

Askotan eroaleek hutsune bat edo batzuk dauzkate. Nahiz eta kargatuta egon edo karga-banaketa induzitua izan, barruko eremua zero da (orekan). Beraz, edozein gainazal itxiren barruan karga kopuru zero da. Eta karga ez da barruko gainazalean zehar banatzen.

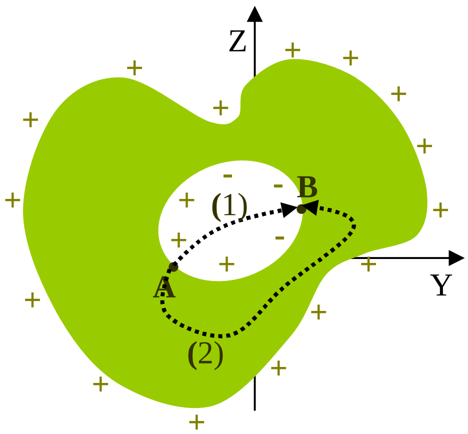
Zuzena da emaitza? Barruko karga zero izateak ez du esan nahi kargarik ez dagoenik. Adibidez, karga positiboaren eta negatiboaren kopuruak berdinak izan daitezke eta, horren ondorioz, inguratutako karga zero izango litzateke. Gerta daiteke horrelakorik?



II.12.*irudia. Hutsunea duten eroaleen karga-banaketa:. (a) kanpotik ikusita. (b) Eroalearen sekzioa irudikatuz gero, barruko hutsune bat duela ikus dezakegu. Karga osoa kanpoko gainazalean banatzen da, ez dago karga- dentsitaterik barruko (ala hutsuneko) gainazalean.*

Potentzial-diferentzia aztertuz ezetz ondorioztatzen dugu. Bi punturen arteko potentzial-diferentziak balio finkoa duenez, edozein ibilbide erabilita kalkulu integralaren emaitzek berdinak izan behar dute, eta ez da horrela gertatzen aurreko hipotesian. II.12 irudiko ibilbideak erabiltzen baditugu honako hau ondorioztatzen dugu:

$$(1) \rightarrow V_B - V_A \neq 0$$
$$(2) \rightarrow V \textit{ ktea da bolumen osoan} \Rightarrow V_B - V_A = 0$$



II.13.*irudia. Potentzial-diferentzia kalkulatzeko bi ibilbideak. Demagun barruko gainazalean karga- banaketa bat sortu dela, baina karga kopuru garbia zero dela,; horrela, Gaussen legea betetzen da eroalearen barruan. A eta B-ren arteko potentzial-diferentzia kalkulatzeko (1) eta (2) ibilbideak aukeratu ditugu. Emaitza bera lortu behar dugu biak erabiliz gero. Eta eremua ezberdina da hutsunean eta eroalean. Hutsunean ez da zero izango.*

Beraz, eroaleen barruko eremua beti da zero, nahiz eta kanpoan eremu elektriko bat egon. Estalketa-fenomeno hori oso aplikazio garrantzitsuetan erabiltzen da[18].

4.2. Dielektrikoak

Badakigu zein den eremu baten eragina dielektriko batean: polarizazioa dela eta, eremu elektriko induzitua sortzen da eta dielektrikoaren barruko eremua murrizten da. Urritze-faktorea ε_r da, non ε_r konstantea materialaren berezko konstantea baita.

Eremuaren eta potentzialaren arteko erlazioa kontuan hartuta, potentziala era berean murrizten dela ezan dezakegu:

---

[18] Kontuan hartu behar dugu barruko eremua zero dela, baina, ez kanpoko eremua eroalearen barruan sartu ezin delako, baizik eta eroalearen kargak era berezi batean banatzen direlako. Eroalean kanpoko eremuak sortzen duen karga-banaketak beste eremu elektrikoa bat sortzen du, kanpokoa deuseztatzen duena.

$$\Delta V_{diel} = -\int_{\vec{r}_h}^{\vec{r}_a} \vec{E}_{diel} d\vec{l} = -\int_{\vec{r}_h}^{\vec{r}_a} \frac{\vec{E}}{\varepsilon_r} d\vec{l} = \frac{1}{\varepsilon_r}\left[-\int_{\vec{r}_h}^{\vec{r}_a} \vec{E} d\vec{l}\right] = \frac{\Delta V}{\varepsilon_r}$$

ERANSKINA: ENERGIA ZINETIKOA, INDAR KONTSERBATZAILEAK ETA ENERGIA POTENTZIALA

ENERGIA ZINETIKOA ETA LANA

Elkarrekintzak eta haien ondorioak aztertzeko beste magnitude bat erabiltzen dugu maiz: energia. Adibidez: zer egiten dugu higitzen ari den sistema bati bultza egitean? Energia ematen diogu, higidurarekin lotuta dagoen energia areagotzen dugu. Edota zer egin behar dugu geldirik dagoen sistema bat martxan ipintzeko? Energia sistemari eman!

Higidurarekin erlazionatuta dagoen energia mota bat dugu: energia zinetikoa, eta bere balioa da: $E_z = \frac{1}{2}mv^2$. Hau da, masa nahiz abiaduraren karratua eta energia zinetikoa proportzionalak dira. Zenbat eta handiagoa izan masa edota abiadura, orduan eta energia zinetiko gehiago du sistemak; eta energia gehiago (hau da, bultzada indartsuagoa) eman behar izan diogu sistemari egoera horretara iristeko.

Baina, nola erlazionatu sistemaren gainean egin dugun indarra eta sistemari emandako energia? Indarrak egindako W lana definituko dugu; hau da, indarraren bidez sistemari emandako energia kalkulatuko dugu. Energia hori, sistemaren energia- aldaketa izango da, beraz:

$$W = \Delta E_z = \frac{1}{2}mv_a^2 - \frac{1}{2}mv_h^2$$

Eta lana bera, nola kalkulatu? Pentsa dezagun zer gertatzen den fardel oso handi bat arrastaka daramagula. Ez da gauza bera metro erdia eta 10 metro ibiltzea! Energia gehiago behar du ibilbide luzeagoa osatzeko. Bestalde, egiten dugun indarrak ere badu garrantzia: nahiz eta oso indar handia egin, zoruarekiko zuta bada ez dugu lortuko fardela higitzea, eta, zenbat eta horizontalagoa izan, orduan eta hobeto aprobetxatuko dugu ahalegina. Fardelaren energia zinetikoaren aldaketa kalkulatzeko kontuan hartu behar dugu ibilbidearen luzera, indarraren magnitudea eta haien arteko norabide erlatiboak. Eta hori guztia da, hain zuzen, biderketa eskalar bat, non bektoreak indarra eta desplazamendu-bektoreak baitira:

$$W = \int_{\vec{r}_{hasiera}}^{\vec{r}_{amaiera}} \vec{F} d\vec{r} = \Delta E_z$$

Hemen integrala erabili dugu kasu orokor batean, fardela aurrera doala, bektore bat edo biak alda daitezkeelako. Orduan, ibilbidea indar konstanteko zatietan banatu, zatitxo bakoitzean lana kalkulatu, eta batu egin beharko dugu.

INDAR KONTSERBATZAILEAK. ENERGIA POTENTZIALA.

Lana definitu dugunaren arabera, sistemek elkarreraginen bidez trukatzen duten energia ez dago bakarrik indarraren mende, baizik eta ibilbidearen mende ere bai. Demagun sistema batek jasaten duen marruskaduraren lana kalkulatzen ari garela. Kasu horretan, marruskadurak ez dio sistemari energia ematen, baizik eta hartu egitzen dio. Hori dela eta, sistemak gero eta motelago dabiltza bultzatzen ez badituguI Hau da, marruskadurak egindako lana negatiboa da beti. Ondorioz, zenbat eta ibilbide luzeagoa osatu, orduan eta energia gutxiago izango du sistemak. Nahiz eta hasierako posiziora itzuli, sistemak ez du berreskuratuko joatean eta etortzean galdu duen energia.

Baina horrelakorik ez da beti gertatzen. Indar berezi batzuen lana kalkulatzen badugu, konturatzen gara, hasierako posiziora itzulita, egindako lan orokorra zero dela. Edo bestela esanda, nahiz eta zenbait ibilbidetan ibili, hasierako eta amaierako puntuak berdinak badira indarraren lana berdina izango da! Horrek adierazten du indar horien lana ez dagoela sistemak osatutako ibilbidearen mende, baizik eta elkarreragina duten sistemen arteko posizio erlatiboaren mende bakarrik.

Emaitza hori kontuan hartuko dugu beste energia mota bat definitzeko: elkarrekintza batzuen mende, sistemek posizioarekin zerikusia duen energia bat dute. Adibidez, Lurretik hurbil dauden sistemek urrun daudenek baino horrelako posizio-energia gehiago dute, eta mahai gainean dagoen arkatz batek zoruan dagoen beste batek baino gehiago.

Energia hori potentziala dela esaten dugu. Mahai gainean dagoen arkatza erortzen hasiko balitz, energia potentziala murriztu eta zinetiko bihurtuko litzateke. Hau da, mahaira igotzeko arkatzari eman diogun energia potentzial gisa metatuta geratu da, eta gero, zinetiko bihurtu da. Energia potentziala kalkulatzeko, beraz:

$$\Delta U_E = -\Delta E_z = -\int_{\vec{r}_h}^{\vec{r}_a} \vec{F}_{kon} d\vec{r}$$

INDAR ELEKTRIKOA, INDAR KONTSERBATZAILERA?

Aurreko emaitza kontuan hartuko dugu indar elektrikoa kontserbatzailera dela frogatzeko. Lehen aipatu dugunez, horrela izango balitz, ibilbide itxi bat osatu ondoren, zero izango litzateke eremu elektriko baten barruan higitzen ari den karga puntual batek duen energia potentzialaren aldaketa:

$$\oint \vec{F}_{elek} d\vec{r} = 0\,?$$

Demagun eremu elektrikoa beste karga puntual batek sortutakoa dela. Horrela, gainezarmen-printzipioa dela eta, emaitza zabal dezakegu edozein eremutara. Kalkulua garatuko dugu:

$$\oint \vec{F}_{elek} d\vec{r} = \oint K \frac{q_0 q_0^{'}}{r^2} \hat{r} d\vec{r} = K q_0 q_0^{'} \oint \frac{dr}{r^2} = K q_0 q_0^{'} \left[\frac{1}{r} \right]_{has}^{ama} = 0$$

Beraz, ondorioztatu dugu indar elektrikoa kontserbatzailea dela.

III KONDENTSADOREAK

1. SARRERA

Elektrostatikan aplikazio handikoa den gailuetariko bat kondentsadorea da eta haren funtzioak aztertuko ditugu orain.

Aurreko gaian ikusi dugunez, sistema batean karga metatuz energia metatzen dugu, energia potentzial elektrikoa, hain zuzen. Beraz, geroago erabiliko dugun energia gordetzeko beste aukera egoki bat da. Eta kondentsadoreak funtzio hori betetzeko erabiltzen diren gailuak dira.

Kondentsadoreak ia edozein gailu elektrikotan, makinatan eta mota guztietako zirkuituetan erabiltzen dira, bai industria arloan (motor elektrikoen abio-kontrolean, sare telefonikoetan…) bai eguneroko bizitzan (argazki-makinen flashetan, korronte alternoko gailu elektrikoetan, autoen pizte-sistemetan, irratia eta telebista sintonizatzeko…). Horretaz gain, gailu elektriko anitzen iragazkiaren edota seinale-anplifikadoreen osagaiak dira.

Abantailak eta desabantailak dituzte. Desabantailen artean, metatzen ahal dugun energia kopurua txikia dela azpimarratu behar dugu. Kargak pilatzen hasten denean, kargen arteko indarren magnitudea oso handia bada deskargak eta txinpartak gerta daitezke. Metatu nahi den energia kopurua handia bada, hobe da urtegiak erabiltzea (energia potentzial grabitatorioa), adibidez. Edota, energiak elektrikoa izan behar badu, metagailuak eta bateriak.

Abantailak, ordea, eraginkortasuna eta inertzia txikiak dira. Hau da, energiaren galerak oso txikiak dira, 10^5-etik bat askotan, gutxi gorabehera, eta metatutako energia azkar berreskuratzen da (elektroiak bakarrik higitzen direlako). Azken ezaugarri hori funtsezkoa da mikrosegundoko abiaduraz funtzionatzen duten gailuetan.

Hori guztia ikusita, nola gauzatuko dugu kondentsadorea? Badakigu karga metatzen duen gorputz batek energia metatzen duela, beraz, kondentsadore bat izan daiteke. Baina arazo bat gainditu behar dugu: gorputz bakoitzak karga -kopuru zehatz bat metatzen ahal du. Kopuru hori baino gehiago metatuko bagenu, eremu elektrikoa oso indartsua izango litzateke, eta inguruneko dielektriko-etendura gertatuko litzateke. Hau da, sistemaren deskarga gertatuko litzateke. Arazoa saihesteko eta karga (energia) gehiago gordetzeko, gorputzaren tamaina handitu behar dugu, baina horrela egingo bagenu, ezingo genuke kondentsadorea erabili zirkuitu miniaturizatuetan.

Ezin dugu sistema hobetu? Konponbidea kontrako zeinuko karga duen beste eroale bat erabiltzea da: demagun gorputz kargatu bat dugula, q kargarekin. Karga -kopururik handiena metatu ondoren beste gorputz kargatu bat hurbildu diogu, baina bigarren gorputzak kontrako karga du. Horrela bada, haien arteko espazioaren potentziala gutxitu, eta karga gehiago metatzen ahal dugu[19] bietan, dielektriko-etendura sortu gabe.

Hori dela eta, bi eroale aurrez aurre ipiniz gauzatzen dira kondentsadoreak. Sistema kargatzeko, karga eroale batetik bestera lekualdatzen dugu, kargei energia emanez, jakina. Energia potentzial elektriko gisa gordetzen dugu kondentsadorean emandako energia

2. KAPAZITATEA

Beraz, esan dugunaren arabera, aurrez aurre dauden bi eroalez osatutako gailu bat da kondentsadorea. Eta kondentsadore horren eroale bakoitzean karga metatzen, energia pilatzen dugu.

Baina kondentsadoreetan konfigurazioak (eroale motak eta tamainak, haien arteko distantziak…) zerikusi handia du gailuaren energia metatzeko gaitasunarekin. Zergatik? Kondentsadorea kargatzeko kargei energia eman behar zaie, bestela, ezin dute jo ezarritako eremuaren kontra. Baina bi eroaleen artean dagoen eremua desberdina da konfigurazioaren arabera: nahiz eta bi gorputzek Q karga -kopuru bera izan, karga-banaketa ezberdina bada sortzen duen eremua ere oso bestelakoa da.

Beraz, karga- kopuru bera eroale batetik bestera lekualdatzeko beharrezkoa den energia ez da izango berdina. Eta horren ondorioz, karga- kopuru bera metatu arren, kondentsadoreek ez dute gordetzen energia- kopuru berdina. Edo alderantziz.

[19] *Zergatik? Metatutako energia, bildutako karga- kopuruaren nahiz gainditu behar duen potentzial -diferentziaren mende dagoelako:* $\Delta U_E(q_0) = q_0 . \Delta V$. *Beraz, bi faktore hartu behar ditugu kontuan.*

Zein izango dira eraginkorrenak? ΔV potentzial- diferentzia jakin batean karga- kopururik handiena metatzen dutenak. Karga- kopurua eta potentzial-diferentzia proportzionalak dira, eta kondentsadore bakoitzaren proportzional-tasun- konstantea desberdina da:

$$Q = C.\Delta V \Rightarrow C = \frac{Q}{\Delta V}$$

non Q metatutako karga eta ΔV eroaleen arteko potentzial-diferentzia baitira. Hau da, konstante hori kondentsadoreen berezko ezaugarria da. Kapazitatea deritzo eta NSn farad-a (F) da unitatea. Farad bat oso kapazitate handia da,; kondentsadore arruntek μF edota pF-ko kapazitateak dituzte. Eta super kondentsadoreek mF-ko kapazitateak.

Hasieran ikusi dugunez, eroale kargatu bat kondentsadore bat izan daiteke. Kasu horietan ere kapazitate kontzeptua erabiltzen da, bigarren eroalea infinituan kokatu dugula kontuan hartuz.

2.1. Adibidea: xafla paralelodun kondentsadorearen kapazitatea

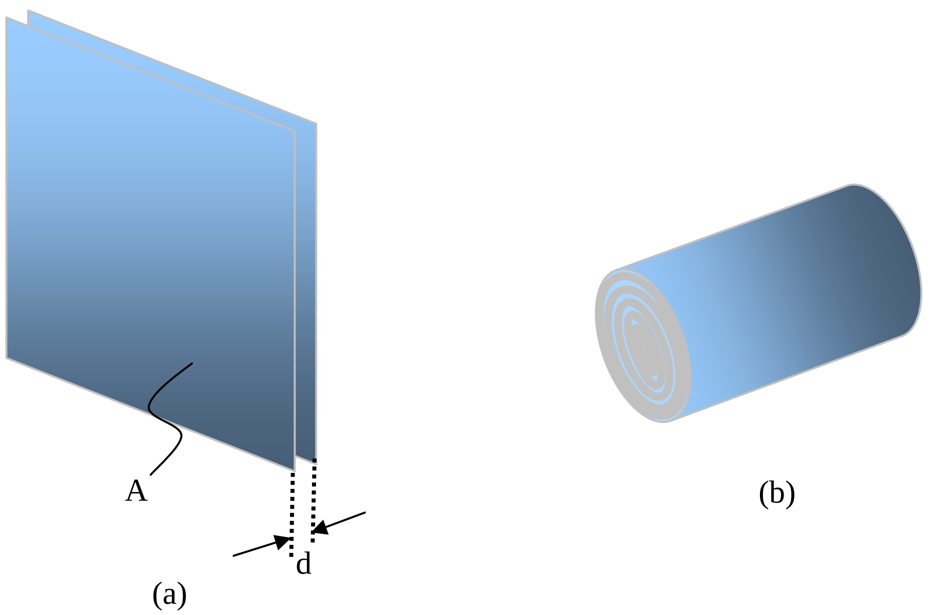
Horixe da konfiguraziorik arruntena. Kasu horietan, eremua eta xaflen arteko tentsioa ezagutzen ditugu, aurreko ataletan kalkulatu ditugulako. Balioak hauexek dira:

$$\vec{E} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\hat{i}; \Delta V = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}d$$

non d plaken arteko distantzia eta σ bakoitzaren karga-dentsitatea baitira. Beraz, kapazitatea hauxe da:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{\sigma.A}{\sigma d/\varepsilon_0} = \frac{\varepsilon_0 A}{d}$$

A xaflen azalera da. Eta kapazitatea geometriaren mende dago. Horren ondorioz, xaflen gainazala zenbat eta handiagoa izan, edota haien arteko distantzia zenbat eta txikiagoa, orduan eta handiagoa izango da kapazitatearen balioa. Dena dela, faktore horiek ez ezik, kondentsadorearen tamaina ere kontuan hartu behar dugu, aplikazio guztietan osagaiek txikiak izan behar dutelako.



III.1. *irudia:. Xafla paralelodun kondentsadorea. (a) Kondentsadoreen xaflak oso handiak dira haien arteko distantziarekin alderatuta; (b) bolumen txikiagoak betetzeko, xaflak biribiltzen dira.*

2.2. Adibidea: kondentsadore zilindrikoa

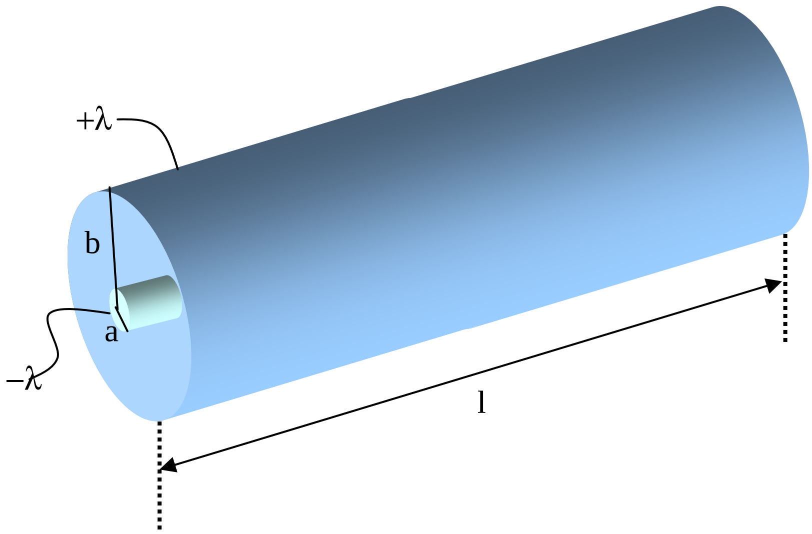
Kondentsadore zilindrikoa hari batezk eta ardazkidea den metalezko geruza zilindrikoz osatuta dago. Bere luzera diametroa baino askoz handiagoa bada, kontuan hartzen ahal dugu luzera infinitua dela eta aurreko gaietan ondorioztatu ditugun emaitzak erabil ditzakegu.

Sistemaren ardatzetik r distantziara dagoen puntu bateko eremua hauxe da: $\vec{E}=\dfrac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r}\hat{r}$, eta hariaren eta geruzaren arteko potentzial-diferentzia $\Delta V=\dfrac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\ln\dfrac{b}{a}$ da, non λ karga- dentsitatea luzera- unitateko, a hariaren erradioa eta b geruzarena baitira (ikusi III.2 irudia).

Kapazitatea, beraz, hauxe da:

$$C=\frac{Q}{\Delta V}=\frac{\lambda l}{\dfrac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\ln\dfrac{b}{a}}=\frac{2\pi\varepsilon_0 l}{\ln\dfrac{b}{a}}$$

Eta kapazitatea luzera-unitateko: $\dfrac{C}{l} = \dfrac{2\pi\varepsilon_0}{\ln\dfrac{b}{a}}$



III.2. *irudia. Kondentsadore zilindrikoa. Kondentsadorearen itxura-eskema. Barruko haria, a erradioa duena, eta kanpoko gainazala, hariaren kontrako kargarekin.*

Hau da, kapazitatea luzeraren eta erradioaren mende dago. Hari ardazkideak mota horretako kondentsadoreak dira: eroale bakoitzean korronteak kontrako noranzkoan dabiltzanez, kondentsadore zilindrikotzat har ditzakegu. Eremuak estaltzen dituenez, oso erabiliak dira transmititzen duten seinalea kanpoko seinale elektrikotik babesteko.

3. ASOZIAZIOA

Ikusi dugunaren arabera, kondentsadore baten kapazitatea diseinuak mugatzen du, eta oso zaila da kapazitatearen balioa mF baino handiagoa izatea. Baina, batzuetan, ekoizleek eskaintzen dizkiguten balioak baino handiagoak behar ditugu. Zer egin dezakegu kasu horietan?

Konponbidea kondentsadore batzuk erabiltzea da. Haien arteko lotura gauzatzeko bi era daude: paraleloan eta seriean.

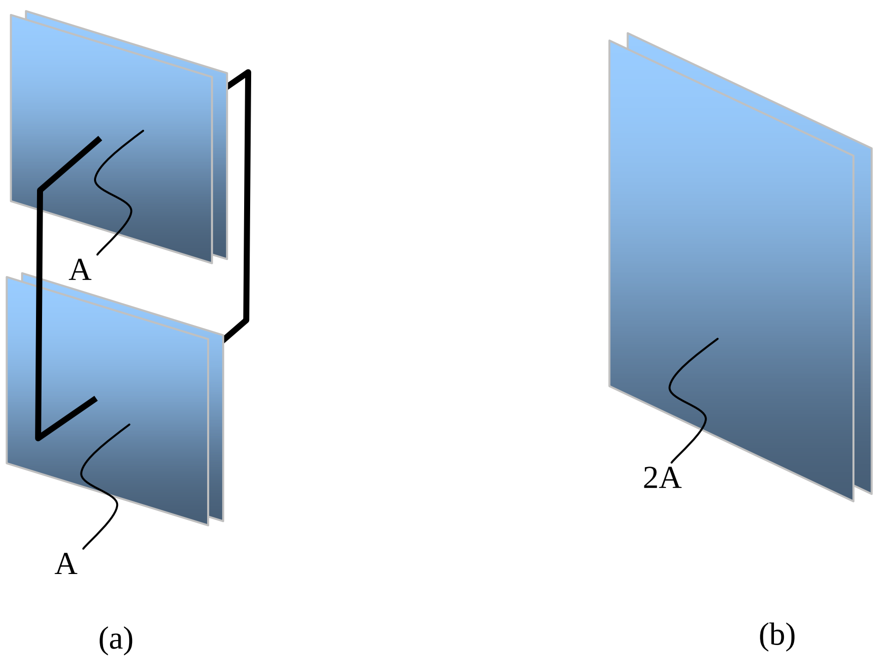
3.1. Paraleloan

Elkar ukitzen dauden bi eroalek eroale bakar bat balira bezala jokatzen dute. Beraz, lortzen dugun kondentsadore baliokideak gainazal handiagoko xaflak ditu (ikusi III.3 irudia) eta, horren ondorioz, kapazitate baliokidea hauxe da:

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 A_1}{d}; C_2 = \frac{\varepsilon_0 A_2}{d}$$

$$C_{bal} = \frac{\varepsilon_0 \left(A_1 + A_2\right)}{d} = C_1 + C_2$$

Kasu orokorrean: $C_{bal} = \sum_{i=1}^{n} C_i$. Kapazitate baliokidea kapazitateen batura da. Eta beti izango da osagaien kapazitaterik handiena baino handiagoa.



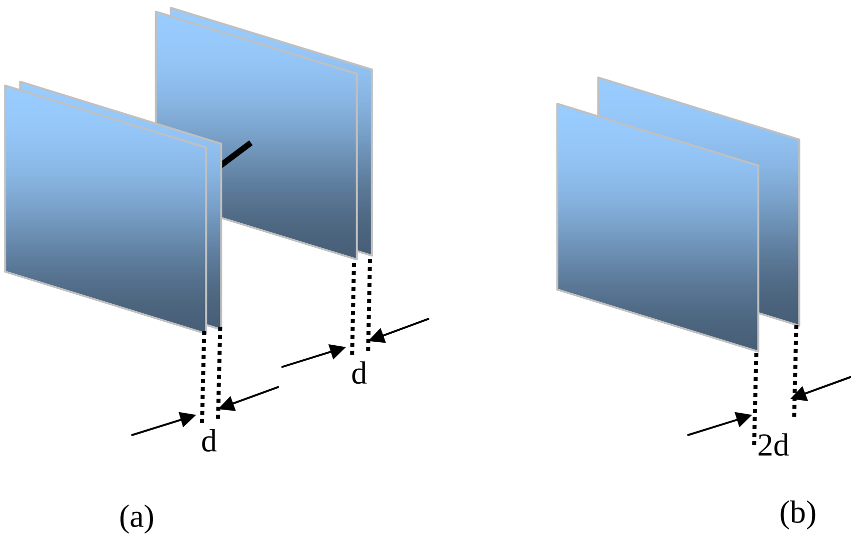
III.3. *irudia. Paraleloan dauden bi kondentsadore. (a) Kondentsadore bakoitzaren xaflak lotu ondoren, (b) gainazal handiagoko xaflak dituen kondentsadore bat izango balitz bezala jokatuko du sistemak.*

3.2. Seriean

Irudian ikusten den bezala, seriean dauden bi kondentsadoreek xaflen arteko distantzia handiagoa duen beste kondentsadore bakar bat balira bezala jokatzen dute.

Horren ondorioz, kapazitate baliokidea:

$$\left.\begin{array}{r} C_{bal} = \dfrac{\varepsilon_0 A}{d_1 + d_2} \\ C_1 = \dfrac{\varepsilon_0 A}{d_1};\, C_{bal} = \dfrac{\varepsilon_0 A}{d_2} \end{array}\right\} \Rightarrow \frac{1}{C_{bal}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$



III.4. *irudia. Seriean dauden bi kondentsadore. (a) Seriean konektatzeak eta (b) plaken arteko distantzia handitzeak eragina bera dute.*

Eta kasu orokorrean: $\dfrac{1}{C_{bal}} = \displaystyle\sum_{i=1}^{n} \dfrac{1}{C_i}$. Kapazitatea beti izango da erabilitako osagaien kapazitaterik txikiena baino txikiagoa.

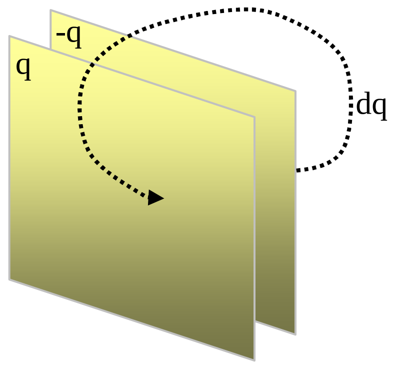
4. KONDENTSADOREETAN METATUTAKO ENERGIA

Zein da kondentsadore batean metatutako energia kopurua? Jakiteko, kargak lekualdatzeko egindako lana kalkulatuko dugu. Beraz, demagun aldiune batean kondentsadorearen karga q(t) dela, eta dq karga lekualdatzeko egin behar den lana kalkulatuko dugu.

Kondentsadorean dagoen q karga- kopurua kontuan hartuta, badakigu zenbatekoa den plaken arteko ppotentzial-diferentzia: $\Delta V = \frac{q}{C}$. Beraz, egoera horietan dq karga puntual bakoitzari eman beharko diogun energia hauxe da: $dU_E = \Delta V dq$. Karga-prozesu osoan metatuko den energia integrazioaren bidez kalkula dezakegu:

$$\left.\begin{array}{l} dU_E = \Delta V dq \\ q = C\Delta V \end{array}\right\} \Rightarrow dU_E = \frac{q}{C}dq \Rightarrow U_E = \int_0^Q \frac{qdq}{C} = \frac{1}{2C}Q^2$$

non Q kondentsadorearen amaierako karga baita.



III.5. *irudia. Kondentsadore baten karga- prozesuen eskema. Kondentsadorean q karga dago, eta dq karga puntuala plaka batetik bestera lekualdatuko dugu karga-prozesua osatzeko, hau da, amaierako Q karga plaka bakoitzean lortzeko.*

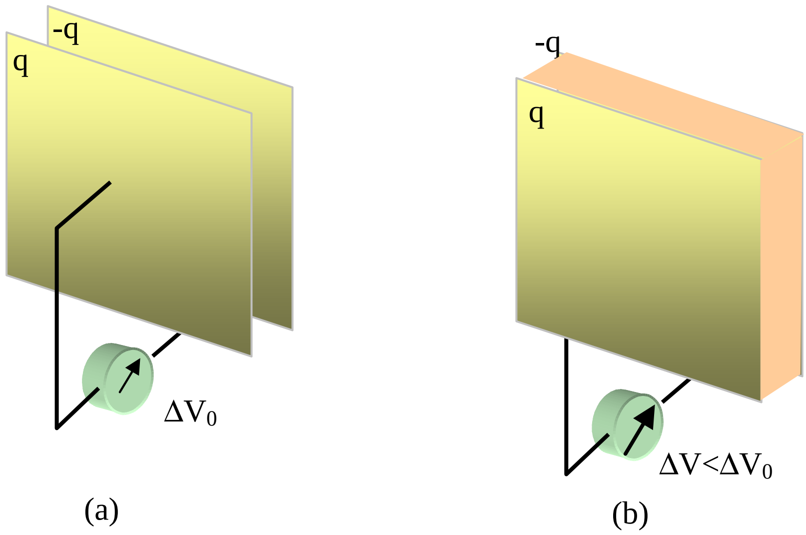
Bestalde, kargaren eta potentzialaren arteko lotura erabiliz, hainbat formula erabiltzen ahal ditugu:

$$U_E = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2}QV = \frac{1}{2}CV^2$$

5. DIELEKTRIKODUN KONDENTSADOREAK

Kondentsadore baten xaflen artean ingurune dielektrikoa dugu: airea. Baina, zer gertatzen zaio kondentsadoreari xaflen artean beste dielektriko mota bat kokatzen badugu?

Dielektrikoen jokabidea ondo dakigu: kondentsadore baten barruko eremu elektrikoan sartu ondoren, polarizatu, karga-banaketa induzituak agertu eta eremu erresultantea airean genuena baino ahulagoa da. Beraz, dielektrikoak plaken arteko espazio osoa betetzen badu, kondentsadorearen tentsioa murriztuko da. Neurketa esperimentala gauzatu ondoren, hipotesia betetzen duela ondorioztatzen dugu.



III.6.*irudia:. (a) Kondentsadore bat dielektrikorik gabe eta isolatuta, eta (b) dielektrikoa sartu ondoren. Tentsioa murriztu egin da.*

Nahiz eta tentsioa murriztu, metatutako karga ez da aldatu, eta horrek ondorio hau dakar: kondentsadorearen kapazitatea aldatu egin da, orain handiagoa da. Dielektrikoa sartuta, karga gehiago metatzen ahal dugu hasierako ΔV_0 tentsiora iritsi arte. Kapazitate berriaren balioa hauxe da:

$$\left.\begin{array}{r} \Delta V' = \dfrac{\Delta V_0}{\varepsilon_r} \\ C = \dfrac{Q}{\Delta V_0};\, C' = \dfrac{Q}{\Delta V'} \end{array}\right\} \Rightarrow C' = \frac{Q}{\Delta V_0}\varepsilon_r = \varepsilon_r C$$

Hau da, materialaren ε_r konstante dielektrikoko proportzioan handitu da. Beraz, dielektrikodun kondentsadore baten kapazitatea horrela adierazten ahal da:

$$C' = \varepsilon_r C = \varepsilon_r \frac{\varepsilon_0 A}{d} = \frac{\varepsilon A}{d}$$

Airean: ε_r = 1. Emaitza horrek eragina handia du kondentsadore-diseinuan, kapazitatea handitzeko beste era bat dugu eta: konstante dielektriko handia duen material bat erabiltzea. Funtzio hori betetzeko material zeramikoak oso erabilgarriak dira. Antzinako kondentsadoreetan, dielektrikoa paper- parafinadun xafla bat zen, baina, edozein kasutan, bai zeramikoa, bai papera bi metalezko xaflen artean kokatzen da, eta gero hiru geruza biribiltzen dira batera bata bestearen gainean (horrela, kondentsadorearen tamaina txikia delako). Beste kondentsadore mota bat zeramikozko geruza anitzeko kondentsadorea da. Kasu horietan sistema ez da biribiltzen, eroalearen eta isolatzailearen geruzak bata bestearen atzetik kokatzen dira. Dena dela, gehienezko tentsioak mugatzen du kondentsadorearen erabilera: tentsio handiak erabiltzen badira, dielektrikoaren etendura gerta daiteke-eta.

Tentsio txikietan kapazitate handiko kondentsadoreak beharrezkoak direnean, elektrolitikoak dira erabilgarrienak. Kondentsadore horietan, soluzio elektrolitiko batek betetzen du paperezko eta metalezko xaflen arteko espazioa. Potentzial-diferentzia ezartzean, bi eroaleren artean oxido-geruza bat sortzen da, eta, horrela, oso mehea den dielektriko bat dugu plaken artean. Gainera, eroaleen gainazala tratatuta dago arraildura sakonak sortzeko, eta eroalearen gainazala handiagoa izan dadin. Oxido-geruzaren lodiera 10^{-8} m-koa izan daiteke, eta kondentsadore elektrolitikoen kapazitateak 10Vetan 1000μF izan daitezke, oso handiak, beraz. Harien polaritatea errespetatu behar da, bestela, oxido-geruza desagertu, korrontea zeharkatu eta kondentsadorea suntsitu egiten da.

Industria-mailan goi-tentsioa erabiltzen da, eta karga- kopuru handiak metatzeko tamaina handiko kondentsadoreak daude. Silikona-olioan sartuta dauden metalezko xaflak dira eskuarki, eta seriean konektatzen dira.

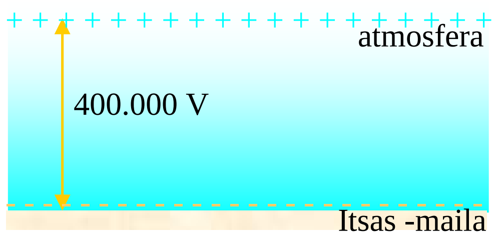
Azken boladan aurrerapen handiak gertatu dira arlo horretan, eta, egun, farad bateko kondentsadoreak (tentsio txikietan) ekoizten dira. Kondentsadore mota hori erabiltzen da, besteak beste, pilarik gabeko erlojuetan eta ordenagailuen laguntza-sistemetan. Super- kondentsadore horietan, soluzio elektrolitikoa erabiltzeaz gain, metalezko azala karbono porotsuzko xafla batekin gainezartzen da. Azalera handia (1000cm^2/g gutxi gorabehera) eta bolumen oso txikia (cm^2) dira geruza horren abantailak.

ERANSKINA: ATMOSFERA, KONDENTSADORE ERRALDOI BAT

ATMOSFERAKO EREMU ELEKTRIKOA

Gu geu eremu elektriko baten barruan bizi gara: atmosferakoan, hain zuzen. Zerk sortzen du? Lurrean eta atmosferan bertan dauden kargek. Karga horiek ez daude uniformeki banatuta: negatiboak Lurraren gainazalean eta positiboak atmosferan bertan kokatzen dira. Karga-banaketa horren funtsa azaltzea pixka bat konplexua da, baina, laburbilduz, hiru faktore aipatuko ditugu: izpi- kosmikoak, erradioaktibitatea eta tximistak.

Lurrera iristen diren izpi- kosmikoek nahiz Lurraren gainazalean suertatzen diren deskonposizio erradioaktiboek ioiak sortzen dituzte; hori dela eta, atmosferan eta Lurrean kargak daude. Baina harien banaketa iraunarazteko beste eragile bat dugu: tximistak. Karga-banatzeak dirau deskarga horien bidez.

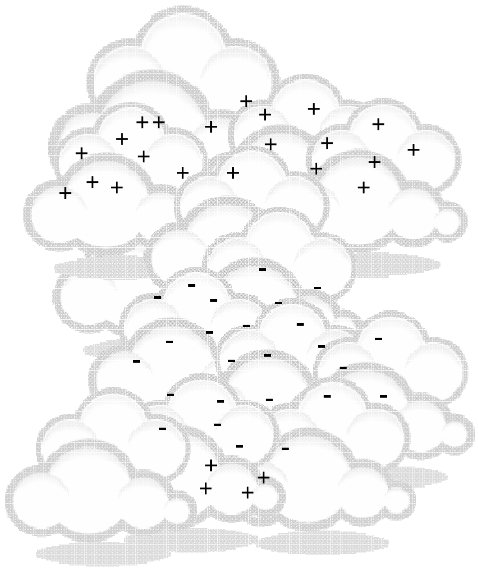


III.7. *Karga-banatzea Lurrean eta atmosferan*

Ondorioz, kondentsadorearen eremua bezalako eremu bat sortzen da. Eta gainera, ez da makala, egun argitsu eta bareetan, atmosferaren eta Lurraren arteko potentzial-diferentzia 400.000 V izan ohi da[20]. Zer gertatzen da hodeitsu dagoenean? Hodeietan kargak metatzen direla kontuan hartu behar dugu. Ekaitz-hodeietan III.8 irudiko karga- banaketak gertatzen dira: goiko aldean karga po-

[20] *Ez da erraza horrelako neurketak egitea. Lurraren karga- dentsitatea neurtzen dute eskuarki. Esaterako, metalezko xafla bat Lurrarekin konektatu ondoren kargatuta dago. Gero, beste metalezko xafla bat bere gainean kokatu, Lurrarekin konektatu eta lekualdatu den karga- fluxua neurtzen dute.*

sitiboak gertatzen dira, behekoan, berriz, negatiboak. Horren ondorioz, atmosferako eremua areagotzen da eta 25.000 N/C izan daiteke. Hain eremu bortitzak dira non deskargak (tximistak) gertatzen baitira. Deskarga horiek Lurraren karga negatiboaren erantzuleak dira.



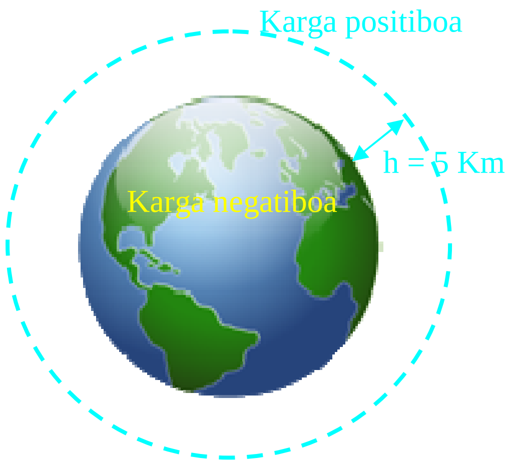
III.8. *Ekaitz-hodei baten karga banaketa:. Beheko aldean, karga negatiboez gain karga positibo batzuk ere agertzen dira. Baina negatiboekin alderatuta oso kopuru txikia denez, beheko aldean karga negatiboa dagoela esan dezakegu.*

ATMOSFERAREN KAPAZITATEA

Beraz, atmosfera kondentsadoretzat har dezakegu: beheko aldea negatiboki kargatua eta goikoa positiboki kargatua izanik. Egia esateko, karga positiboa ez da metatzen altuera finko batean, baizik eta atmosfera osoan banatzen da. Eredu teorikoak garatzeko hurbilketak erabiltzen dira. Oso hurbilketa egokia da karga positiboa Lurraren gainazaletik 5 Km-ra dagoela jotzea. Eta horrela egingo dugu guk ere atmosferaren kapazitatea kalkulatzeko.

Kondentsadore esferiko balitz bezala garatuko ditugu kalkuluak: barruko esferan (Lurrean) karga negatiboa eta kanpokoan (atmosferan) positiboa. Aurreko gaietan azaldutakoa erabiliz, ez da zaila ondorioztatzea haien arteko potentzial-diferentzia hauxe dela:

$$\Delta V = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{1}{R_L} - \frac{1}{R_L + h}\right]$$



III.9. *Atmosferaren kapazitatea: kondentsadore esferiko bat balitz bezala kalkula dezakegu bere kapazitatea*

non, Q Lurrean metatutako karga- kopurua, R_L Lurraren erradioa eta h karga positiboaren Lurrarekiko distantzia baitira, hurrenez hurren. Potentzialaren eta kapazitatearen arteko erlazioa erabilita:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} = 4\pi\varepsilon_0 \frac{R_L\left(R_L + h\right)}{h} \simeq 0{,}9 \text{ C}$$

Guk erabiltzen ditugun kapazitateak baino askoz handiagoa!

IV KORRONTE ZUZENA

1. SARRERA

Orain arte orekan dauden sistemak aztertu egin ditugu, baina elektromagnetismoaren aplikazioetatik interesgarrienen arteana bat orekan ez dagoen eroale bat daugu, edota, bestela esanda, zirkuitu bat.

Geure esperientziaren arabera, badakigu zirkuitu elektrikoek eguneroko bizitzan oso funtzio garrantzitsua betetzen dituztela eguneroko bizitzan, gailu elektriko guztiak zirkuituei esker dabiltzaen eta. Eta ez dira gutxi ezinbestekoak egin zaizkigun gailu elektrikoak …

Bada garaia, beraz, orekan ez dagoen sistema bat aztertzeko. Baina, hurrengo gaian ikusiko dugunez, kargak higiduran iraunarazteak beste ondorio batzuk dakartza: haien inguruetan dauden beste kargekin dituen elkarrekintza elektromagnetikoak aldatu egitzen dira,; eremu elektrikoaz gain beste indar bat sortu dugula ematen du.

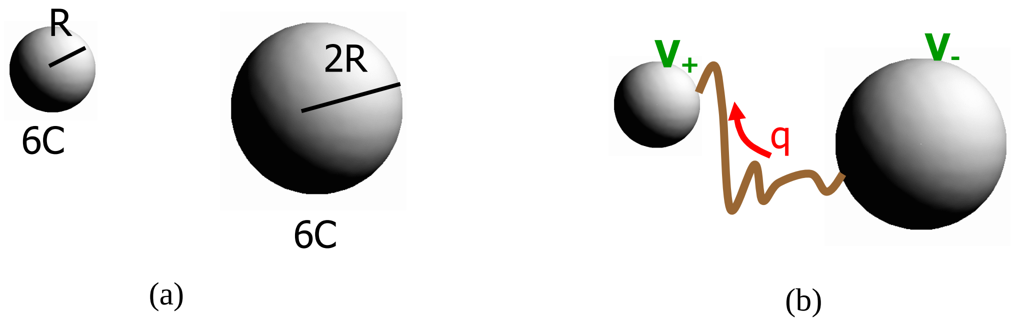
Ondorio horren azterketa aurrerago utziko egingo dugu. Lehenik eta behin, zirkuituen oinarriak ulertu eta elektromagnetismoaren oinarrizko kontzeptuekin lotuko ditugu.

2. INDAR ELEKTROERAGILEA (IEE)

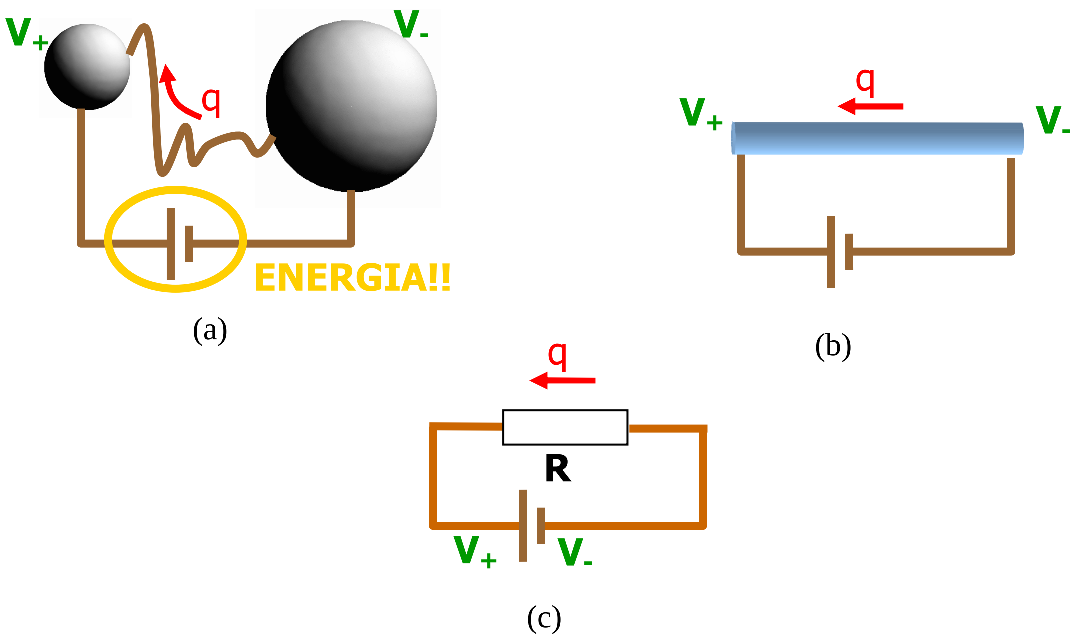
Ikusi dugunaren arabera, eroalearen kargak eremu elektrikoaren mende eroalearen kargak higitzen dira orekara iritsi arte, edo, behintzat, orekara iristen saiatuz. Nola sor dezakegu etengabeko eremu elektrikoa eroalean?

Demagun IV.1. irudiko sistema dugula: kargatuta dauden bi esfera eroale lotuta, beste hari eroale baten bidez. Esfera bakoitzaren hasierako tentsioak ezberdinak zirenez, denbora- tarte batean korronte elektrikoa dabil, eta kargak esfera batetik bestera lekualdatzen ari dira orekara iritsi arte, hau da, bi esferen potentziala berdindu arte.

Beraz, amaieran, sistemaren barruko eremua nulua da. Prozesua oso azkar amaitzen da. Nola iraunarazten ahal dugu? Bigarren esferara iritsi bezain laster kargak "eraman" behar ditugu hasierako esferara, horrela ez da inoiz oreka lortuko. Kargei energia eman behar diegu, eta horixe da, hain zuzen ere, indar elektroeragilearen (bateriaren) betebeharra: etengabe ematen die energia kargei, eroalean potentzial-diferentzia aldediferentzia iraunaraziz.



IV.1. *irudia. Desorekan dauden bi eroale. (a) Bi esfera kargatu ditugu.; Hhaien tamaina desberdinak direla eta, potentzial desberdinetan daude;. (b) hHari eroale baten bidez konektatu ondoren, kargak (elektroiak) potentzial txikiagoagoko esferatik bestera lekualdatuko dira. Desoreka- egoera honrrek istant bat, besterik ez dirau.*



IV.2. *irudia. Bi eroaleren desoreka iraunarazten. (a) Aurreko bi esferaren kasuan, orekara iritsi bezain laster kargei energia eman beharko diegu, bateria baten bidez esaterako; (b) gauza bera egingo genuke beste edozein eroale batrekin, adibidez, metalezko barra batekin; (c) egoera adierazteko erabiltzen dugun eskema: bateria, hari eroaleak eta konektatu egin dugun osagaia. Geroago ikusiko dugunez, osagai hori bere R erresistentziaren bidez bereizten dugu.*

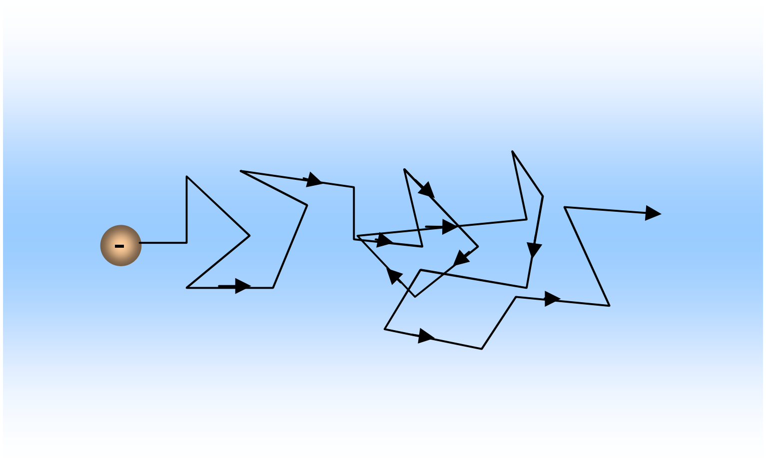
Iee-k ez diote kargarik gehitzen zirkuituari, baizik eta energia ematen die zirkuitua osatzen duten eroaleen kargei energia ematen. Energia hori eguzkitik, erreakzio kimikoetatik, higiduragatik,… ateratzen da.

Horrela sortutako eremua uniformea da eroalean, hau da, hariaren puntu guztietan. Non daude zirkuituan eremua sortzen duten kargak? Eta nola da posible eremua konstantea izatea haria tolesten eta kurbatzen badugu?

Hasiera batean, hau da, iee-rekin eroalea konektatu bezain laster, ez da horrela. Eremua ez da uniformea hari osoan, baina, eremu horren mende, hariaren kargak gainazalean banatzen dira eta barruan uniformea den eremua uniformea sortzen dute.

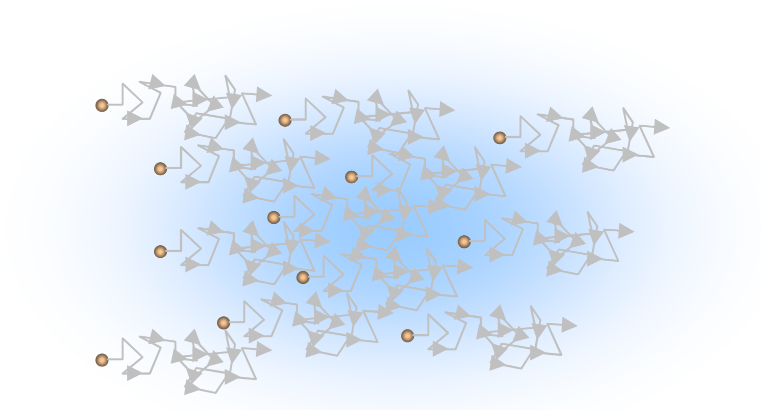
3. INTENTSITATEA

Badugu Harian eremu etengabea harian badugu, bere kargak higitzen ari diraduran daude. Beste magnitude bat definitu behar dugu: intentsitatea. Bestela esanda, harian dabilen karga-fluxua zenbatuko dugu. Zeregin hori betetzeko, fluxu horretan eragina dituzten faktoreak kontuan hartu behar ditugu.

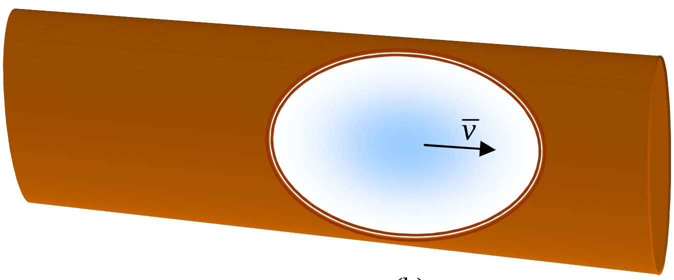


IV.3. *Elektroien higidura eroalean:. eEremuaren mende azeleratu eta gero, nukleoekin talka egiten du. Prozesua etengabe errepikatzen da..*

Eroalean higitzean elektroiek nukleoekin talka egiten dute, haien abiadura murriztuz eta eroalearen tenperatura handituz. Eremuaren mende, berriro hasten dira azeleratzen hurrengo talka izan arte. Iee-ren bidez emandako energia elektrikoa beste energia- mota bat bihurtzen da talka horietan, eta nahiz eta elektroi bakoitzak talkak izan, elektroi-hodeia aurreratzen ari da batez besteko abiaduranz aurreratzen ari da.



(a)



(b)

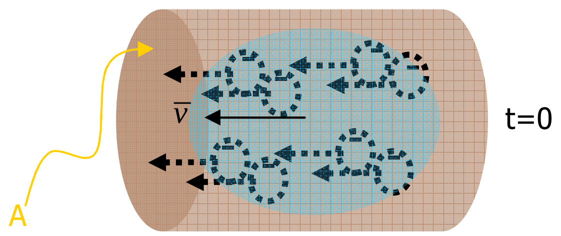
IV.4. *irudia. Elektroi-hodeia hari batean. (a) Elektroi guztiek dute joera bera, eta elektroi-hodeian aurrera eta atzera dabiltzan guztiaek;. (b) baina hodeia bai, aurrera doa,; nahiz eta elektroi bakoitzak talkak izan, multzoa aitzina doa v abiaduranz.*

Karga-fluxua da hariaren sekzio batean sartzen den karga- kopurua segundoko da. Δt denbora-tarte batean, IV.5 irudiko bolumenean dauden kargaek zeharkatu dute sekzioa.

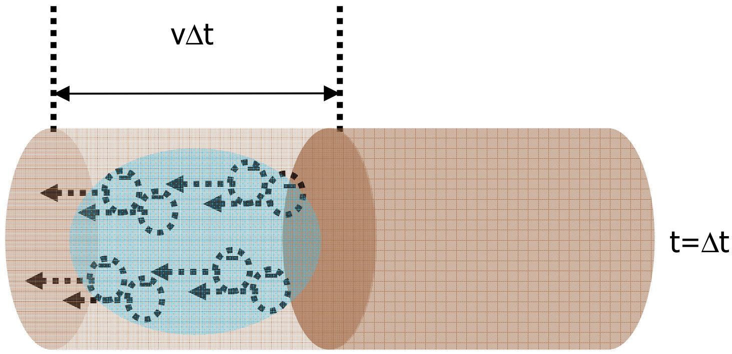
IV.5 Irudian ikusten den bezala, sekzioa zeharkatu duten elektroi guztiak ΔV bolumenean daude, eta bolumen hori horrela kalkula dezakegu: $\Delta V = Av\Delta t$, non A eroalearen sekzioa, eta v elektroi-hodeiaren batez besteko abiadura baitira. Elektroien kopurua bolumen-unitateko, (n), ezaguna bada, intentsitatea horrela zehatz dezakegu:

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = nq\frac{\Delta V}{\Delta t} \Rightarrow i = Avnq \quad \text{(NSn: amperea)}$$

non q karga-eramaileen karga -kopurua baita. Higitzen ari direnduran dauden kargak, hau da, karga-eramaileak, positiboak edo negatiboak izan daitezke, baina hitzarmena da karga positiboen noranzkoa intentsitatearen noranzkotzat hartzea, nahiz eta benetako karga-eramaileak negatiboak izan.



(a)



(b)

IV.5. *irudia. Elektroi-fluxua. (a) Elektroi-hodeia eroale barruan une zehatz batean eta (b) Δt denbora- tarte bat eman ondoren. vΔt luzerako bolumenaren barruan dauden elektroiaek zeharkatu dute adierazitako hariaren sekzioa epe horiretan.*

Askotan, kargen higidura zehatzago ezagutzea komenigarria da. Horretarako korronte-dentsitatea, $\vec{j}$, erabiltzen dugu. Korronte-dentsitatea da azalera-unitateko intentsitatea azalera unitateko da. Fluxua puntu bakoitzean desberdina izan daitekeenez, magnitude bektoriala da, hau da, noranzkoa eta norabidea du.

Intentsitatearekin duen lotura honako hau da:

$$di = \vec{j}d\vec{A} = jdA\cos\theta \Rightarrow i = \int_A \vec{j}d\vec{A}$$

Edo, intentsitatearen adierazpen matematikoa erabiliz:

$$i = nvqA \Rightarrow \vec{j} = nq\vec{v} \quad \text{(NSn: A.m}^2\text{)}$$

Baina horiexek ez dira oso erlazio erabilgarriak, magnitude makroskopikoekin lotu behar ditugu. Horretarako, elektroien higidura sakonkiago aztertuko dugu hurrengo atalean

3.1 Elektroien higidura

Elektroi bakoitza azeleratzen da eremuaren mende, eta azelerazioa honako hurrengoa da:

Indar elektrikoa: $\vec{F} = e^{-}\vec{E}$
Azelerazioarekin duen lotura (Newtonen bigarren legea): $\vec{F} = m\vec{a}$
Ondorioz: $e^{-}\vec{E} = m\vec{a} \Rightarrow \vec{a} = \dfrac{e^{-}}{m_e}\vec{E}$

Baina nukleoekin[21] izandako talken ondorioz, etengabe galgatzen eta azeleratzen dira. Batez besteko abiadurari, ($\overline{v}$), jitoaren abiadura deritzo. Talken arteko batez besteko denbora-tartea $\overline{t}$ bada, jitoaren abiadurak hurrengo balio hau hartuko du:

$$\overline{v} = a\overline{t} = \frac{e^{-}E}{m_e}\overline{t}$$

Hau da, $\overline{v}$ eremuarekiko zuzenki proportzionala da: $\overline{v} = uE$, non u konstanteak eroalearen elektroien higikortasuna adierazten baitu: $u = \dfrac{|e^{-}|E}{m_e}$. Elektroien kasuan, beraz: $\vec{v} = -u\vec{E}$.

Kargen abiadura esperimentalki neurtzen badugu, eskuratzen dugun balioa 4.10^{-5} m/s da gutxi gorabehera da. Horrela bada, zirkuitua martxan ipini ondoren, elektroiek nekez betetzen dute zirkuitu osoa[22].

---

[21] *Nukleoak bibrazioan daude energia termikoaren ondorioz: metala zenbat eta hotzago egon, orduan eta oszilazio txikiagoak eta talka gutxiago gertatzen dira.*
[22] *Etengailua sakatu bezain laster argia pizten dela azaltzeko eremua c abiaduraz hedatzen dela kontuan hartu behar dugu. Hau da, ia zirkuituaren elektroia guztiak aldi berean ipintzen dira martxan. Ez da beharrezkoa elektroiak harizpira iristea, harizpian bertan ditugu-eta elektroiak eta.*

Intentsitatea eta korronte dentsitatea, beraz, horrela kalkulatzen ahal ditugu: $\vec{j} = nqu\vec{E}; \quad i = nvqA = nqAuE = Aj$

3.2. Konduktibitatea

Ondorioztatu dugun emaitzan agertzen diren konstante guztiak material motaren mende daude. Ondorioz, posiblea izango litzateke materialaren konstante propio bat erabiliz formulak erraztea:

$$i = nqAuE = \sigma E; \quad \vec{j} = nqu\vec{E} = \sigma\vec{E}$$

non σ materialaren konduktibitatea baita: σ = qnu. Hau da, korronte-dentsitatea eremuaren proportzionala da eta proportzionaltasun- konstantea materialaren mende dago.

Askotan, konduktibitatearen ordez, ρ erresistibitatea erabiltzen dugu: $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{qnu}$.

4. ERRESISTENTZIA ETA OHM LEGEA

Eroalean dabilen intentsitatea eta eremua elektrikoa lotu ditugunez, orain ez zaigu zaila egingo eroalearen potentzial-diferentziarekin aldediferentziarekin erlazionatzea.

Eroalearen barruko eremua ezartzeko, potentzial-diferentzia aldediferentzia jakin bat iraunarazten dugu bere muturren artean. Eremua uniformea dela kontuan hartuta, tentsio horren eta eremuaren arteko erlazioa ezaguna da:

$$\Delta V = -\int_{has}^{ama} \vec{E}d\vec{l} \Rightarrow \Delta V = EL$$

Nnon L hariaren luzera baita. Bestalde, intentsitatea eta intentsitate-dentsitatea definitu egin ditugu eta haurrengoa dakigu: $i = A\sigma E$. Bi emaitzak kontuan hartuta:

$$i = A\sigma\frac{\Delta V}{L} = \frac{A\sigma}{L}\Delta V = \frac{\Delta V}{R}$$

non $R = \frac{L}{A\sigma} = \frac{L}{A}\rho$ materialaren erresistentzia baita. Eta material motaren (σ edo ρ) nahiz eroalearen geometriaren (A, L) mende dago. Hauxe da, hain zuzen, Ohmen legea. Lege horrek erlazionatzen ditu eroale batean dabilen intentsitatea eta horretarako erabilitako ΔV tentsioa. Argi dago intentsitatea tentsioaren nahiz erresistentziaren mende dagoela. NSn unitatea ohma (Ω) da unitatea.

4.1. Material ohmikoak

Eroale bati ΔV potentzial-diferentzia aldediferentzia aplikatuz gero, $i = \frac{\Delta V}{R}$ intentsitatea sortzen dugu. Hau da, dabilen intentsitatearen balioa materialaren mende dago, motaren eta geometriaren mende zehatz-mehatz.

Baina erlazio hori ez da beti betetzen. Kontuan hartu behar dugu R faktore askoren mendean dagoela kontuan hartu behar dugu. Faktore geometrikoak ez dira aldatzen eremua aldatzen badugu, beraz, konstanteak izango dira. Kargen higikortasunari, ordea, ez zaio gertatzen gauza bera.

Elektroiek, higitzean, nukleoekin talka egiten dute. Horren ondorioz, materialaren tenperatura igo eta nukleoen bibrazioak areagotzen dituzte. Hori dela eta, talken probabilitatea ere areagotzen da, eta elektroien higikortasuna, berriz, murriztu. Edo bestela esanda, erresistentziaren balioa areagotzen da.

Irizpide horren arabera material-sailkapen bat egiten da. Konduktibitatea intentsitatearen mende ez badago, materiala ohmikoa da, eta kontrakoa gertatzen bada, ez- ohmikoa.

Dena dela, esan dugunaren arabera, ez dago benetako material ohmikorik! Zorionez, material asko ohmikotzat hartzen ahal dugu intentsitate-tarte jakin batean. Hau da, tenperaturak asko igo egin behar du (oso intentsitate handia erabiliz) haien konduktibitatea nabarmen aldatzeko.

4.2. Erdi eroaleak eta super eroaleak

Material ez- ohmikoen artean erdi eroaleak eta super eroaleak daude. Biak oso material bereziak dira. Erdi eroaleetan elektroi askeen dentsitatea tentsioarekin esponentzialki erlazionatuta dago, eta gero eta tentsio handiagoak erabiltzen badira, intentsitatea ez da linealki gehitzen, baizik eta esponentzialki.

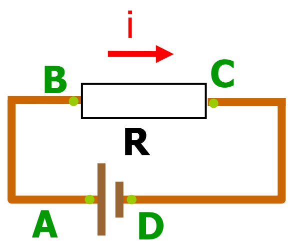
Erdi eroaleek ez dute karga- eramailerik tenperatura baxuetan, elektroien nukleoekiko lotura sendoa delako, eta soilik oso eremu bortitzak erabiliz soilik askatzen ahal ditugu. Hori dela eta, tentsio handiak erabiltzen ditugunean, elektroiak aske geratzen dira. Zenbat eta tentsio handiagoa erabili orduan eta elektroi gehiago daude aske, eta horregatik erresistentzia murrizten da erresistentzia nahiz eta tenperatura handiagoa izan eta talka gehiago gertatu.

Super eroaleak oso tenperatura baxuetan erresistentzia nulua duten materialak dira. Tenperatura kritiko horietan baino handiagoetan badaude beste eroaleek beste eroaleak bezala jokatzen dute beste eroaleek, baina, behin tenperatura kritikoarenrik azpian, erresistentziaren balio zerora murrizten da[23].

Super eroaleen artean ditugu eztainua, beruna, zinka eta indioa dugu. Gaur egun ikertzen ari diren super eroaleak zenbat konposizio oxidoak dira. Helburua, jakina, giro-tenperaturan super eroaleak diren materialak aurkitzea da.

5. ZIRKUITUAK

Bateriak, erresistentziak, kondentsadoreak… hari eroale batzuekin konektatu ondoren, zirkuitu bat osatu dugu. Eta, zein da zirkuitu baten helburua? Energia mota bat (elektrikoa) beste energia mota bihurtzea (beroa, higidura, argia,…). Esate baterako, bonbilla batez eta bateriaz osatutako zirkuituan, bateriak hornitzen die elektroiei energia potentzial elektrikoa eta, horren ondorioz, elektroiak zirkuituan zehar higitzen dira, bonbillaren harizpia zeharkatuz eta harizpian bertan hantxe haien energia potentzial elektrikoaren zati bat bero bihurtuz. Horrela, bonbillaren goritasuna gertatzen da (argia, bilatzen dugun energia)[24].



IV.6. *irudia. Zirkuitu sinple bat*

[23] *Horrek esan nahi du, behin korrontea ibiltzen hasita ondoren, ez diogula super eroaleari tentsiorik aplikatu behar korrontea iraunarazteko.*
[24] *Eta entxufeetan? Zer energia mota erabiltzen da? Prozesua askoz lehenago hasten da: zentral elektrikoetan. Energiaren bilakaera zentraletan gertatzen da, eta banaketa- sareen bidez energia hori garraiatzen da etxeetaraino garraiatzen da.*

Baterien betebeharra hobeto ulertzeko zirkuiturik sinpleena aztertzen hasiko gara (ikusi IV.6 irudia). Ezartzen den eremu elektrikoaren arabera, $V_B< V_A$; $V_C< V_B$; $V_D< V_C$ eta $V_D< V_A$. Gainera, $V_A- V_D = \varepsilon$ = bateriaren iee-a. Horrela bada, kargak A puntutik B puntura[25] higitzen dira $\vec{v} = u\vec{E}$ batez besteko abiaduranz. Eta σ zenbat eta handiagoa izan, orduan eta txikiagoa izango da R. Konexioak kobrezko hariak izan ohi dira, kobrearen erresistentzia oso txikia delako, eta elektroiek energia elektriko gutxi galduko dutelako bonbillara (edo interesatzen zaigun osagarrira) iritsi arte. Hemen ditugu balio tipiko batzuk:

$$\left.\begin{matrix} \sigma_{kuprea} = 6.10^7 \dfrac{A/m^2}{V/m} \\ Haria: \begin{cases} A = 0,2mm^2 \\ L = 5mm \end{cases} \end{matrix}\right\} \Rightarrow \begin{cases} R = 4,2.10^{-4}\Omega \\ i = 0,3A \Rightarrow E = \dfrac{i}{A\sigma} = 0,025\dfrac{V}{m} \end{cases}$$

A eta B-ren arteko potentzial-aldepotentzial-diferentzia diferentzia, beraz, ia mespretxagarria da: $V_A \approx V_B$. Hotzean, harizpiaren erresistentzia oso txikia da, baina, gero eta gori-gori dagoenez, balioak izugarrizko gorakada izaten du. Antzeko zerbait gertatzen zaie fusibleei. Ekoizleaek adierazten duten intentsitatea nominala da, intentsitate horietan fusiblea ez da berotzen. Berotzen badira, fusiblearen erresistentzia handitzen da. Zirkuitu laburra saihesteko bakarrik erabiltzen dira, ez intentsitateak kontrolatzeko: fusiblea suntsitzeko, gori-gori ipintzen duen intentsitatea soberan gainditu behar da.

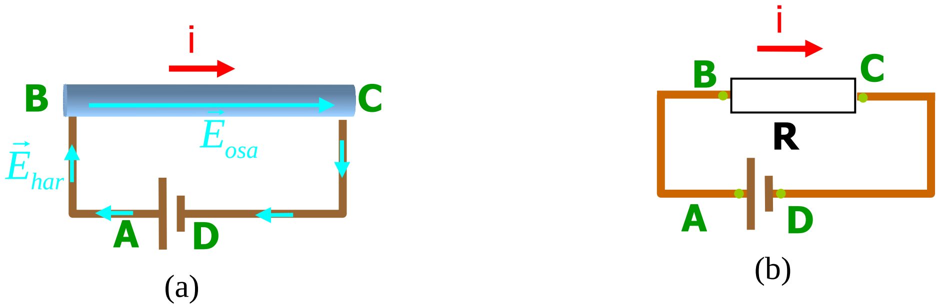
Zehaztasun handiagoa ezinbestekoa bada (adibidez, gain-korronte baten ondorioz motorea ez berotzeko), errele termikoak edo zehaztasun handiko fusibleak erabiltzen dira. Motorren tenperatura pixka bat igotzen bada zirkuitua irekitzen dute.

Erresistentzia handiagoko osagaietan (bonbilletan, esaterako) kargen *u* higikortasun- konstantea txikiagoa da. Baina egoera egonkorrean karga-fluxua berdina da zirkuituaren puntu guztietan,; beraz, osagai horietan eremu elektrikoak bortitzagoa izan behar du, eta B puntuaren eta C puntuaren artean potentzial-aldediferentzia diferentzia nabaria dugu. Hona hemen berriro balio tipiko batzuk:

---

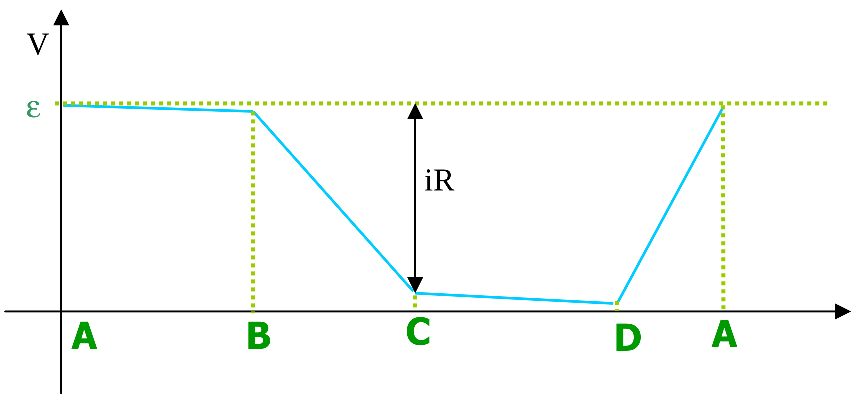
[25] *Positiboak izango balira bezala. Gogora ezazu intentsitatearen noranzkoa karga positiboena dela.*

$$\left.\begin{array}{l}\sigma_{tungstenoa}=1{,}8.10^{7}\,\dfrac{A/m^{2}}{V/m}\\[2ex] Bonbila\ baten\ harizpia:\begin{cases}A=2{,}8\cdot10^{-3}\,mm^{2}\\ L=5m\end{cases}\end{array}\right\}\Rightarrow\begin{cases}R=98{,}24\Omega\\ i=0{,}3A\Rightarrow E=\dfrac{i}{A\sigma}=5{,}95\dfrac{V}{m}\end{cases}$$



IV.7. *irudia. Eremuak harian eta osagaietan. (a) Erresistentzia handiko osagaia (BC) erabili dugu zirkuitua osatzeko. (b) Zirkuituaren eskema. Harietan erresistentzia ia mespretxagarria denez, intentsitatea ibiltzeko oso eremu ahula nahikoa da. Baina, osagaiaren erresistentzia hariena baino askoz handiagoa denez, ezinbestekoa da alde horietan eremua sendoagoa izatea karga-fluxua bera izateko.*

C-D tartean A-B tartean bezala gertatzen da, eta azkenean, kargak bateriara iristen dira. Kargek bidean galdu duten energia bidean: $\Delta E_p = q\left(V_A - V_D\right) \simeq q\left(V_B - V_C\right)$



IV.8. *irudia. Potentzial-diferentzia zirkuituan zehar. Harietan intentsitatea ibiltzeko nahikoa da oso txikia den eremu elektriko bat nahikoa da, eta, ondorioz, potentzial-diferentziak aldedife-rentziak ia mespretxagarriak dira. Erresistentzia nabaria bada, berriz, (BC tartean bezala) ere-muak askoz sendoagoa izan beharko dua, potentzial- aldaketa handiagoak sortuz.*

Bateriara iritsi eta gero, karga bakoitzari bateriak ematen dion energia $q\left(V_A - V_D\right)$ da. Eta emandako energia karga- unitateko: $\varepsilon = \left(V_A - V_D\right)$. Eta hHorixe da, hain zuzen, iee-ren balioa.

Orain, aztertu dugun zirkuituaren energia-analisia egingo dugu. A puntutik (ikusi IV.8 irudia) irten den karga C-ra iristean, hurrengo energiaren galera hau izan du: $\Delta E_p = q\left(V_A - V_D\right) \simeq q\left(V_B - V_C\right)$

Gogora ezazu A-B eta C-D tarteetan ia ez dagoela galerarik (kobrezko haria dela eta). Zer bihurtzen dau energia horinek? Beste energia mota bat, jakina! Elektroiek, nukleoekin talka egitean, energia galtzen dute. Energia hori bero bilakatzen da, talken ondorioz nukleoen oszilazioak areagotzen dira- eta[26]. Karga bateriara iristean, energia jasotzen du:

$$E_{emandakoa} = E_{bilakatua} \Rightarrow q\varepsilon = q\left(V_C - V_B\right) \Rightarrow \varepsilon = V_C - V_B$$

Bestalde, erresistentzia zeharkatzen duen intentsitatea: $i = \dfrac{V_C - V_B}{R} \Rightarrow V_C - V_B = iR$. Beraz: $\varepsilon = iR \Rightarrow \varepsilon - iR = 0$. Eta energia-kontserbazioa betetzen da zirkuituan zehar.

5.1. Karga- kontserbazioa

Demagun bi adarreko zirkuitua osatu dugula, bateria batekin paraleloan bi bonbilla konektatuz (ikusi IV.9 irudia).

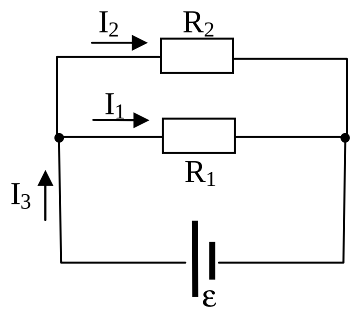
Nondik ibiliko dira kargak? Batzuk goiko adarretik eta beste batzuk behekotik. Korapiloetan bi adarreko intentsitateak banatzen edo metatzen dira, eta, zirkuituen karga kontserbatzen denez, korapilo bakoitzean sartzen den intentsitate garbiak eta hortik irteten denak berdinak izan behar duteira:

$$I_3 = I_1 + I_2$$

Jakina, kasu horietan erea, energia-kontserbazioa betetzen da, sare guztietan:

$$\varepsilon - I_1R_1 = 0; \varepsilon - I_2R_2 = 0$$

[26] *Zenbat eta erresistentzia handiagoa izan, orduan eta txikiagoak dira konduktibitatea eta u konstanteak txikiagoak dira, beraz, osagaietan harietan baino talka gehiago gertatzen dira, eta bero bihurtzen duen energia- kopurua ere handiagoa da.*



IV.9. *Bi adarreko zirkuitu sinple bat*

5.2. Zirkuituen ebazpena: Kirchhoff-en legeak

Zirkuituak ebazteko, aurretik ikusitako ekuazioak erabiltzen dira, hau da, karga- eta energia-kontserbazioa ekuazioak. Bi arauetan, Kirchhoff-en legeetan, laburtzen ditugu:

- Zirkuituaren edozein korapilotara sartzen diren korronteen baturaketa eta hortik irteten direnarena berdinak dira (korapilo-araua)
- Edozein saretan zehar, osagai guztien tentsioen baturakketak zero izan behar du (sare-araua)

5.3. Zirkuitu serieen eta zirkuitu paraleloen konexioak

Zirkuitu bat gauzatzean bi eratan konektatzen ahal ditugu osagaiak: seriean edo paraleloan (ikusi IV.10 irudia). Nahiz eta osagai berdinak erabili, kasu bakoitzean zirkuituaren erresistentzia baliokideak bestelako balioa du eta, ondorioz, dabilen intentsitatea ere bai.

5.3.1. Seriean

Osagai batzuk seriean konektatzen baditugu, zirkuituaren erresistentzia baliokidea osagai bakoitzarena baino handiagoa da. Balioa hauxe da:

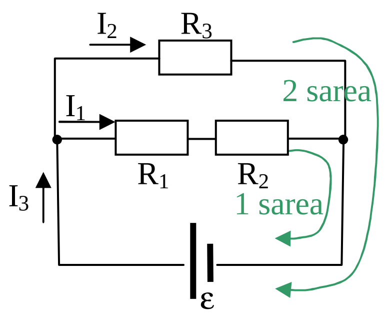
$$R_{bal} = R_1 + R_2 + ... = \sum_{i=1}^{n} R_i$$

Eta zZenbat eta osagai gehiago seriean konektatu, orduan eta intentsitate txikiagoa ibiliko da zirkuituan. Kirchhoffen legeak erabiliz, honako hauurrengoa dugu:

$$I_1 = I_2 = ... = I$$
$$V_1 + V_2 + ... = \varepsilon$$
$$V_1 = IR_1; V_2 = IR_2; ...$$

Adibidea: Kirchhoff legeen erabilera

Demagun irudiko zirkuitua dugula. Aurrez aurre jakin nahi dugu zenbatekoak diren zirkuituaren intentsitate guztiak, hau da, zirkuitua ebatzi nahi dugu. Horretarako, Kirchhoffen legeak erabiliko ditugu. Hasteko, zirkuituaren adar bakoitzari intentsitate bat esleituko diogu, eta, behin hori eginda, ondoren, korapilo-araua erabiltzeniz hasiko gara:



$$I_3 = I_1 + I_2$$

Badugu intentsitateen arteko erlazioa. Beste korapiloa erabiltzeak ez du szentszurik, zeren eta sartzen eta irteten diren intentsitateak berdinak baitira bietan, eta, ondorioz, aterako genukeen formula berdina izango litzateke. Hiru ezezagun ditugunez, beste bi ekuazio behar ditugu. Sare-araua erabiliko dugu eta, horretarako, irudian adierazitako sareak kontuan hartuko ditugu:

1 sarean: $\varepsilon - I_1(R_1 + R_2) = 0$; *2 sarean:* $\varepsilon - I_2 R_3 = 0$

Baditugu ezezagunak kalkulatzeko behar ditugun ekuazio guztiak;, orain, ekuazio-sistema ebatzi, besterik ez dugu egin behar. R_1 = R_2 = R_3 = 10 Ω eta $\varepsilon = 25$ V badira, hurrenez hurren:

$$\varepsilon - I_2 R_3 = 0 \Rightarrow I_2 = \frac{\varepsilon}{R_3} = 2,5A$$
$$\varepsilon - I_1(R_1 + R_2) = 0 \Rightarrow I_1 = \frac{\varepsilon}{R_1 + R_2} = 1,25A$$
$$I_3 = I_1 + I_2 = 3,75A$$

Eta emaitza guztiak positiboak direnez, intentsitateen noranzkoak zuzenak dira.

Seriean intentsitate bera dabil osagai bakoitzean, jakina, eta haien tentsioak erresistentziaren araberakoak izango dira.

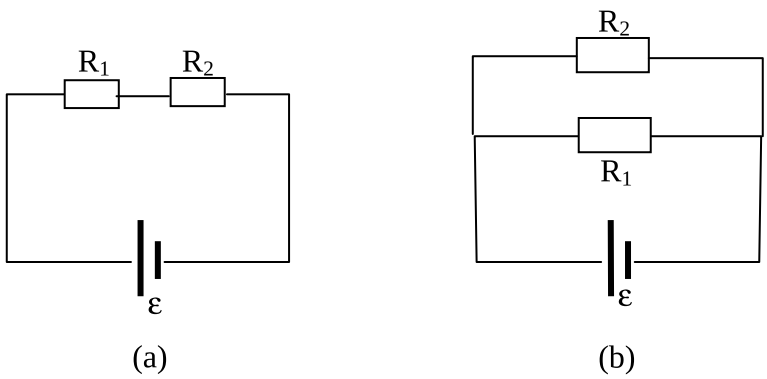
5.3.2. Paraleloan

Osagai batzuk paraleloan konektatzen baditugu, zirkuituaren erresistentzia balikidea osagai bakoitzarena baino txikiagoa da. Balioa hauxe da:

$$\frac{1}{R_{bal}}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\ldots=\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{R_i}$$

Beraz, zenbat eta osagai gehiago paraleloan konektatu paraleloan, orduan eta handiagoa izango da intentsitate nagusia handiagoa izango da. Kasu horietan, osagai bakoitzaren tentsioa berdina da, ε, eta intentsitateak, ordea, ezberdinak adar guztietan:

$$I_1=\frac{\varepsilon_1}{R_1}=;I_2=\frac{\varepsilon_2}{R_2};\ldots$$
$$I=I_1+I_2+\ldots$$



IV.10.*irudia. Zirkuitu serieenSerie- eta paraleloen - konexioak. (a) Seriean eta (b) paraleloan konektatutako bi osagai.*

6. POTENTZIA

Zirkuituetako erresistentzietan, motorretan eta abarretan energia kontsumitzen da, eta iee-etan, berriz, energia ematen sortzen da. Emandako Sortutako eta kontsumitutako energia denbora-unitateko erabiltzen da eskuarki, hau da, potentzia.

Potentziaren definizioa kontuan hartuta, ($P = \frac{dU_E}{dt}$, non U_E elkartruketako energia baita), sorgailuetan emandako lortzen den energia nahiz zirkuituaren beste osagaietan kontsumitutakoa kalkulatuko dugu.

Sorgailuan emandako lortzen den energia $U_E = q\varepsilon$ dela dakigu, beraz:

$$\left.\begin{array}{l} P = \dfrac{dU_E}{dt} \\ U_E = q\varepsilon \end{array}\right\} \Rightarrow P = \frac{d(q\varepsilon)}{dt} = \frac{dq}{dt}\varepsilon = i\varepsilon$$

Hau da, emandako lortutako energia, iee-ren mende egoteaz gain, dabilen intentsitatearen mende ere badago.

Kontsumitua kalkulatzeko, prozedura bera erabiliko dugu. Osagai bakoitzeko tentsioa ezagutzen dugu: $\Delta V = iR$, eta, ondorioz, kontsumitutako energia $U_E = qiR$ dela dakigu. Beraz:

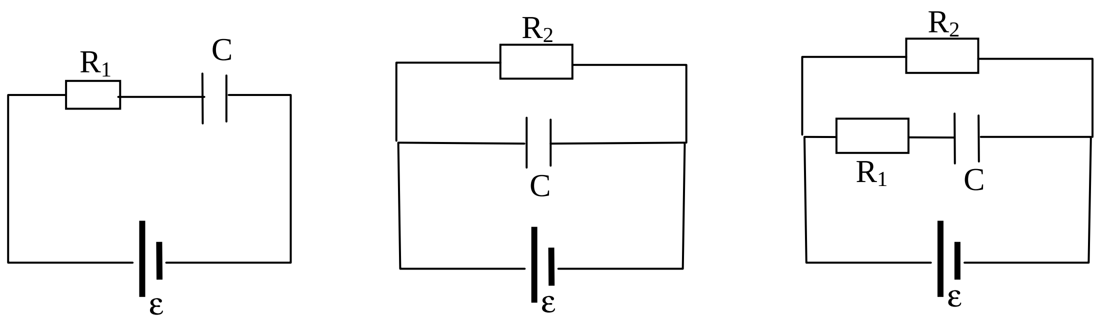
$$\left.\begin{array}{l} P = \dfrac{dU_E}{dt} \\ U_E = q\Delta V \end{array}\right\} \Rightarrow P = \frac{d(q\Delta V)}{dt} = \frac{dq}{dt}\Delta V = i\Delta V = i^2 R$$

Eta kasu horietan ere, osagaiaren erresistentziak ez ezik, dabilen intentsitateak ere badu eragina kontsumitutako potentzian.

7. RC ZIRKUITUAK

RC zirkuituetan, erresistentziaz gain, kondentsadoreak ditugu. Zer eragina du kondentsadoreak zirkuituan?

Kondentsadoreetan kargak metatzen ditugu, hau da, energia elektrikoa. Beraz, zirkuituetan karga-prozesuan edo deskarga-prozesuan kondentsadoreak aurki ditzakegu zirkuituetan karga- prozesuan edo deskarga- prozesuan. Kargatuta badaude, eta haien plaken arteko potentzial-diferentzia konstante iraunarazi bitartean, horrela jarraitzen dute.



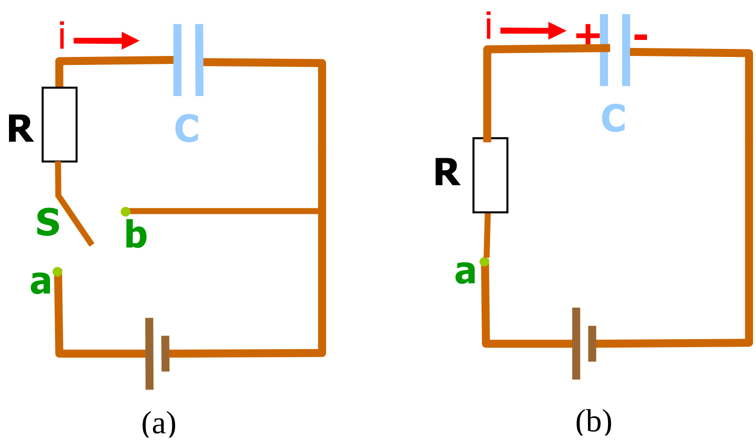
IV.11. *irudia. RC zirkuituak*

7.1. Kondentsadore-karga

Kondentsadore bat kargatzean, energia eman behar diogu karga bakoitzari xafla batetik bestera lekualdatzeko, beraz, bateria erabiliko dugu. Karga osatzeko irudiko zirkuitua erabiliko dugu, etengailua a puntuan konektatu ondoren.

Gauzak horrela, kargak plaka batetik bestera lekualdatzen hasi dira, eta korrontea dabil zirkuituan. Ondorioz, karga kondentsadorearen xafletan metatu, kondentsadorearen tentsioa areagotu, eta korrontea murriztuko da, xaflen arteko tentsioank iee-ren balioa hartu eta intentsitatea zero izan arte:

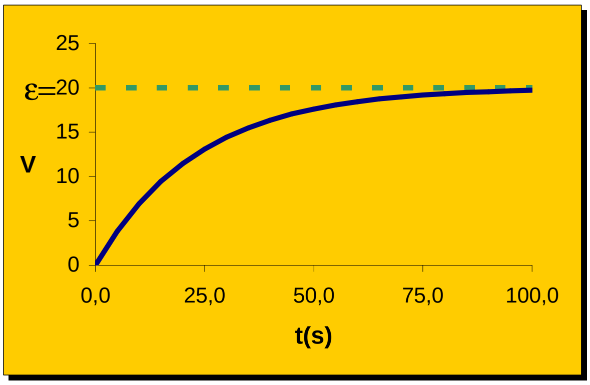
$$V_C = \varepsilon = \frac{Q}{C}$$



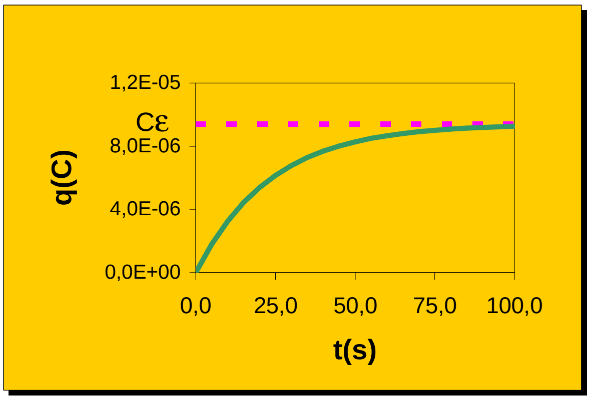
IV.12. *irudia. (a) RC zirkuitua;. (b) Karga gauzatzeko konexioa*

Intentsitatea zehazteko, Kirchhoffen legeak erabiliko ditugu. Karga-prozesuaren edozein t denbora- unetan hauxe dugu:

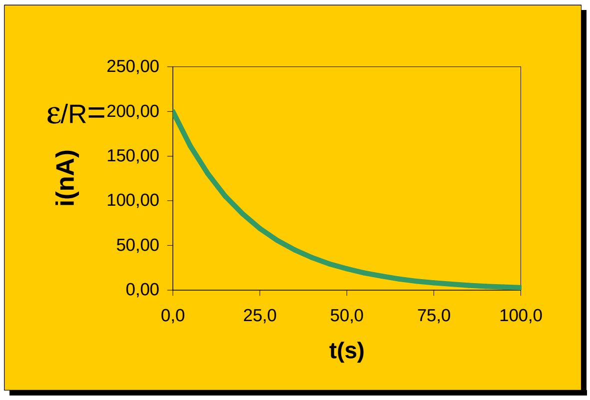
$$\varepsilon + V_R + V_C = 0 \Rightarrow \varepsilon - iR - \frac{q}{C} = 0 \Rightarrow \varepsilon - \frac{dq}{dt}R - \frac{q}{C} = 0$$



(a)



(b)



(c)

IV.13. *irudia. (a) Kondentsadorearen tentsioa denboraren mende, 20 V-ko sorgailuarekin konektatu ondoren. (b) eta (c), karga- eta intentsitate-grafikoak kasu berean.*

Ekuazio diferentzial bat dugu, eta ebazteko aldagaiak bananduko ditugu:

$$\varepsilon C dt - RCdq - qdt = 0 \Rightarrow (\varepsilon C - q)dt = RCdq \Rightarrow \frac{dt}{RC} = \frac{dq}{\varepsilon C - q}$$

Eta bakarrik integratzea falta zaigu:

$$\int_{t=0}^{t}\frac{dt}{RC}=\int_{q=0}^{q(t)}\frac{dq}{\varepsilon C-q}\Rightarrow\frac{t}{RC}=-\ln\frac{\varepsilon C-q(t)}{\varepsilon C}$$

Beste era batean idatziko dugu:

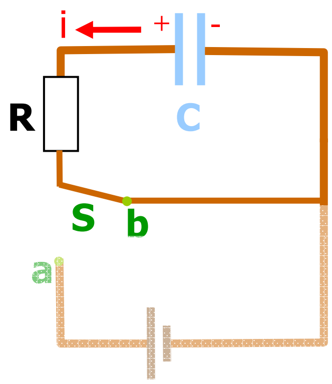
$$\varepsilon Ce^{-\frac{t}{RC}}=\varepsilon C-q(t)\Rightarrow q(t)=\varepsilon C\left(1-e^{-\frac{t}{RC}}\right)$$

Intentsitatea eta tentsioa: $i(t)=\dfrac{dq(t)}{dt}=\dfrac{\varepsilon}{R}e^{-\frac{t}{RC}}$; $V(t)=\varepsilon\left(1-e^{-\frac{t}{RC}}\right)$

Beraz, hasieran intentsitateak $\dfrac{\varepsilon}{R}$ baliorea hartzen du (kondentsadorea izango ez bagenu bezala) baina balioa azkar murrizten da, esponentzialki. Aldi berean, kondentsadorea denbora aurrera doala esponentzialki kargatzen ari da. $\tau=RC$ balioari denbora- konstantea deritzo eta kondentsadorea kargatzeko (eta deskargatzeko) arintasuna adierazten du: zenbat eta baliore txikiagoa izan, orduan eta azkarrago gertatzen dira prozesu horiek. $t=\tau$ denbora- unean kondentsadorearen karga $Q(1-e)$ da.

7.2. Kondentsadore-deskarga

Kargatu ondoren, horrela metatutako energia gorde egiten da etengailua b puntuan kokatu arte, eta berriro Kirchhoff-en legeak erabiliko ditugu zirkuituan dabilen intentsitatea kalkulatzeko:



IV.14. *irudia. RC zirkuitua, deskarga gauzatzeko konexioa egin ondoren*

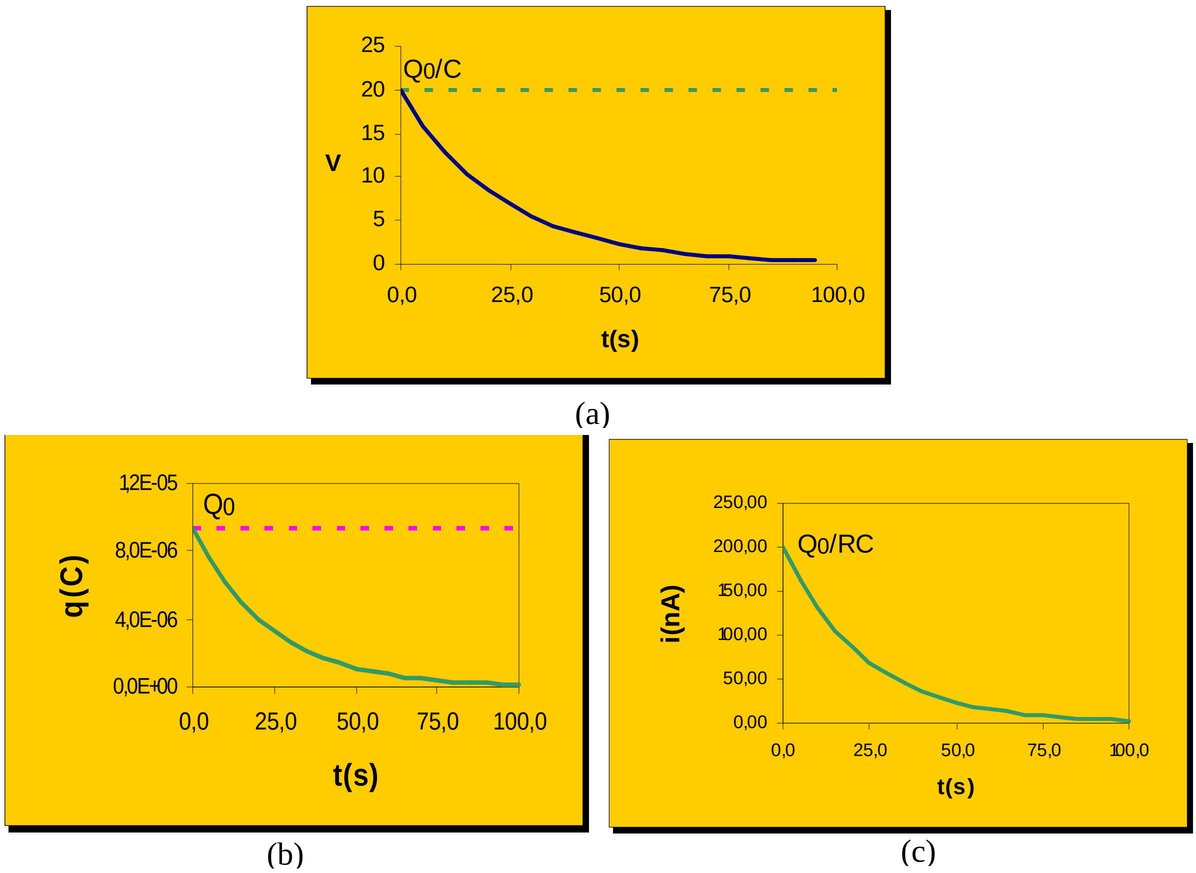
$$V_R + V_C = 0 \Rightarrow \frac{q}{C} = iR = -\frac{dq}{dt}R \Rightarrow qdt = -RCdq \Rightarrow \frac{dq}{q} = -\frac{dt}{RC}$$

Integralak kalkulatu ondoren:

$$\int_{Q_0}^{q(t)} \frac{dq}{q} = -\int_{t=0}^{t} \frac{dt}{RC} \Rightarrow \ln\frac{q(t)}{Q_0} = -\frac{t}{RC} \Rightarrow q(t) = Q_0 e^{-\frac{t}{RC}}$$

Intentsitatea eta tentsioa berriro:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = \frac{Q_0}{RC}e^{-\frac{t}{RC}}\ ;\ V(t) = \frac{Q_0}{C}e^{-\frac{t}{RC}}$$



IV.15. *irudia. (a) Aurreko kondentsadorearen tentsioa denboraren mende deskarga- prozesuan. (b) eta (c), karga- eta intentsitate-grafikoak kasu berean.*

V EREMU MAGNETIKOA

1. SARRERA

Elkarrekintza magnetikoa, elektrikoaren moduan, aspalditik da ezaguna. Grekoen garaian hartu zuen izena; garai hartan magnetita izeneko mineralak indar bereziak zituela zekiten eta elkarrekintzak magnetita izeneko materialetik hartu zuen izena.

Arlo horretan ere, ez zuten aurrerapauso handirik egin XIX. mendera arte. Salbuespen bakarra aipatu behar dugu: iparrorratza. Oso erabilia zen itsasontzietan XII. mendetik aurrera eta, zer esanik ez, funtsezkoa zen kostatik urruntzeko. Gilbert ikertzaileak proposatu zuen fenomeno horren zergatia 1600. urtean: Lurra bera beste iman bat da, eta iparrorratzak Lurrak sortutako eremu magnetikoarekin lerrokatzeko joera du. Polo geografikoak eta magnetikoak gainezartzen direnez[27], iparrorratzak ipar-polo geografikoa erakusten du.

1820an, Oerstd-ek eta Ampere-k, bakoitzak bere kabuz ikerkuntza sakonak osatu ondoren, imanen eta korronteen artean indar magnetikoak sortzen direla frogatu zuten. Edo, bestela esanda, eremu elektrikoek eremu magnetikoak sortzen dituztela. Azter dezagun gaia.

2. EREMU MAGNETIKOAREN ITURRIAK

Beraz, emaitza esperimentalak aztertu ondoren, indar magnetikoak bi motatako sistemen artean sortzen direla ondorioztatuko genuke: imanak eta higitzen diren kargak (hau da, korronteak).

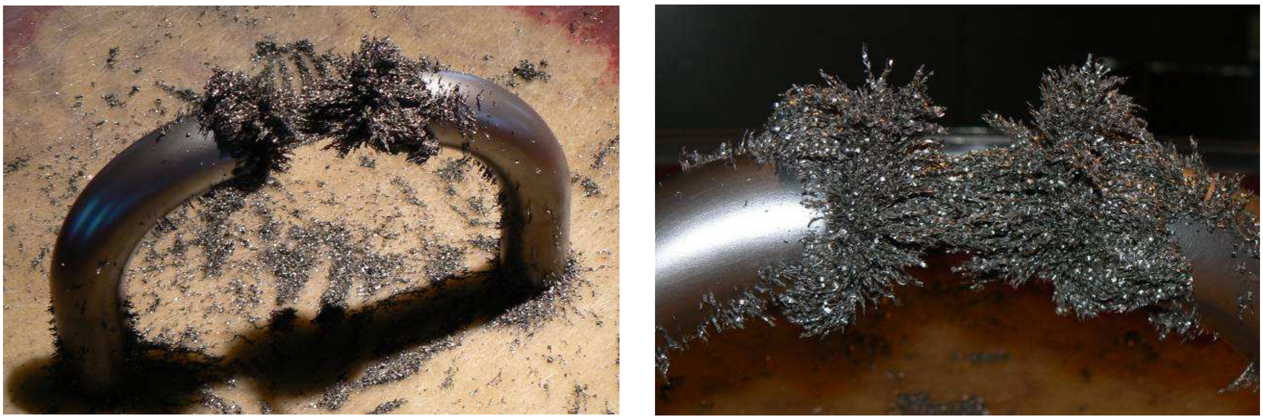
Aurreko gaietan egin genuen bezala, kasu horietan ere erabilgarria egingo zaigu kontuan hartzea imanek nahiz korronteek haien inguruko espazio-aldea eraldatzen dutela. Hori dela eta, beste iman edo korronte bat espazio horietan sartu ondoren, indar magnetikoak detektatzen ditugu. Hau da, bai imanek bai korronteek eremu magnetikoak sortzen dituztela esango dugu.

---

[27] *Hau ez da guztiz egia, aurrerago ikusiko dugunez.*

Baina, nola da posible bi iturri- mota izatea? Azalpena oso sinplea da: ez ditugu bi iturri -mota, baizik eta soilik bat! Hurrengo gaian ikusiko dugunez, imanak (eta ezaugarri magnetikoak dituzten beste materialak) higitzen diren kargez osatuta daude. Beraz, eremu magnetikoen iturriak higitzen diren kargak dira, besterik ez.

Nolakoak dira eremu magnetiko horiek? Burdinazko hautsak erabiliz jakin dezakegu. Hautsak indar magnetikoarekin lerrokatzen direnez[28] eremu magnetiko horien eremu-lerroak "ikustea" ez zaigu zaila egingo: hautsek eurek antolatzen dira eremu-lerro gisa. Esaterako, V.I irudian iman baten poloen arteko eremu-lerroak ikus ditzakegu. Irudian ikusten da argi eta garbi, karga elektrikoekin gertatzen den moduan, eremu-lerroak irteten eta sartzen direla polo horietatik. Hau da, iman baten poloak karga edo monopolo magnetikoak dira.



V.1.*irudia. Burdinazko hautsak iman baten bi poloen artean. Argi ikusten ditugu eremu-lerroak.*

Orain aztertuko dugu nolakoak diren eremu horiek beste sistemen gainean sortzen dituzten indarrak.

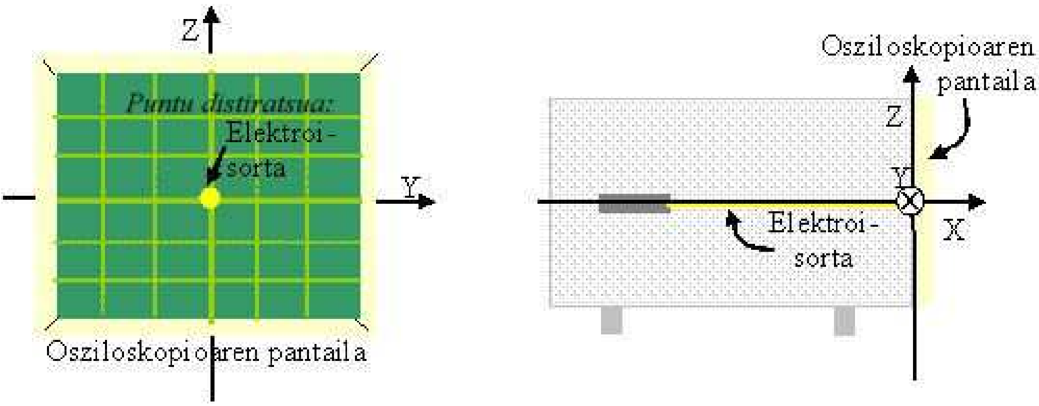
3. LORENTZ INDARRA

Korronteek edota higitzen diren kargek dituzten indar magnetikoak esperimentalki aztertzeko iman bat (eremuaren iturria) eta osziloskopioa (higitzen diren kargak) erabiliko ditugu. Imanak eremua sortuko du, eta osziloskopioaren elektroi- sorta, (pantailarekin talka egiten duena) izango da imanak sortutako indar magnetikoa jasaten duen sistema. Indarrak direla eta, desbideratuko dela espero

[28] *Pisua mespretxagarria delako, indar magnetikoekin alderatuta.*

dugu eta, hori gertatzean, pantailako puntu distiratsua ere desbideratuko da, jakina. Horrela jakingo dugu nolakoa den imanak sortaren gainean egindako indarra.

V.2.*irudia. Hodi -katodozko telebista pantaila bat. Oinarrizko funtzionamendua eta osziloskopioarena berdina da, gutxi gora-behera. Ikusten dugun kolore-patroia elektroiek pantailarekin talka egitean sortzen da. Imana hurbiltzean, elektroiak desbideratzen dira eta patroia aldatzen da*

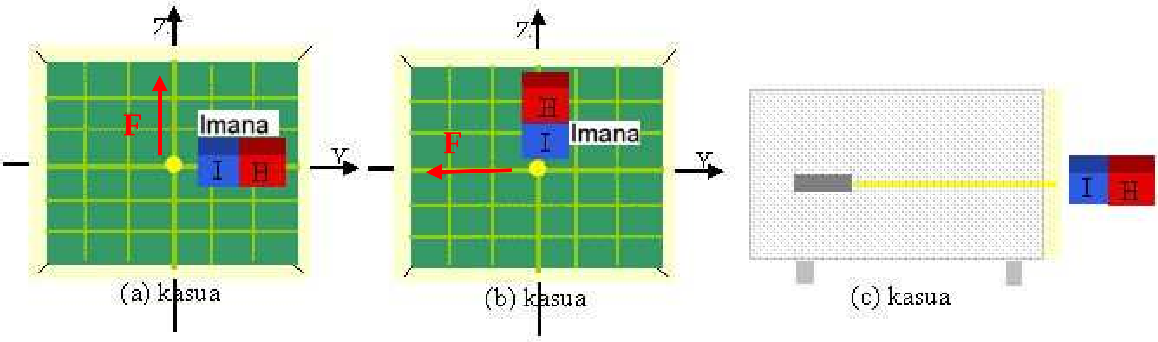


V.3. *irudia. Osziloskopio baten eskema. Pantailan ikusten dugu puntu distiratsu bat, elektroi sortak pantailarekin talka egiten duela adieraziz. Elektroi sorta X norabidean bideratu eta pantaila YZ planoan dugu.*

Hori egitean, honako fenomeno hauek ikusten ditugu (ikusi V.4 irudia):

- (a) kasua. Osziloskopioan sortzen den karga sortaren norabidea X ardatzarena bada eta imana +Y norabidean hurbiltzen bazaio, sorta desbideratzen da Z norabidean. Eta zenbat eta handiagoa izan kargen abiadura, orduan eta bortitzagoa da indarra. Indarra abiadurarekiko proportzionala da, beraz.

- (b) kasua. Orain imana +Z norabidean dugu, eta indarra -Y norabidean ezartzen da; berriro abiadurarekiko eta eremuarekiko proportzionala da.
- (c) kasua. Imana X norabidean badugu ez dago desbiderapenik; hau da, indarra nulua da.
- Kargak pausagunean daudenean, ez da indarrik agertzen.
- Indarra eremuaren magnitudearekiko proportzionala da.
- Indarra kargaren zeinuarekiko eta balioarekiko proportzionala da.

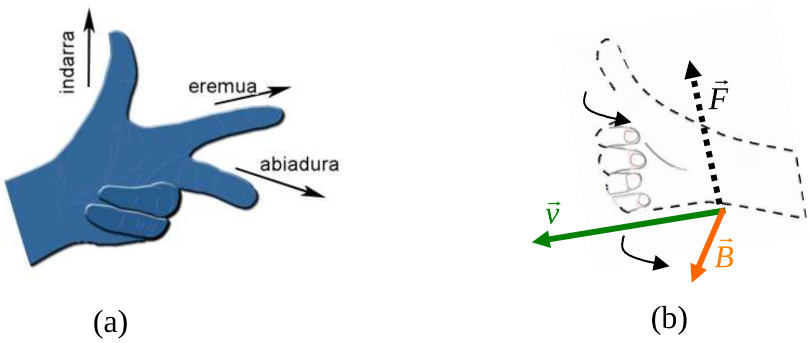


V.4. *irudia. Sortzen den indar magnetikoaren, eremuaren eta karga-abiaduraren arteko lotura.*

Beraz, honako erlazio hau ondorioztatzen dugu: $\vec{F}_m = q\vec{v} \wedge \vec{B}$. Biderketa bektoriala erabiliko dugu emaitza esperimentalak laburtzeko: indar magnetikoa abiaduraren nahiz kargaren mende dago eta, gainera, eremuarekiko nahiz abiadurarekiko elkarzuta da. Eremu magnetikoaren unitatea NSn tesla (T) da: 1 T = 1 Kg/C·s.

Espazio-alde batean, eta aldi berean, eremu elektrikoa nahiz eremu magnetikoa badaude, bi indarrak gainezartzen dira: $\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \wedge \vec{B}$. Erlazio horren izena *Lorentz indarra* da.

Biderketa bektorialaren bidez kalkulatzen dugu bektore bat, eta, noranzkoa eta norabidea zein diren jakiteko, hainbat lege ditugu. V.5 irudian ikus ditzakegu haietariko bi.



V.5. *irudia. Biderketa bektorialean erabiltzeko arauak. (a) Ezkerreko eskuaren legea: hatz erakuslea eta luzea eremuaren eta abiaduraren norabideetan hurrenez hurren kokatu ondoren, erpuruak adieraziko du indarraren norabidea eta noranzkoa. (b) Eskuineko eskuaren legea: erpurua izan ezik, beste atzamarrak biratzen ditugu abiaduratik indarrerantz. Erpuruak adierazten du, orduan, indarraren norabidea eta noranzkoa.*

4.KORRONTE BATEN GAINEKO INDARRA

Eroale batean dabilen korrontea higitzen diren kargez osatuta dagoenez, eremu magnetiko baten barruan indarrak dituzte. Indar horiek kalkulatzeko eroalearen zati diferentzial baten gainean egiten den indarra kalkulatzen hasiko gara.

Zati horietan higiduran dagoen karga $dq = idt$ da. Eta kargen abiadura[29]

Elektroiaren karga-masa erlazioa

Thompsonek garrantzi handiko esperimentuak gauzatu zituen materiaren izaera hobeto ulertzeko. 1897an abiadura-hautagailu bat erabili zuen elektroiaren karga-masa erlazioa neurtzeko. Hau da, elkarrekintza elektrikoa eta magnetikoa aldi berean erabili zituen. Hasteko, potentzial-diferentzia zehatz bat ezarri zien elektroiei eta azeleratu egin zituen. Amaierako abiadura kalkula dezakegu energia-kontserbazioa erabiliz:

$$\Delta E_z = -\Delta E_p \Rightarrow \frac{1}{2}mv^2 = q\Delta V \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2q\Delta V}{m}}$$

non q eta m elektroiaren karga eta masa baitira, hurrenez hurren, eta ΔV erabilitako tentsioaren balioa. Behin azeleratuta, beste espazio-alde batera iritsi ziren. Alde horietan eremu elektriko bat eta beste eremu magnetiko bat gainezarri zituen. Elektroiak ez desbideratzeko egokitu zituen, hau da, honako erlazio hau bete zen:

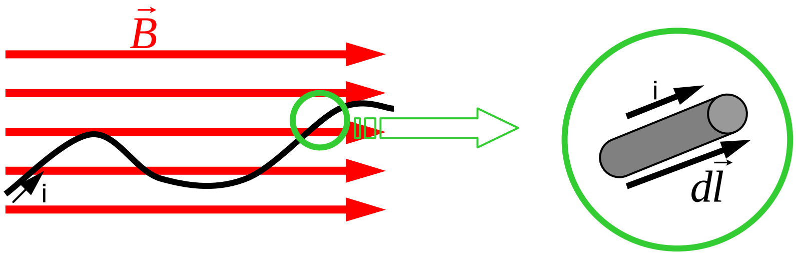
$$v = \frac{E}{B} = \sqrt{\frac{2q\Delta V}{m}} \Rightarrow \frac{q}{m} = \frac{E^2}{2B^2\Delta V}$$

non E eta B erabilitako eremu elektrikoaren eta magnetikoaren balioak baitira. Lehen emaitza $0{,}77.10^{11}$ C/Kg izan zen. Gaur egun beste balio zehatzago bat ($1{,}759.10^{11}$ C/Kg) erabili arren, oso emaitza garrantzitsua izan zen garai hartan. Eta elektroiak partikula ziren frogatzat hartu zuten.

[29] *Badakigu hori ez dela karga bakoitzak duen abiadura, baizik eta jito-abiadura. Baina hurbilketa egokia da kalkulu hori garatzeko.*

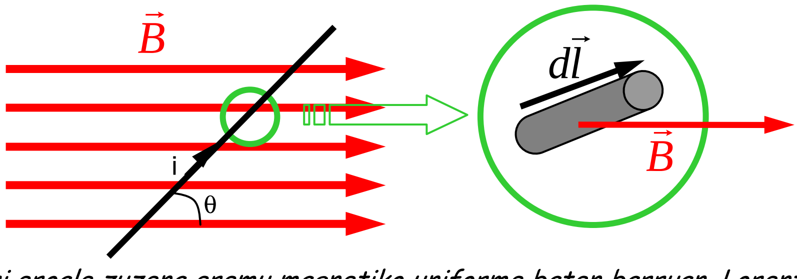
$\vec{v} = \dfrac{d\vec{l}}{dt}$ (ikusi V.6 irudia). Beraz, Lorentz indarra erabil dezakegu horrela:

$$\vec{F} = dq\vec{v} \wedge \vec{B} \Rightarrow \vec{F} = (idt)\left(\frac{d\vec{l}}{dt} \wedge \vec{B}\right) = id\vec{l} \wedge \vec{B}$$



V.6.*irudia. Hari eroale bat eremu magnetiko baten barruan. Lorentz indarra erabiliko dugu hariaren zati- diferentzial baten gaineko indar magnetikoa kalkulatzeko.*

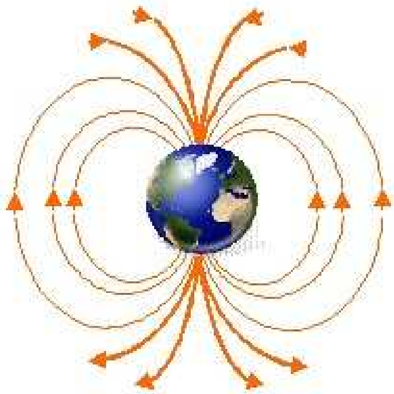
Hori higiduran dauden kargen gaineko indarra da, baina ez hariaren gainekoa! Zergatik mugitzen da, orduan, haria? Kontuan hartu behar dugu harian, elektroiez gain, protoiak ere badaudela. Protoiek, ia geldiunean daudenez, ez dute indar magnetikorik, baina protoien eta elektroien arteko indar elektrikoak bai. Eremu elektriko horien ondorioak magnetikoarenak baina indartsuagoak direnez, hari osoa bultzatzen dute.



V.7.*irudia. Hari eroale zuzena eremu magnetiko uniforme baten barruan. Lorentz indarra erabiliko dugu hariaren zati- diferentzial baten gaineko indar magnetikoa kalkulatzeko*

Van Allen gerrikoak

Lurrak eremu magnetiko bat sortzen du, imanen antzekoa: ipar-polo bat eta hego-polo bat agertzen dira. Batzuetan, espazioan zehar higitzen diren partikula kargatu batzuk (izpi kosmikoak izenekoak, izarretan eta izar artean gertatzen diren prozesuetan sortuak direnak) Lurraren eremu magnetikoan harrapatuta geratzen dira. Haien abiadura ez da eremutik ihes egiteko bezain azkarra eta eremuaren lerroak inguratzen dituzten ibilbide kiribilak osatzen dituzte. Eskuarki ez dira sartzen atmosferan, Lurraren gainazaletik oso urrun daude eta.



Partikulak harrapatuta geratzen dira eremu magnetikoan eta, indar magnetikoak direla eta, polo batetik bestera oszilatzen dira. Higidura hori etengabe errepikatzen da poloen artean, espazioko alde mugatu batean. Alde horiek Van Allen gerrikoak izena dute.

Bi Van Allen gerriko daude. Bata protoiarena da (batez besteko altuera 3000 Km) eta bestea elektroiarena (15000 Km). Dentsitatea, gutxi gorabehera, 105 partikula/cm^3 da. Poloen inguruetan, eremua areagotu eta atmosferara sartzen da. Partikula batzuek, eremuari atxikiz, atmosferan sartu eta airearen atomoak kitzikatzen dituzte. Orduan, aurorak gertatzen dira, borealak nahiz australak.

Eskuarki, erabiltzen ditugun hariak ez dira hain txikiak edota zuzenak. Kalkulu integralaren bidez indarraren ezaugarriak aurresaten ahal ditugu kasu guztietan. Betiko moduan, haria zati diferentzialetan banandu, zati diferentzial bakoitzaren gaineko indarra zehaztu, eta erakarpen guztiak integratuko ditugu.

Adibide gisa, eremu uniforme baten barruan dagoen hari zuzenaren gaineko indarra kalkulatuko dugu. Hariaren zati diferentzial bakoitzean indarra kalkulatu ondoren, integral baten bidez kalkula dezakegu ondoriozko indarraindar erresultantea erresultantea. Eremua uniformea denez: $d\vec{F}_m = id\vec{l} \wedge \vec{B} = -iBdl\sin\theta\hat{k}$ (ikusi V.7 irudia), eta integralaren ebazpena hauxe da:

$$\vec{F} = \int_L d\vec{F}_m = \int_L -iBdl\sin\theta\hat{k} = -iB\sin\theta\int_L dl\hat{k} = -iB\sin\theta L\hat{k} = i\vec{L} \wedge \vec{B}$$

non kontuan hartu baitugu eremua uniformea dela. Eta $\vec{L}$ bektorea korrontearen noranzkoa eta norabidea eta hariaren luzera duen bektorea da.

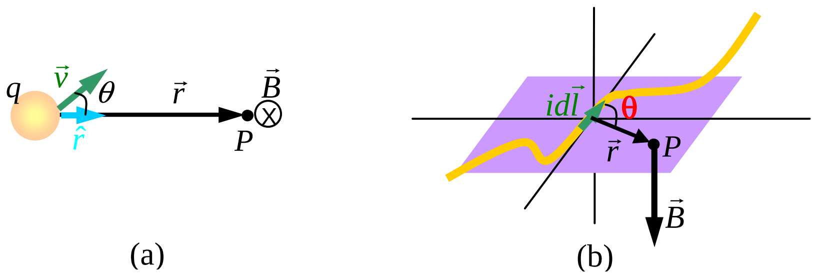
5. BIOT-SAVART LEGEA. APLIKAZIOAK

Eremu magnetikoak beste sistema batean duen eragina aztertu dugu, baina, nola kalkula dezakegu eremua bera eremuaren iturria ezaguna bada?. Biot-Savarten legea[30] erabiliz. Lege horren arabera, $\vec{v}$ abiaduraz higitzen ari den q karga batek sortzen duen eremua honako hau da (ikusi V.8 irudia):

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} q \frac{\vec{v} \wedge \vec{r}}{r^2}$$

non $\frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7} \frac{Tm}{C\, m/s}$ baita

Karga berak, aldi berean, eremu elektriko bat sortzen dua, jakina. Eremuaren iturria korrontea bada, legea horrela moldatzen ahal dugu horrela: $dq = id\vec{l} \Rightarrow d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{id\vec{l} \wedge \vec{r}}{r^2}$. Hurrengo pausua, jakina, integrazioaren bidez erakarpen guztiak kontuan hartzea da.



V.8.*irudia. Biot-Savarten legea. (a) Karga puntual batek sortutako eremua; (b) korrontearen zati-diferentzialak sortutakoa*

5.1. Korronte zuzenak sortutako eremua

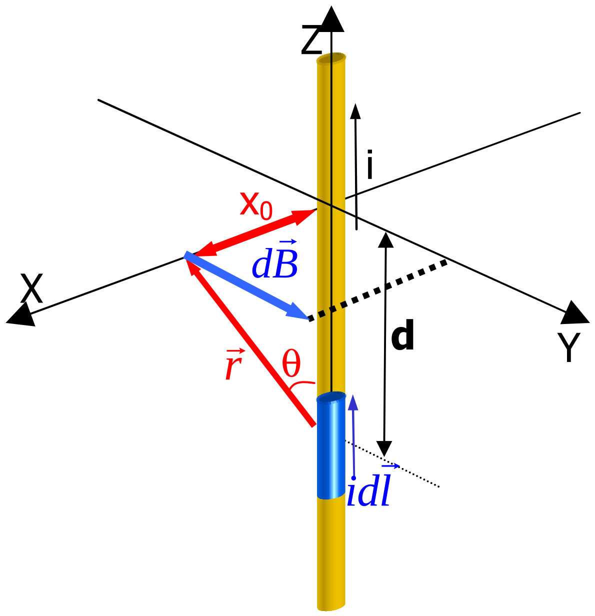
Biot-Savarten legea erabiliko dugu korronteek sortutako eremuak kalkulatzeko. Lehen aipatu dugunez, hariaren edozein zati diferentzial batek sortutako eremua kalkulatu ondoren, integrala ebatziko dugu. Zati diferentzialaren eremua (ikusi V.9 irudia) hauxe da, beraz:

$$d\vec{B} = dB\hat{j}$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{id\vec{l} \wedge \hat{r}}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{idz}{r^2} \sin\theta \, \hat{j} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i \sin\theta}{r^2} dz\hat{j}$$

---

[30] *Historian zehar, aztertu zen lehen arazoa korronteen arteko indarra zen, eta, hori egin ondoren, lege hori ondorioztatu zuten.*



V.9.*irudia. Hariaren zati diferentzial batek sortutako eremu magnetikoa*

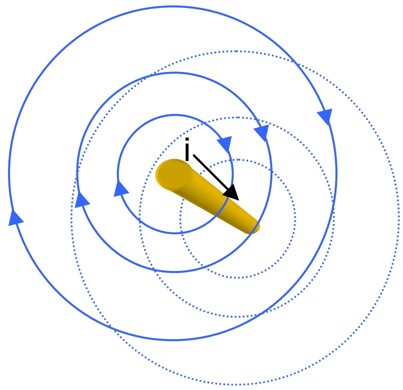
Orain, zati diferentzialen erakarpen guztiak integratu, besterik ez dugu egin behar:

$$\left.\begin{aligned} dB &= \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i\sin\theta}{r^2}dz \\ r &= \sqrt{z^2+d^2} \\ \sin\theta &= \frac{d}{r} \end{aligned}\right\} \Rightarrow dB = \frac{\mu_0}{4\pi} d \frac{idz}{\left(d^2+z^2\right)^{3/2}} \Rightarrow B = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{\mu_0}{4\pi} d \frac{idz}{\left(d^2+z^2\right)^{3/2}}$$

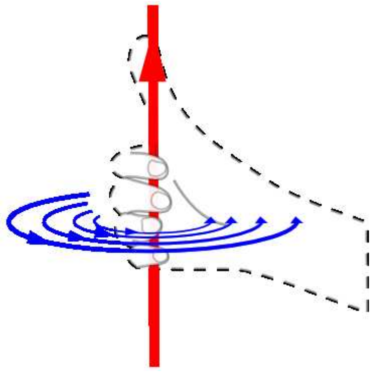
non L hariaren luzera baita. Behin iIntegrala planteatuta ondoren, ebazpena garatuko dugu:

$$B = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{\mu_0}{4\pi} d \frac{idz}{\left(d^2+z^2\right)^{3/2}} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} d \int_{-L/2}^{L/2} \frac{dz}{\left(d^2+z^2\right)^{3/2}} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} d \left[\frac{z}{d^2\sqrt{d^2+z^2}}\right]_{-L/2}^{L/2} = \frac{\mu_0 i}{4\pi d}\frac{L}{\sqrt{\left(L/2\right)^2+d^2}}$$

Luzera oso handia bada, edota *d* distantzia mespretxagarria *L* luzerarekin alderatuta, emaitza sinplifikatzen da: $B = \frac{\mu_0 i}{2\pi d}$. Simetria dela eta, *d* distantzian dauden puntu guztietan berdina da eremuaren balioa berdina da, eta norabidea harian zentroukidea den zirkuluaren ukitzailearena da (ikusi V.10 irudia). Ondorioz, eremu- lerroak itxiak dira, harian zentroukideak eta biribilak.



V.10.*irudia. Hariak sortutako eremuaren lerroak*



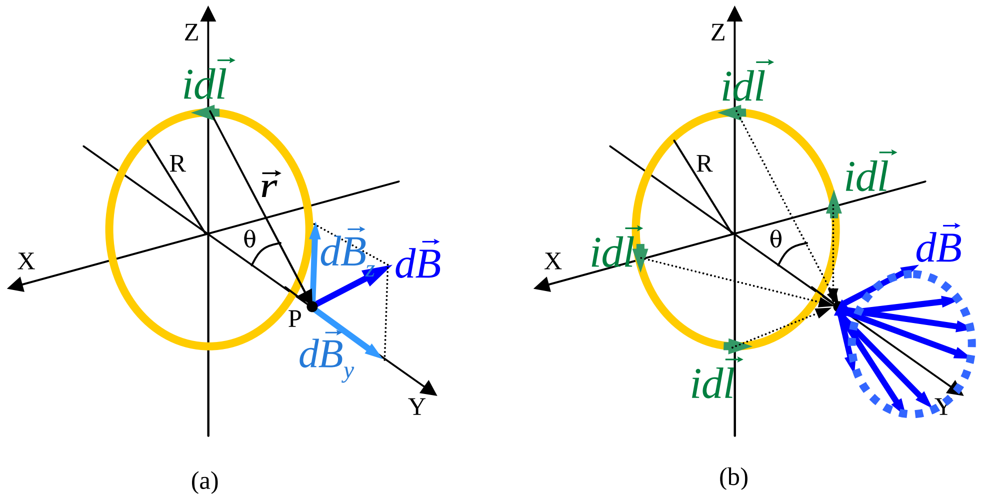
V.11. *irudia. Eskuineko legea. Nola jakin korronteak sortutako eremuaren noranzkoa.? Erpurua korrontearekin lerrokatu ondoren, beste atzamarrak kurbatzean izango dugu eremuaren noranzkoa, atzamarrek adierazitakoa, hain zuzen.*

Eta eremuaren norabidea jakiteko, eskuineko eskuaren legea oso erabilgarria da eskuineko eskuaren legea: eskuaren hatz lodia intentsitatearen norabidean eta noranzkoan ipini ondoren, eskuaren beste atzamarrak eremuaren noranzkoan makurtzen dira.

5.2. Espirak sortutako eremua

Kasu horietan, erraz samarra da harilaren ardatzean eremua kalkulatzea erraz samarra da. Berriro hasiko gara zati diferentzial bat aztertzen (ikusi V.12 irudia):

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{id\vec{l}\wedge\hat{r}}{r^2} \Rightarrow dB = \frac{\mu_0}{4\pi}i\frac{dl}{\left(y^2+R^2\right)^2}$$



V.12.*irudia. Espirak sortutako eremua. (a) Zati diferentzial batek sortutako eremua. (b) Erakarpen guztiak kono baten azalean kokatzen direnez, eremuen Y osagaiak izan ezik, besteek elkar deuseztatzen dute.*

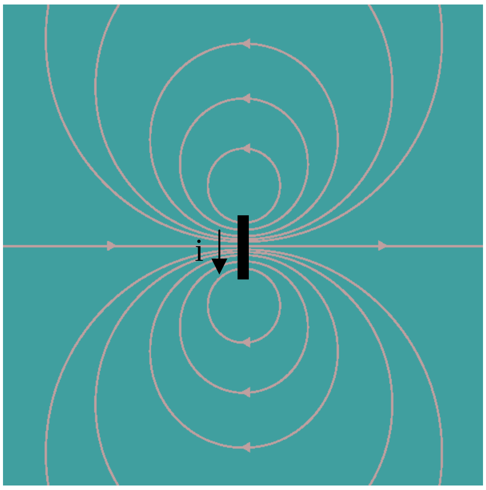
Beste edozein zati diferentzialek sortutako eremua kontuan hartzen badugu, eremuaren norabidea bestea da. Baina erakarpen guztiak batera irudikatzen baditugu, ikus dezakegu eremuaren z osagaiek elkar deuseztatzen dutela ikus dezakegu, eta, ondorioz, bakarrik y osagaiak bakarrik kalkulatu eta integratu behar ditugu. Hau da:

$$dB_y = \frac{\mu_0}{4\pi}i\frac{dl}{\left(y^2+R^2\right)^2}\sin\theta$$

$$B_y = \int_{espira}\frac{\mu_0}{4\pi}i\frac{dl}{\left(y^2+R^2\right)^2}\sin\theta = \frac{\mu_0}{4\pi}i\frac{\sin\theta}{\left(y^2+R^2\right)^2}\int_{espira}dl = \frac{\mu_0}{4\pi}i\frac{\sin\theta}{\left(y^2+R^2\right)^2}2\pi R = \frac{\mu_0 iR^2}{2\left(y^2+R^2\right)^{3/2}}$$

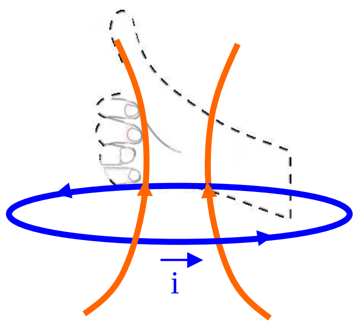
non kontuan hartu baitugu $\sin\theta = \dfrac{R}{\sqrt{y^2+R^2}}$ dela

Kalkulu zehatzagoa (eta konplexuagoa) egin behar dugu edozein puntutan eremua ezagutzeko. Irudian ditugu eremu- lerroak. Begi-bistan dago imanen antza dutela.



V.13. *irudia. Espirak sortutako eremu-lerroak*

Kasu horietan ere, eskuineko eskuaren legea erabili dezakegu espirak sortutako eremuaren noranzkoa zehazteko (ikusi V.14 irudia).



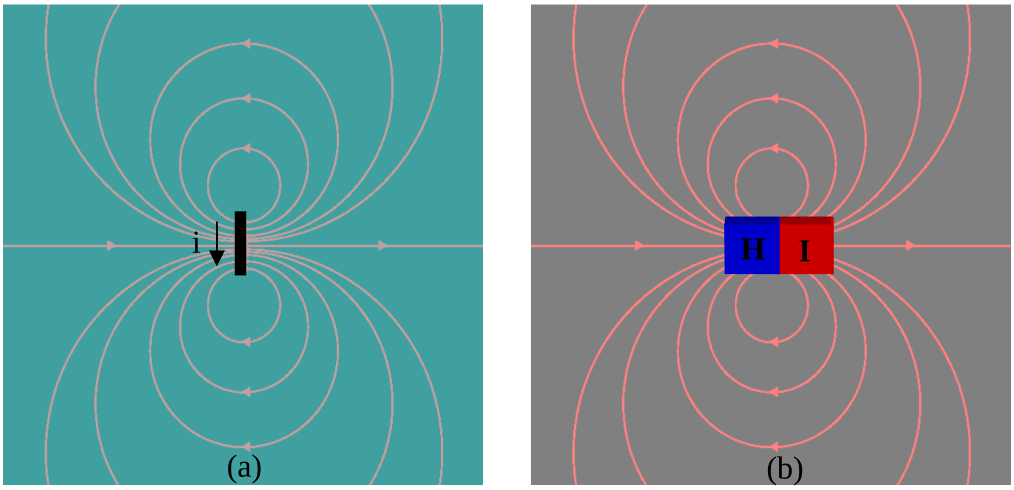
V.14. *irudia. Eskuineko eskuaren legea. Erpuruak adierazten du eremuaren noranzkoa behin beste atzamarrak espiran dabilen korrontearen noranzkoan kurbatuta*

6. GAUSSEN LEGEA MAGNETISMOAN

Eremu elektrikoa aztertzean, Gaussen legearen garrantzia ikusi genuen. Lege horrek fluxu elektrikoaren eta kargaren erlazioa adierazten du. Egiten ahal dugu gauza bera eremu magnetikoaren kasuan?

Bi eremu alderatzen baditugu, diferentzia bat ikusten dugu: eremu magnetikoaren lerroak itxiak[31] dira (bestela esanda, errotaziozkoa da) eta eremu elektrikoarenak ez. Eremu elektrikoaren lerroak hasi eta amaitu egiten dira karga elektrikoetan.

Lerro itxiak sortzen dituen eremu elektriko bat aztertu genuen, dipolo elektrikoak sortutakoa. Imanek sortutako eremuak, besteak beste, dipolo elektrikoaren antza du. Hau da, orain arte aztertu ditugun eremu magnetikoak "dipolo magnetikoek" sortuak direla esan dezakegu. Karga elektrikoen antzekoak diren karga magnetikoak egongo balira, eremu magnetikoak ere hasiera eta amaiera izango luke kargetan.



V.15.*irudia. Dipolo magnetiko batzuek sortutako eremuak. (a) Korronte-espira batek sortutakoa, (b) iman batek sortutakoa*

Nahiz eta karga edo monopolo magnetikoak aurkitzeko ikerketa asko egin, ez dituzte aurkitu[32]. Beraz, monopolo magnetikorik ez dagoela ondorioztatzen dugu, eta Gaussen legea magnetismoan horrela adierazten dugu:

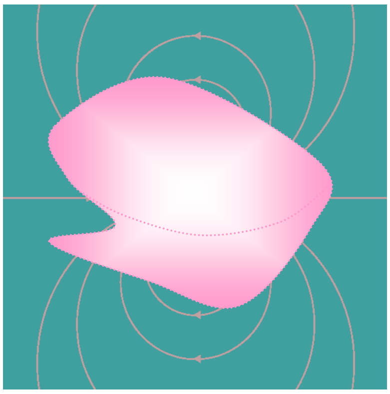
$$\oint_S \vec{B}d\vec{A} = 0$$

Fluxu magnetikoaren unitatea (NSn) *weberra* da: $1\text{Wb} = 1\text{Tm}^2$

---

[31] *Imanak, nahiz eta kontrakoa irudi, ez dira salbuespena: eremu- lerroak barruan luzatzen dira- eta.*
[32] *Iman bat erdibitzen badugu, ez ditugu bi polo banatuak sortuko, baizik bi dipolo magnetiko berriro.*

Hau da, gainazal batetik irteten diren eremu-lerro bakoitza, beste gainazalaren puntu batetik sartuko da, eremu-lerroak mugatzen dituen monopolo magnetikorik ez dagoelako.



V.16.*irudia. Eremu- lerroak eta fluxua. Dipolo magnetiko baten eremu-lerroak ditugu. Edozein gainazal itxia aukeratuta, irteten diren lerro- kopurua bera irteten eta sartzen direna berdinak dira. Fluxua, beraz, zero da.*

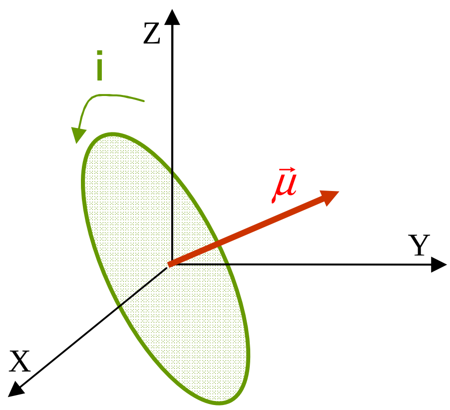
*7.*MOMENTU DIPOLAR MAGNETIKOA

Orain ikusi dugunez, elkarrekintza magnetikoetan dipolo magnetikoak ditugu. Elkarrekintza elektrikoan antzekoa den sistema bat aztertu genuen: dipolo elektrikoa, hau da, $+q$ eta $-q$ kargez osatutako sistema bat, bi kargak bata bestetik l distantziakra baztertuta.

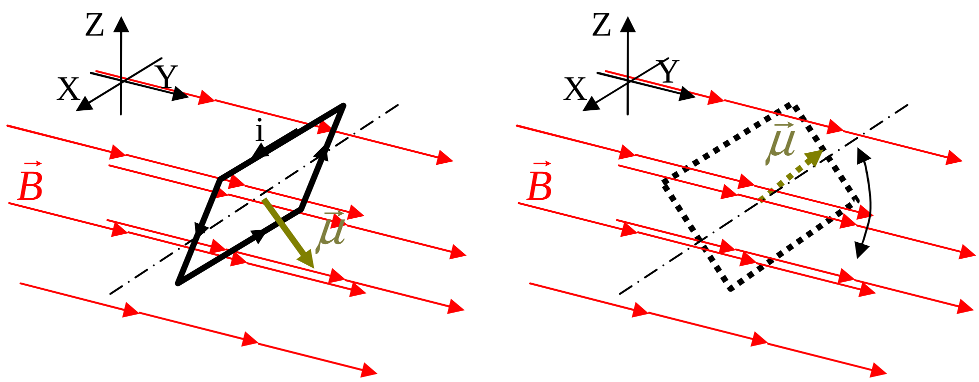
Dipolo elektrikoak bereizteko momentu dipolarra erabili genuen: $\vec{p} = q\vec{l}$ bektorea, non $\vec{l}$ dipoloaren kargak lotzen dituen bektorea eta q kargaren balioa baitira. Parekotasunari atxikiz, antzekoa den momentu dipolar magnetiko bat definitzen ahal dugu: $\vec{\mu}$ bektorea. Espiraren kasuan balioa hauxe da: $\vec{\mu} = i\vec{A}$, non i espiraren korrontea eta $\vec{A}$ espiraren azalera-bektoreak baitira (ikusi V.17 irudia).

Dipolo magnetikoaren jokabideak elektrikoaren antza handia du. Elektrikoari gertatzen zaion bezala, momentu dipolar bat, eremu magnetiko baten barruan sartuta, eremuarekin lerrokatzen saiatuko da. Esaterako, demagun biratzen ahal den korronte-espira bat elektroiman batek sortutako eremuan sartu dugula. Zer gertatuko zaio espirari?

Eremuarekin lerrokatuta badago, ez du indar magnetikorik jasango,; hori dela eta, horixe oreka-posizioa deritzogula esaten dugu. Baina oreka-posiziora iristeko, dipoloa azeleratu egin da elkarrekintza magnetikoaren mende, eta abiadura batez heldu da. Ondorioz, ez da geldirik geratuko, biratzen jarraituko du, baina, orain, balaztatzen: gelditu eta gero berriro orekara -posiziora itzuliko da, posizioa gainditu eta berriro balaztatzen hasiko da. Hau da, higidura oreka-posizioarekiko oszilazioa da.



V.17.*irudia. Espiraren momentu dipolar magnetikoa*



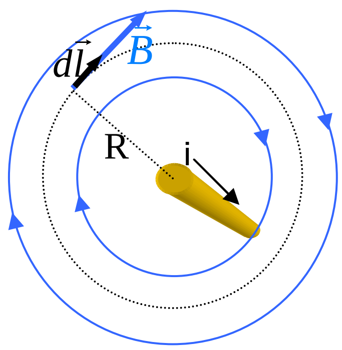
V.18.*irudia. Espira eremu magnetiko batean sartuta. Hasiera batean, momentu dipolar magnetikoa eta eremua ez daude lerrokatuta, espira hasiko da biratzen, momentua eremuarekin lerrokatzen saiatuz. Oreka-posizioa gainditu ondoren, balaztatzen hasiko da, kontrako noranzkoan berriro biratzen hasi arte. Oszilatzen aurkituko dugu.*

Iparrorratzekin antzekoa gertatzen da: iparrorratza beste momentu dipolar magnetiko bat denez, bere joera eremu magnetiko batekin lerrokatzea da, besteak beste, Lurrak sortutakoarekin . Beraz, bere ipar-poloa Lurraren hego-polo magnetikora begira geratzen da. Egia esateko, Lurraren ipar-polo geografikoa ez datoz bat hego-polo magnetikoarekin, desbideraketa txiki bat dago haien artean. Faktore hori adierazten da, esaterako, mapa topografikoetan, oso zehatza den kokapena egin behar baditugu kontuan hartzeko eta norabidea zuzentzeko. Baina gutxitan da funtsezkoa horrelako doitasunik.

Beste aldetik, Lurrak sortutako eremu magnetikoa aldakorra da, noizbehinka alderantzikatu egitzen da. 3,6 milioi urtetan 9 alderantzikatze gertatu dira. Zergatia Lurraren nukleo magnetikoan datza. Dirudienez biratu egiten da, baina ez dakigu fenomeno horren arrazoia zein den. Datazio- tekniko bat, paleomagnetismo izenekoa, fenomeno horietan datza. Hurrengo irakasgaian aurkituko dugu bere funtsa, baino gakoa hauxe da: eremu magnetikoaren noranzkoa grabatzen dela material batzuetan, garai hartako eremu magnetikoaren norabidea zein zen adieraziz eta geuri jakinaraziz

8. AMPEREREN LEGEA. APLIKAZIOAK

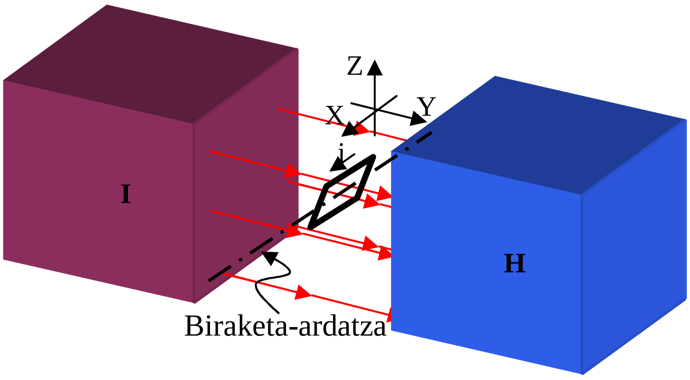
Eremu elektrikoaren izaera kontserbatzailea dela eta, potentzial funtzioa definitu genuen. Kontserbatzailea izango da eremu magnetikoa? Erantzuna aurkitzeko adibide bat aztertuko dugu: korronte zuzenak sortutako eremua.



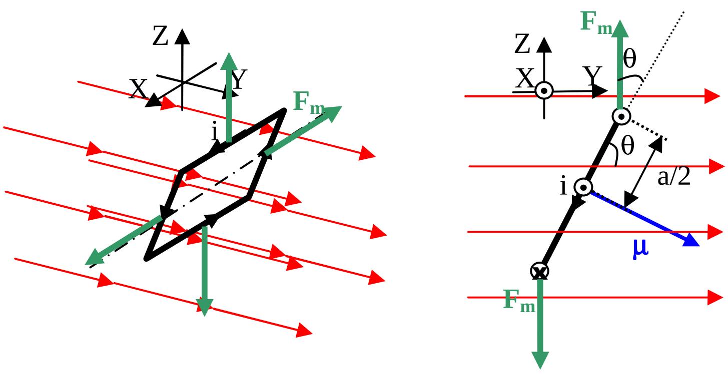
V.19.*irudia. Korronte-haria eta Ampere legea*

Adibidea: espira bat eremu magnetiko baten barruan

Espira baten higidura zehatzago azter dezakegu. Demagun irudiko egoera dugula: espira karratu bat, a aldea duena, iman batek sortutako eremu magnetikoaren barruan. Eremua uniformea eta espiran dabilen intentsitatea i dira.



Espira-alde bakoitzaren gaineko indar magnetikoek, balio bera izan arren, norabide ezberdina dute. Haietariko bik ez dute higidurarik sortzen (X norabidea dutenak), espira desitxuratzeko joera bakarrik dute, baina espira zurruna da. Z norabidea dutenek bai, indar-momentu bat sortzen dute eta, horren ondorioz, espira biratzen hasiko da biraketa-ardatzaren inguruan.



Indar-momentua, bi indar horien momentuen batura da: $\vec{M} = 2\vec{r} \wedge \vec{F}_m = 2\dfrac{a}{2} F_m \sin\theta \hat{k} =$

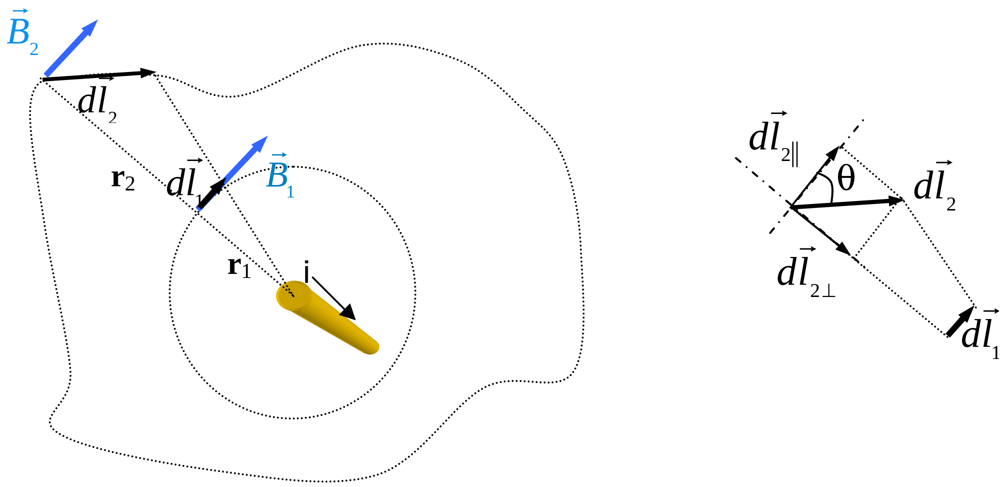
$= a(iaB)\sin\theta\hat{k} = ia^2 B \sin\theta \hat{k} = \vec{\mu} \wedge \vec{B}$. *Eta espira biratzen hasiko da erloju-orratzen kontrako noranzkoan, θ angelua handituz. Espiraren joera da, hasiera batean bere momentua eremuarekiko paraleloa ez bada, indar-momentuaren mende biratzen hastea, momentu dipolarra eremuarekiko lerrokatzen saiatuz. Oreka-posizio horietan, espiraren momentua eta eremua elkarren paraleloak direnez, espirak ez du indar-momenturik; baina ω abiaduran iritsi denez, biratzen jarraituko du, biraketaren kontrako beste indar-momentu bat jasanez; eta, ondorioz, balaztatzen hasiko da.*

Ibilbide itxi bat erabiliz, ibilbide zirkular bat esaterako, eremu magnetikoaren zirkulazioa kalkulatuko dugu. $\vec{B}$ eta $d\vec{l}$ bektoreak paraleloak izateaz gain, eremuaren magnitudea berdina da zirkuluaren puntu guztietan, guztiak hariarekiko *R* distantzian daudelako eta hariak sortutako eremua *R* distantziaren mende dagoelako, jakina. Integralaren ebazpena hauxe da, beraz:

$$\oint_C \vec{B}d\vec{l} = \oint_C Bdl = \oint_C \frac{\mu_0 i}{2\pi R} dl = \frac{\mu_0 i}{2\pi R} \oint_C dl = 2\pi R \frac{\mu_0 i}{2\pi R} = \mu_0 i$$

$$\oint_C \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 i$$

Ondorioz, eremu magnetikoa ez da kontserbatzailea! Horrela izango balitz, emaitza zero izango litzateke. Emaitza *R* erradiorekiko askea da, hau da, aukeratu dugun borobilaren tamainarekiko askea. Kuriosoa Bitxia den arren, emaitza bera lortuko dugu edozein ibilbide aukeratuta,; V.20 irudikoa, esaterako.



V.20.*irudia. Korronte-haria eta Ampere legea: ibilbide ez-zirkularra*

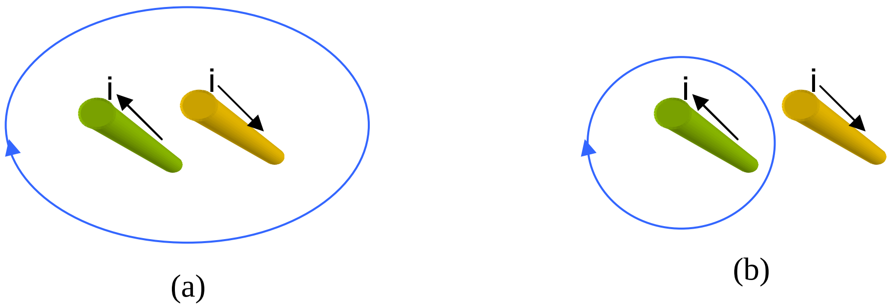
Irudiko triangeluak antzekoak direla kontua hartuta, honakourrengo erlazio hau dugu: $\frac{dl_{2\parallel}}{dl_1} = \frac{dl_2 \cos\theta}{dl_1} = \frac{r_2}{r_1}$. Beraz:

$$\left.\begin{array}{r}\vec{B}_2 d\vec{l}_2 = B_2 dl_2 \cos\theta = B_2 \dfrac{r_2}{r_1} dl_1 \\ \dfrac{B_2}{B_1} = \dfrac{r_1}{r_2}\end{array}\right\} \Rightarrow \vec{B}_2 d\vec{l}_2 = B_1 dl_1 = \vec{B}_1 d\vec{l}_1$$

Hau da, emaitza bera dugu edozein ibilbide itxia erabilita! Emaitza horri Ampereren legea deritzo:

$$\oint_C \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 i_{garbia}$$

non i_{garbia} integral-ibilbideak mugatutako azalera zeharkatzen duen intentsitate orokorra baita.



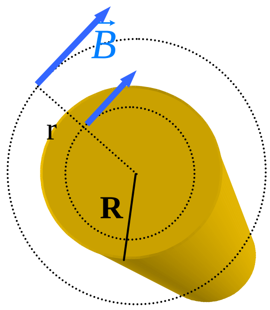
V.21.*irudia. Ampere legea eta intentsitate garbiak. (a) kasuan i_{garbia} = 0, baina (b) kasuan, berriz, i_{garbia} = -i, nahiz eta sistema bera izan. Kontuan hartu dugun ibilbidea ezberdina da, eta ibilbideak mugatutako azalera zeharkatzen duen intentsitatea ezkerrekoa bakarrik da. Gainera, ibilbidea geziak adierazitako noranzkoan osatu dugunez, intentsitatea negatiboa da. Positiboa edo negatiboa den jakiteko berriro eskuineko eskuaren legea erabiliko dugu: erpurua izan ezik beste atzamarrak ibilbidearen noranzkoan biratzen baditugu, erpuruak adierazten du intentsitate positiboaren noranzkoa. Beraz, (a) kasuan zirkulazioa zero da eta (b) kasuan $-\mu_0 i$ dugu.*

8.1. Korronte-hariaren barruko eremu magnetikoa

Hariaren simetria zilindrikoaren ondorioz, eremu magnetikoaren norabidea, hariaren kanpoan nahiz barruan, hariaren ardatzean zentroa duen zirkuluarekiko ukitzailearena da, hariaren kanpoan nahiz barruan. Magnitudea, ordea, hariaren ardatzetik dagoen distantziaren arabera aldatzen da.

Ampere legea erabiliko dugu eremuaren magnitudea zehazteko. Lehenik eta behin, integrala garatzeko egokia den ibilbide bat aukeratuko dugu, hau da, kalkuluak errazten zaizkigun dizkigun ibilbidea. Kasu horietan *r* erradioko zirkulua (ikusi V.22 irudia) erabiliko dugu. (Gogora ezazu aurreko atalean hariak sortutako eremuaren zirkulazioa kalkulatzeko egindako kalkulua). Emaitza hauxe da:

$$\oint_C \vec{B}d\vec{l} = \oint_C Bdl = B\oint_C dl = 2\pi rB$$



V.22.*Korronte-haria eta eremu magnetikoaren norabidea kanpoko nahiz barruko espazio-aldeetan.*

Zenbatekoa da integral-ibilbideak mugatutako azalera zeharkatzen duen intentsitate garbia hariaren barruko espazio-aldean? Distantziaren araberakoa denez r distantziaren mende dago eta $\vec{j}$ korronte-dentsitatea erabiliko dugu kalkulatzeko,. Horrela:

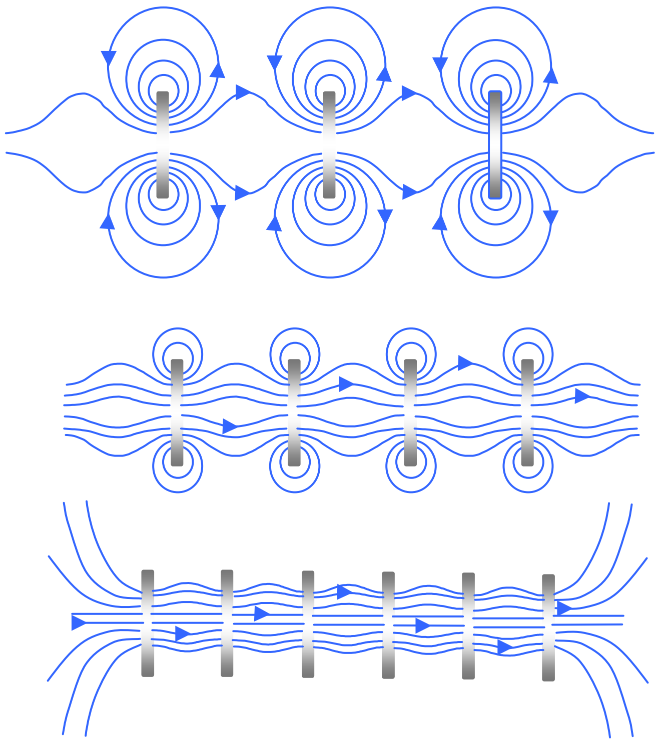
$\left|\vec{j}\right| = \dfrac{i}{\pi R^2}$, non R hariaren erradioa baita. Beraz: $i_{garbia} = j\pi r^2 = i\dfrac{\pi r^2}{\pi R^2} = i\dfrac{r^2}{R^2}$

Ondorioz: $\oint_C \vec{B}d\vec{l} = 2\pi rB = \mu_0 i\dfrac{r^2}{R^2} \Rightarrow B = \mu_0\dfrac{2\pi i}{R^2}r$. Eta hariaren barruko eremuaren jokabidea eta kanpokoarena oso bestelakoak dira, ikusi 5.2 atalean ondorioztatu dugun emaitza.

8.2. Solenoidea

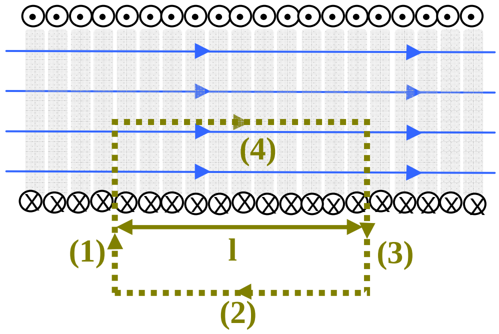
Solenoideak sortzen duen eremu magnetikoak eta kondentsadoreak sortzen duen eremu elektrikoak ezaugarri berdin bat dute: eremua mugatuta dagoela espazioaren alde batean. Solenoidea (harila) hari bat hariltzen gauzatzen da. Sekzio zirkularra du eskuarki, eta askotan hartuko dugu kontuan luzera infinitua dela, hau da, luzerarekin alderatuta, sekzioaren erradioa oso txikia dela.

Eremua kalkulatu nahi dugu. Lehenik eta behin, solenoideak sortutako eremu magnetikoa kualitatiboki aztertuko dugu. Espirak bata bestetik oso hurbil daudenez, kanpoan haien eremuak elkar deuseztatzen dute, baina barruan gehitu egiten dira. Beraz, solenoidetik kanpo oso eremu txikia dago, hondakinezkoa, baina barruan, bortitza da, eta solenoidearen ardatzarekiko paraleloa da. Noranzkoa ezagutzeko, berriro eskuineko eskuaren araua erabiliko dugu berriro, espiraren kasuan bezala.



V.23.*irudia. Espiren eremuak gainezarriz. Bata bestearen atzean kokatuz harila bat osatzen dugu. Begi-bistan dago barruko eremua uniformea eta kanpokoa mespretxagarria direla, hurrenez hurren.*

Behin norabide eta noranzkoa ezagunak izanda, Ampereren legea erabili eta eremuaren magnitudea zehaztuko dugu. Irudiko ibilbidean zehar eremuaren zirkulazioa kalkulatuko dugu:



V.24.*irudia. Solenoidean Ampereren legea erabiltzeko kontuan hartuko dugun ibilbidea. Irudian solenoidearen sekzioa dugu, eremu-lerroak urdinez irudikatuta*

Laukiaren lau aldeetan banandu behar dugu integrala:

$$\oint_C \vec{B}d\vec{l} = \int_1 \vec{B}d\vec{l} + \int_2 \vec{B}d\vec{l} + \int_3 \vec{B}d\vec{l} + \int_4 \vec{B}d\vec{l}$$

$$\int_1 \vec{B}d\vec{l} = \int_3 \vec{B}d\vec{l} = 0$$

Kontuan hartu behar dugu iralde horietan eremua eta $d\vec{l}$ bektoreak elkarren elkarzutak direla. Gainera:

$$\int_2 \vec{B}d\vec{l} \simeq 0$$

da, zeren eta kanpoko eremua mespretxagarria baita. Azkenean:

$$\oint_C \vec{B}d\vec{l} = \int_4 \vec{B}d\vec{l} = Bl$$

Laukia zeharkatzen duen i_{garbia} Ni da, non N laukiaren barruan dauden buelta- kopurua eta i espira bakoitzean dabilen intentsitatea baitira. Beraz:

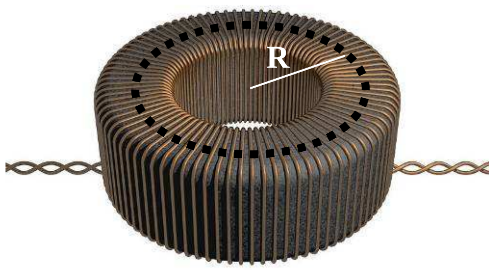
$$\left.\begin{aligned} Bl = \mu_0 i_{barruan} = \mu_0 Ni \Rightarrow B = \mu_0 \frac{N}{l} i \\ n = \frac{N}{l} \end{aligned}\right\} \Rightarrow B = \mu_0 ni$$

non n solenoidearen buelta- kopurua luzera- unitateko baita. Nahiz eta sekzioa zirkularra ez izan, emaitza berdin-berdina da, baldin eta uniformea bada. Eta solenoidea mugatua bada, emaitza ere antzekoa da, ertzetan izan ezik.

8.3. Toru-itxurako solenoidea

Solenoidearen muturreko efektuak desagerrarazteko, solenoideari toru- itxura ematen ahal zaio (ikusi V.25 irudia). Baina hori egitean, barruko eremua aldatzen da.

Berriro, simetriaren ondorioz, eremua solenoidearen barruan kontzentratuta egongo da eta hormekiko paraleloa izango da. Eskuineko eskuaren araua erabiliz jakin dezakegu eremuaren noranzkoa.



V.25.*irudia. Toru-itxurako solenoidea*

Harilaren barrutik pasatzen den R erradioko ibilbide zirkularrean zehar Ampereren legea erabiliko dugu.

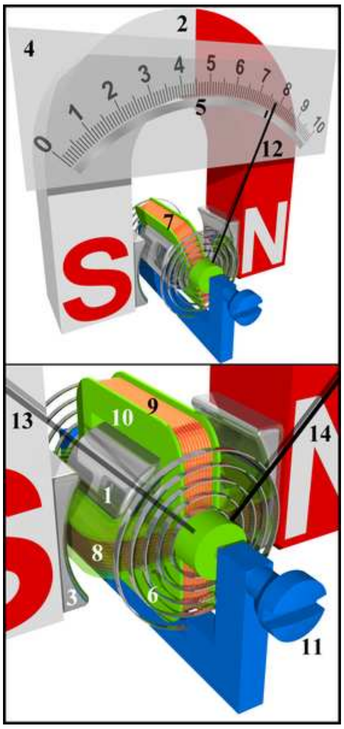
$$\oint \vec{B}d\vec{l} = B2\pi R = \mu_0 Ni \Rightarrow B = \frac{\mu_0 Ni}{2\pi R}$$

non N toru-itxurako solenoidearen buelta- kopurua baita. Beraz, ez dago muturreko efekturik baina eremuak ez du balio bera izango sekzioan zehar.

Galbanometroa
Zirkuituetan neurketak egiteko amperemetroak, voltmetroak eta ohmmetroak erabiltzen ditugu. Edota polimetro edo multimetro bat, non guztiak bateratu dbaititugun. Edozein gailutan galbanometroa da oinarrizko osagaia, korronteak detektatzen dituen gailu bat, nahiz eta korronte horiek oso txikiak izan. *Galbanometroetan harila bat dugu, espira- iman batek sortutako eremuan sartuta. Harilean korrontea badabil, jasaten duen indar magnetikoa dela eta, biratzen hasten da.*

Harilak lotuta du orratza bat, eskala baten gainean higitzen dena. Eskala kalibratuta dago orratza-desbideraketa harilean dabilen intentsitatearekiko proportzionala izateko.

Amperemetro bat gauzatzeko, galbanometroari R erresistentzia bat paraleloan konektatzen zaio paraleloan, galbanometroaren erresistentzia baino askoz txikiagoa dena,; horrela, neurtzen ari garen intentsitate ia osoa galbanometroaren beste adarrean ibiliko da. Jakina, gailuaren erresistentzia baliokideak zirkuituarena baino askoz txikiagoa izan behar du, zirkuituan dabilen intentsitatea ez aldatzeko. Gogora ezazu, intentsitatea neurtzeko amperemetroa seriean konektatu behar dugula, eta bere haren erresistentzia mespretxagarria ez bada, eragina izango duela zirkuituaren jokabidean.

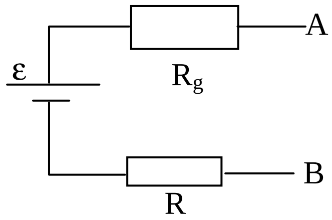


Hona hemen galbanometro baten oinarrizko osagaien eskema:

1. Harilaren nukleoa
2. Iman iraunkorra
3. Eremua bideratzeko osagaia
4. Eskala
5. Eskala-ispilua
6. Haril - malgukia
7. Harila
8. Harila geldiunean
9. Harila desbideraketa maximoan
10. Haril-uztarria
11. Orratza zeroan ipintzeko gailua
12. Orratza
13. Orratza geldiunean
14. Orratza desbideraketa maximoan

Voltmetroak era berean egiten dira, baina, kasu horietan, galbanometroari gehitzen diogun erresistentziak oso handia izan behar du, eta galbanometroarekin seriean konektatuta dagoegongo da. Helburua da gailuren erresistentzia baliokidea oso handia izatea, zeren eta bi puntuen arteko tentsioa neurtzeko puntu horietan paraleloan konektatu behar baitugu eta, ondorioz, zirkuituan eraginika ez izateko bere erresistentziak oso handia izan behar baitu. Horrela, gailuaren adarrean ia ez dabil korronterik.

Ohmmetro bat osatzeko, beste erresistentziaz gain, sorgailu bat konektatzen diogu galbanometroari seriean (ikusi irudia). A eta B puntuak elkarrekin lotu ondoren dabilen intentsitatea galbanometroaren maximoari dagokio eta horrek adierazten du neurtzen ari garen erresistentzia zero dela. Bi puntu horien artean osagai bat konektatzen badugu, dabilen intentsitatea txikiagoa izango da, eta kalibratuta dagoen eskala *batean ikus dezakegu bere balioa.*



Ohmmetro baten eskema: galbanometroari (R_g osagaia) R erresistentzia eta ε sorgailua konektatu egin duizkiogu. A eta B puntuetan konektatzen ditugu galbanometroa eta neurtzen ari garen zirkuitua edo osagaia.

ERANSKINA: UNITATE ELEKTROMAGNETIKOAK ETA KONSTANTE UNIBERTSALAK

UNITATE ELEKTROMAGNETIKOAK

I. atalean ikusi genuen XVIII. mendean Coulomb gai izan zela kargen arteko indar elektrikoa neurtzeko gai izan zela, Priestley eta Cavendish-ekin batera. Dudarik gabe, oso emaitza garrantzitsua izan zen elektromagnetismoaren ikerketan. Arazo bat zegoen, ordea: Coulomb-en legean agertzen den konstantea nahiz kargaren unitateak ezezagunak ziren. Nola zehaztu konstantearen balioa karga unitaterik ez badugu? Lehenik eta behin, kargak neurtu behar ditugu eta!

Arazoak konponbide erraza bat duela ematen du: fisikan oinarrizko magnitude batzuk ditugu[33], eta definitzen eta erabiltzen ditugun beste magnitudeak oinarrizko horietan oinarritzen diradatzan. Karga beste oinarrizko magnitude bat denez, patroi bat aukeratuko dugu eta horixe izango da kargaren unitatea.

Konponduta… edo ez? 1819-1829an Ampere-k eta Oersted-ek indar magnetikoak aztertu ondoren, beste lege bat egin zutendugu, harien arteko indar magnetikoa, hain zuzen. Demagun V.26 irudiko egoera dugula: hari bakoitzak eremu magnetikoa sortzen duenez, beste hariak indar magnetikoa izango du. Hari bakoitzak izaten duen indarra betiko moduan kalkulatuko dugu, hau da, Lorentz- indarra erabiliz:

$$\left.\begin{array}{l}\vec{F}_1 = i_1\vec{l}_1 \wedge \vec{B}_2;\ \vec{F}_2 = i_2\vec{l}_2 \wedge \vec{B}_1 \\ \left|\vec{B}_1\right| = \dfrac{\mu_0 i_1}{2\pi d};\left|\vec{B}_2\right| = \dfrac{\mu_0 i_2}{2\pi d}\end{array}\right\} \Rightarrow F_1 = F_2 = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{i_1 i_2 l}{d}$$

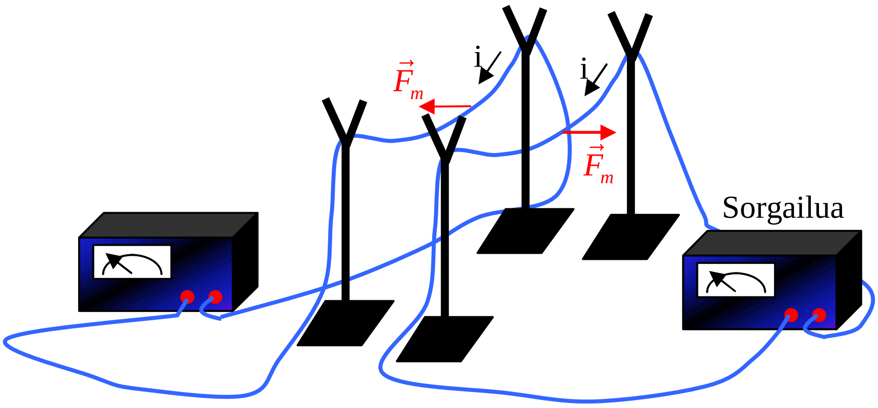
Indarra erakarlea izango da korronteak kontrakoak badira,; bestela, aldaratzailea.

Hau da, bi lege ditugu. Bata, bi korronteren arteko indar magnetikoa luzera- unitateko, eta bestea, Couluomb legea, bi karga puntualen artean sortzen den indar elektrikoa zehazten duena:

---

[33] *Besteak hHauexek dira: luzera, masa, denbora, tenperatura, sustantziaren kantitatea eta argi- intentsitatea.*

$$F_1 = F_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{d^2}$$



V.25.V.26. *irudia:. kKorronteen arteko indarrak. Bi harietan korrontea dabil, eta, horren ondorioz, eremu magnetikoak sortzen dituzte. Hari bakoitzak indar magnetikoa izango du, beste hariak sortutako eremua dela eta, indar magnetikoa izango du.*

Bi kasuetan neur ditzakegu indarrak, magnetikoak nahiz elektrikoak. Eta azkenean bi konstante ditugu, ε_0 eta μ_0. Baina bakarrik dugu magnitude fisiko berri batbakarra dugu: karga edo korrontea. Eta horren ondorioz, bakarrik ematen ahal diogu hautazko balio bat bakarrik ematen ahal diogu ε_0 edo μ_0 konstante bati. Bestela esanda, karga edo korrontea aukeratu behar dugu oinarrizko magnitude gisa, eta bestea ondorioztatu haien arteko erlazioa erabiliz: intentsitatea = karga/denbora. Behin dDefinituta ondoren, konstanteen balioak aterako ditugu, unitate berri horien mende.

1948ra arte ez zen hartu erabaki ofizialika:; azkenean, Pisuei eta Neurketei buruzko IX. Bilera oOrokorrean, *ampere* unitatea oinarrizko unitatetzat hartzea adostu zuten,; 1960an (XI. Bileran) definizioa pixka bat moldatu egin zen, eta gaur egun dugun definizioa hauxe da: ampere bat da hutsean dauden eta sekzio mespretxagarria eta luzera infinitua duten bi eroaleren gainean $2{\cdot}10^{-7}$ N/m-ko indar magnetikoa sortzen duen korrontea da, bata bestetik 1m-ko distantzian paralelo dirautela. Definizio horren ondorioa $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}\,Tm/A$ izatea da, hain zuzen.

Coulomba definituko dugu orain: coulomb bat da eroale batean 1 A-ko korrontea ibiltzean, 1 s-ko denbora- tartean bere sekzioa zeharkatzen duen karga-kopurua.

KONSTANTE ELEKTRIKOAK

Aipatu egin dugu Ampere-ren definizioaren ondorioz, $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}Tm/A$ balio duela. Eta ε_0? Aurrekoan ere esan dugu, behin unitateak definituta ondoren, bi konstanteen balioak atera ditzakegula.

Bi konstante horiek ez dira elkarrekikon askeak, erlazioa[34] hauxe da: $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$. Eta c-ren balioa, hau da, argiaren abiadura hutsean, oso zehatz neurtu da. Beraz, $\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2} = 8{,}85.10^{-12}N^{-1}m^{-2}C^2$. Eta orain, 1 C-ko karga horrela definitzen ahal dugu berriro, beste era batean: hutsean beste karga berdin batetik metro batera jarrita $8{,}9874.10^9$ N-ko indarra[35] jasaten duen karga- kopurua da. Jakina, definizio hori eta aurrekoa baliokideak dira.

KONSTANTE FISIKOAK

Konstante fisiko asko eta asko daude, besteak beste, c, ε_0, μ_0, Planck konstantea, eta grabitate- konstantea. Konstanteak direnez badakigu ez dela aldatzen espazioan, nahiz denboran, eta dimentsiodunak edo dimentsio- gabekoak izan daitezke. Aurretik aipatutako aurrekoek dimentsioak dituzte, eta horrek esan nahi du neurketa egiteko unitate-sistema aldatzen badugu, haien balioak ere aldatuko direla. Taulan ditugu mota honrretako konstante batzuen balioak ditugu.:

Konstantea	Ikurra	Balioa
Hutsaren inpedantzia	$Z_0 = \mu_0 c$	376,730313461…Ω
Hutsaren permitibitatea	$\varepsilon_0=1/(\mu_0 c^2)$	$8{,}854187817...\cdot 10^{-12}$ $F\cdot m^{-1}$
Hutsaren iragazkortasun magnetikoa	μ_0	$4\pi\cdot 10^{-7} N\cdot A^{-2}$
Grabitate- konstante unibertsala	G	$6{,}6742(19)\cdot 10^{-11} N\cdot m^2\cdot kg^{-2}$
Planck konstantea	h	$6{,}6260693(18)\cdot 10^{-34} J\cdot s$
Dirac konstantea	$\hbar = h/2\pi$	$1{,}05457168(18)\cdot 10^{-34} J\cdot s$
Argiaren abiadura hutsean	c	$299\,792\,458\ m\cdot s^{-1}$

[34] *VI atalean ikusiko dugu horixe dela uhin elektromagnetiko guztien hedapen-abiadura, argia barne, eta erlazio hori ondorioztatuko dugu.*
[35] *Eskuarki borobildu egitzen dugu balio hau: 9.10^9N*

Dimentsiorik- gabeko konstanteak bitxiak dira: erabilitako unitate-sistemarenkiko askeak dira eta, hori dela eta, oinarrizko konstanteak dira.

Adibide tipiko bat α egitura xehea- konstantea da: $\alpha = \dfrac{e^2}{\hbar c 4\pi\varepsilon_0} = \dfrac{1}{137,035999679(98)}$, non *e* elektroiaren karga baita (begiratu taulan zeintzuk diren beste konstante guztiak). Ez dago balio hori azaltzen duen teoria-rik[36], baina balio horrek determinatzen du elkarrekintza elektromagnetikoaren magnitudea.

Kontuan hartu behar dugu dimentsiorik- gabeko konstante horien balioak pixka bat ezberdinak izango balira, geure unibertsoa ere oso ezberdina izango litzatekeela. Esaterako, α konstantea portzentaje txiki batean aldatuko balitz ez legoudeke Eguzki- motatako izarraik unibertsoan.

---

[36] *Elektrodinamika kuantikoaren bidez neurtzea posiblea da. 1916an lortu zuten lehen aldiz: Sommefeld-ek neurtu zuen espektro atomikoetan, eta, Bohr-rek proposatutako eredua kontuan hartuta, elektroi- eta argia-abiaduraren arteko arrazoia zela pentsatu zuten hasiera batean. Gaur egun, konstante horren esanahi fisiko bat baino gehiago proposatu dute.*

VI MAGNETISMOA ETA MATERIA

1. SARRERA

Aurreko gaian ikasi egin dugu sistema batek izango duen indar magnetikoa edota sortzen duen eremu magnetikoa aurresaten edota sortzen duen eremu magnetikoa. Aipatu ere, aipatu egin dugu eremu magnetikoen iturriak higitzen ari duran dauddiren kargak direla, eta hori dela eta, material batzuek (imanek, esaterako) eremu magnetikoak sortzen dituztela.

Baina materialetan higitzenduran ari daudiren kargak badaude, eta eremu magnetikoak sortzeko gai badira, karga horiek ez dituzte indar magnetikoak ere jasango karga horiek? Bestela esanda, zeintzuk dira eremu magnetikoen ondorioak material baten barruan?

Materialetan dauden kargek indar magnetikoak dituzte, zer esanik ez… Eta horren ondorioz beste eremu magnetiko bat sortuko dute. Materiala magnetizatu egin dela esaten dugu eta magnetizazio hori materialen erantzuna da. Material-mota asko daudenez, erantzun- mota anitz aurkituko dugu. Kasu batzuetan, bi eremuen erresultantea ondoriozkoaerresultantea (kanpokoaren eta magnetizazioa sortzen duenaren gainezarmena) eta kanpokoa oso antzekoak dira, baina, beste batzuetan, berriz, aldaketa nabaria da. Erantzuna, betiko moduan, maila atomikoan aurkituko dugu.

Material magnetikoak oso erabiliak dira aplikazioetan: ordenagailuen disko gogorretan, transformadoreetan, sorgailuetan,… material magnetikoak erabiltzen ditugu. Garrantzitsua da, beraz, haien jokabidea ulertzea eta menderatzea.

2. EREMU MAGNETIKOAK MATERIALETAN

Beraz, materia atomoz osatuta dago, eta, atomoetan elektroiak higitzenduran ari daudirenez, atomo horien elektroiek indar magnetikoeak izango dituzte eremu magnetiko baten barruan. Hau da, eremu magnetiko batean edozein gorputz sartzen badugu eremuak eragina izango du gorputzaren kargetan, eremu elektrikoetan gertatzen den bezala.

Badakigu eremu elektrikoek materian eragina dutela eta gorputz baten erantzuna material- motaren araberakoa[37] dela, baina materialaren barruko eremua kanpokoa baino txikiagoa da beti, bai dielektrikoetan, bai eroaleetan. Eremu magnetikoaren kasuan, berriz, zenbait egoera aurkitzen ditugu. Material batzuetan barruko eremua kanpokoa baino txikiagoa da, baina beste batzuetan kontrakoa gertatzen joera suertatzen da. Aurrerago ikusiko dugunez, azalpena berriro materialen egitura atomikoan datza berriro, eta egitura horren arabera egingo dugu material-sailkapena. Baina sailkapen hori egin baino lehen, gaia hobeto lantzeko magnitude berri batzuk definitzea komenigarria da.

Orain arte ikusitako eremu magnetikoak karga askeek sortutakoak dira, edo, bestela esanda, korronteek sortzen dituzte. Atomoen elektroiek ere eremu magnetikoak sortzen dituzte, baina haiek ez dira benetako korronteeak, eta askotan erabilgarria da eremu horiek (benetako korronteak eta materiaren kargek sortutakoak) bereiztea.

Beraz, kasu orokorrean: $\vec{B} = \vec{B}_{aske} + \vec{B}_{ind} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M}$, non H eremu magnetikoaren intentsitatea eta M magnetizazio-bektorea baitira. Intentsitate magnetikoa karga askeek sortutako eremuarekin erlazionatuta dagoenez, ez da aldatzen nahiz eta material anitzak erabili. Magnetizazioak, berriz, erabilitako materialarekin zerikusi handia du. Materialean dauden dipolo magnetikoen momentu magnetikoen erresultantea ondoriozkoaerresultantea da. Materiala magnetizatuta badago (eremu magnetiko baten barruan), erresultantea ondorioazkoaerresultantea ez da nulua izango. Balioa kalkulatzeko dipolo magnetikoen momentua bolumen- unitateko erabiltzen dugu (NS unitateak: A/m), eta dipolo horiek sortutako eremu erresultantea ondorioazkoaerresultantea $\mu_0 \vec{M}$ da. H-ren unitateak M-renak dira.

Eta hemen aurkituko dugu materialen arteko lehen ezberdintasuna aurkituko dugu: nahiz eta kanpoko eremu magnetikoarik nulua izan, material ferromagnetikoek magnetizazioa izan ahal dute. Besteek, aldiz, eremu magnetiko baten barruan dauden bitartean bakarrik dute magnetizazioa (material ez-ferromagnetikoak). Azken kasu horretan, M magnetizazioa kanpoko eremuarekiko proportzionala da, baina material batzuetan (diamagnetikoak) kontrako noranzkoa du, eta besteetan (paramagnetikoak) noranzko berekoa da. Hau da, materiala ez-ferromagnetikoa bada:

---

[37] Gogora ezazu, kanpoko eremu elektrikoa dela eta, dielektrikoek nahiz metalezko gorputzek haien karga berrantolatzen dutela eta karga induzitu horiek beste eremu bat sortzen dutela, eremu induzitua, hain zuzen.

$$\vec{B} = \vec{B}_{aske} + \vec{B}_{ind} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi_m \vec{H}$$

non $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$ eta χ_m materialaren suszeptibilitate magnetikoa baita. Positiboa (paramagnetikoak) edo negatiboa (diamagnetikoak) izan daiteke. Bestalde, aurreko formula gehiago laburtzenu ahal dugu:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi_m \vec{H} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H}$$

non $\mu_r = (1 + \chi_m)$ eta μ materialaren iragazkortasun erlatiboa eta iragazkortasuna

Iragazkortasunaren balio batzuk

Hona hemen zenbait materialen iragazkortasun- balioak:

Materiala	μ (NA^{-2})
Permalloy-a	10
Ferrita (nikel zink)	20-800
Ferrita (manganeso zink)	>800
Altzairua	875
Nikela	125
Platinoa	12.569.701
Aluminioa	12.566.650
ura	12.566.270

baitira, hurrenez hurren.

3. EGITURA ATOMIKOA ETA MAGNETISMOA

Materialen erantzuna ulertzeko ezinbestekoa da egitura atomikoa aztertzea. Azterketa sakona egiteko, mekanika kuantikoa erabili beharko genuke, baina eredu klasikoa baliagarria da nolakotasunezko analisia egiteko. Eredu horren arabera, elektroiek bi momentu magnetiko dituzte.

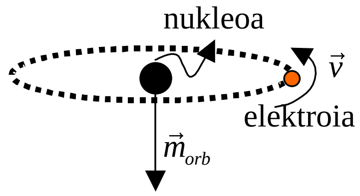
3.1. Momentu orbitala

Elektroiek nukleoekiko orbita zirkularrak osatzen dituztenez, momentu dipolar magnetikoa dute (espira baten bezalakomoduko momentua)[38].

[38] *Zuzenketa kuantikoa: elektroiek ez dute orbita zirkularrik osatzen. Higitu bai, higitzen dira, eta espazioaren alde jakin batean aurkitzeko probabilitatea ezaguna da. p,d eta f orbitalek simetria esferikorika ez dutenez, atomoen momentu magnetiko garbia ez da zero. Baina orbita zirkularrak osatzen dituztela hartuko dugu kontuan, gutxi gorabeherako kalkuluak gauzatzeko.*

Balioa kalkulatzeko irudian agertzen den egoera aztertu behar dugu. Bira-keta-periodoa T = 2πr/v da, non r orbitaren erradioa eta v elektroiaren abiadura baitira. Elektroien higidurak sortutako korrontea, beraz, honako hau izango da:

$$I = \frac{e}{T} = \frac{ev}{2\pi r}$$



VI.1. *irudia. Elektroia higitzen nukleoaren inguruetan. Orbita zirkular bat osatzen ari dela kontuan hartu dugu, v abiadura konstantez. Beraz, espira bezalako gisako sistema bat dugu, eta bere momentu dipolarra irudiko* $\vec{m}_{orb}$ *bektorea da*

Eta momentu magnetikoa (ikusi V.7 atala):

$$m_{orb} = I \cdot A = I\pi r^2 = \frac{ev}{2\pi r}\pi r^2 = \frac{1}{2}evr$$

L momentu angeluarrekiko erlazioa adieraztea oso ohitura zabala da, L oinarrizko magnitude fisikoa dela eta[39]:

$$m_{orb} = \frac{1}{2}evr = \frac{e}{2m_e}m_e vr = \frac{e}{2m_e}L \rightarrow \vec{m}_{orb} = g_L\vec{L}$$

non g_L erlazio giromagnetikoa baita: $g_L = \frac{e}{2m_e}$

Eredu klasikoan ez dago arazorik elektroiak edozein erradioko orbitetan aurkitzeko, edo bestela esanda, haien L momentu angeluarrak edozein balio har dezake. Baina mekanika kuantikoaren arabera[40], orbita batzuk bakarrik dira posibleak, hau da, bakarrik L-ren balio batzuk bakarrik dira baimenduak dira, ħ

[39] *Higiduraren ezaugarriekin zerikusi handia du: zenbat eta abiadura handiagoz higitu edota erradio handiagoko ibilbidea osatu orduan eta handiagoa da L-ren balioa. Definizioa hauxe da:* $\vec{L} = m\vec{r} \wedge \vec{v} \Rightarrow L = mrv$ *(kg·m²/s) eta norabidea orbitaren planoarekiko elkarzuta du.*
[40] *Eta emaitza esperimentalen arabera, jakina. Emaitza esperimentalak azaltzeko garatu zen eredu kuantikoa, hain zuzen.*

balio dutenak, non $\hbar \equiv h/2\pi$, h Planck-en konstantea[41] eta l osoko bat baitira. Beraz, bakarrik momentu dipolar zehatz batzuk dituzten elektroiak bakarrik daude atomoetan, hurrengo honako balio hauek dituztenak:

$$m_{orb} = \left(\frac{e}{2m_e}\hbar\right) l \equiv m_B l\ ; \qquad l = 0,1,2,...$$

non $m_B \equiv \frac{e\hbar}{2m_e}$ baita, Bohr-ren magnetroia izeneko konstantea.

Kanpoko eremurik gabe kontrako momentu orbitala duten elektroiak parekatu egiten dira. Hori dela eta, bakarrik elektroi-zenbaki bakoitia duten atomoek bakarrik izango dute momentu orbital garbia.

3.2. Spin momentua

Elektroiek sortutako eremuek beste osagai bat dute: spin-a[42]. Hau da, elektroiek barruko momentu magnetikoa ere badute, oso txikiak diren imanak izango balira bezala. Haren balioa m_B konstantearena da, gutxi gorabehera. Eta momentu orbitalari gertatzen zaion bezala, spin momentuak bakarrik balio zehatz batzuk bakarrik hartu ahal ditu, kasu horretan, bi: "gora" eta "behera" izenekoak.

Kanpoko eremurik gabe, kontrako spin momentuak dituzten elektroiaek parekatzeko joera dute. Protoiek eta neutroiek ere badute haien spin-a eta hainbat aplikazio teknikotan ezaugarri hori ezaugarri hori erabiltzen da hainbat aplikazio teknikotan ezaugarri hori (esaterako, erresonantzia magnetiko nuklearrean,; ikusi eranskina), baina elektroienarekin alderatuta mespretxagarria da.

3.3. Ondorio makroskopikoak

Dudarik gabe, atomo bakoitzaren momentu magnetikoa oso txikia da iman arrunt batenarekin alderatuta oso txikia da, baina, materialetan hainbeste atomo daudenez, guztiak lerrokatuta egongo balira oso eremu bortitza sortuko lukete. Eragin makroskopikoa izateko, nahikoa da atomo gutxiren momentu magnetikoak lerrokatzea.

---

[41] Aurreko atalean, eranskinean, ikusi dugu konstante hori. Oinarrizko konstante bat da.
[42] Ondorio erlatibista da, erlatibitatea eredu kuantikoan kontuan hartzen badugu ondorioztatzen dugu elektroiek horrelako momentu magnetikoa dutela.

Magnetizazio-bektorearen bidez lerrokatze-maila neurtzen dugu. Atomoen momentu magnetikoak guztiz oharkabeanz bideratuta ez badaude, $\vec{m}_o$ momentu magnetiko garbia osagaietako (non osagaia atomoa edota molekula baita) osagaien momentu guztien batura bektoriala zati osagaien kopurua da. Magnetizazioa, beraz, honako hau izango da:

$$\vec{M} = n\vec{m}_o$$

non n osagai- kopurua bolumen- unitateko baita.

4. MATERIAL-SAILKAPENA

Elektroi -kopurua dela eta, atomo bakoitzak momentu dipolar garbia du. Material-sailkapena momentu dipolarraren arabera egiten da: diamagnetikoak, paramagnetikoak eta ferromagnetikoak[43].

4.1. Diamagnetismoa

Material batzuen atomoek parekatuta ez dauden elektroirik ez dutenez, bai momentu orbitalek, bai spin-ek elkar ezeztatzen dute. Hau da, atomoen momentu garbia zero da.

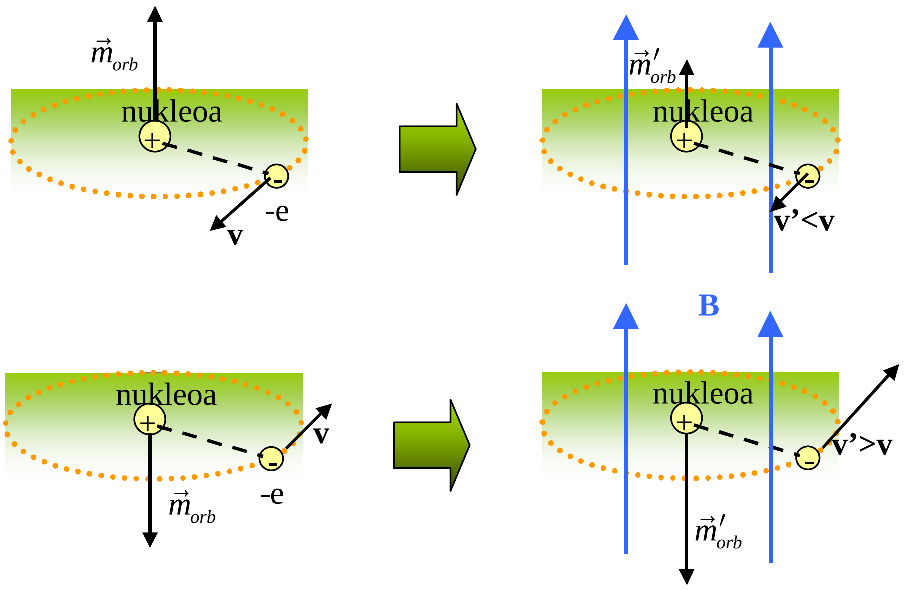
Eremu magnetiko batean sartzen baditugu egoera erabat aldatzen da, elektroiek indar magnetikoak dituzte eta. Biraketa-noranzkoaren arabera, jasaten duten indar magnetikoa eta nukleoarekiko indar elektrikoa kontrako noranzkokoak edo noranzko berekoak izan daitezke. Momentu orbitala eta eremua paraleloak badira, indar magnetikoa elektrikoarekiko antiparaleloa da indar elektrikoarekiko. Orbita-erradioa kuantizatuta dagoenez ezin da aldatu, baina indar zentripetua gutxitzen da eta elektroiaren biraketa-abiadura ere gutxituko da. Elektroiaren momentu orbitala, beraz, txikitu egingo da.

Haren bikotea, berriz, kontrako egoeran dago, eta momentu orbitala handitu egiten da. Momentu orbitalek ez dute elkar ezeztatzen eta materialek momentu dipolar garbia dute, eremuarekiko kontrakoa dena,; eta materialaren barruko eremu erresultantea ondoriozkoa erresultantea kanpokoa baino txikiagoa da.

---

[43] Eta horietaz gain, antiferromagnetikoak, ferrimagnetikoak, super diamagnetikoak eta super paramagnetikoak. Bitxiak direnez, ez ditugu hemen aztertuko.

Kontuan hartu behar dugu efektu diamagnetiko hori material guztietan gertatzen dela, baina beste mota batetako materialetan beste efektu batzuk ere suertatzen gertatzen dira, eta haien aldean ez da aintzat hartzekoa.



VI.2. *irudia. Nukleoaren inguruetan biratzen ari den elektroiak eta kanpoko eremuaren eragina. Ezkerreko irudietan ez dugu ezarri eremurik, eta elektroiek momentu orbital bera dute, kontrako noranzkoan bideratuta. Parekatuta daude biak, nukleoarekiko distantzia berean kokatuta. Eskuineko irudietan kanpoko eremua piztu egin dugu. Elektroiek ezin dute hurrengo orbitara jauzi egin, ez dbaitute behar duten bezain beste energia eta. Elkarrekintzaren ondorioa izango da, beraz, haien abiadurak murriztea edo areagotzea haien noranzkoaren arabera.*

4.2. Paramagnetismoa

Atomo bakoitzak parekatuta ez dagoen elektroi bat duenez momentu garbia du, baina momentuak oharkabeanz bideratuta daude, eta materialaren momentu magnetikoa zero da. Mota horretako materiala eremu magnetiko batean kokatzen badugu, atomoen momentuek eremuarekiko lerrotzeko joera dute eta materialaren momentua sortzen da. Momentu hori eremuarekiko paraleloa da eta barruko eremua kanpokoa baino handiagoa da.

Bi faktorek mugatzen dute momentuen lerrokatze-maila: bata kanpoko eremuaren magnitudea da, eta bestea, tenperatura. Zenbat eta tenperatura handiagoa izan, orduan eta energia zinetiko handiagoa dute elektroiek, eta gehiago eragozten da lerrokatzea. Tenperatura oso handia bada, batez besteko lerrokatzea ahula izango da. Txikia bada, berriz, lerrokatzea handia izango da. Curie-legearen bidez, eremuaren eta tenperaturaren arteko harremana ezartzen da:

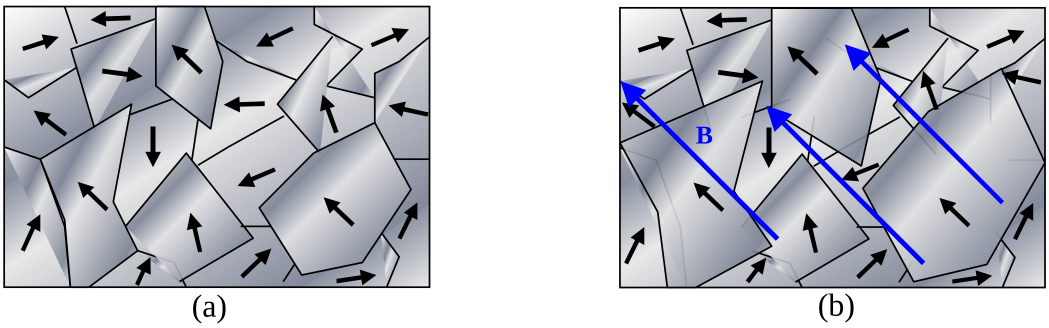
$$\vec{M} = C\frac{\vec{B}}{T} = C\frac{\mu_0\vec{H}}{T}$$

non *C* Curie- konstantea baita. Suszeptibilitatea, beraz: $\chi_m = \frac{\mu_0 C}{T}$ da. Eta materialaren mende egoteaz gain, tenperaturak ere eragina du bere balioan.

4.3. Ferromagnetismoa

Material ferromagnetikoek iraunkorrak diren oso magnetizazio oso handiak izan ditzakete, parekatuta ez dauden elektroiak dituztelako eta elektroien spin momentuak lerrokatzen direlako.

Spin-en lerrokatze- joera azaltzeko ezinbestekoa da kuantikoa erabiltzea ezinbestekoa da, mekanika klasikoan ezin baitdugu erantzunik aurkitu eta. Lehen aipatu dugunez, atomoetan posizio zehatz batzuetan bakarrik aurki ditzakegu elektroiak. Zenbat eta nukleoarekiko hurbilago egon nukleoarekiko, orduan eta energia gutxiago dute[44]. Baina kontrako spin-a duten elektroiek bakarrik betetzen ahal dute espazio-alde bera kontrako spin-a duten elektroiak. Horrek esan nahi du parekatuta daudela energia-maila bakoitzean, bata spin gora eta bestea spin behera.



VI.3. *irudia. Domeinuak material ferromagnetiko batean. (a) Materialaren domeinuak eta domeinu bakoitzaren momentu garbiaren noranzkoa. (b)* ***B*** *kanpoko eremuan sartu ondoren, domeinu-egitura aldatu egin da.*

[44] *Hori dela eta, beti atontzen dira nukleoetatik ahalik eta nukleoetatik hurbilenago. Jakina, atomoak elektroi asko badu, nukleoarekiko hurbil samar aurkituko ditugu, energia-maila bakoitza bakarrik binaka bakarrik betetzen ahal dutelako energia-maila bakoitza eta.*

Atomo batzuetan elektroi bat edo batzuk parekatu gabe geratzen dira, elektroi- kopuru bakoitia dutelako. Parekaturik ez dauden elektroi horiek energia gutxiengo energia- minimoa duen egoera minimoan n antolatzen dira, besteak bezala. Energia- egoera horretan, haien spin momentuak lerrokatu eta ahalik eta elkarren urrunago egoteko moldatzen dira haien orbitak. Hori dela eta, energia potentzial elektrikoa gutxitzen da, eta, energia gutxiko egoera denez, oso egonkorra da.

Dena dela, lerrokatzea ez da material osoan zehar gertatzen, baizik eta domeinuetan. Hainbat esparru aurkitzen dugu materialean, eta esparru bakoitzean lerrokatze-norabidea (momentu garbiaren norabidea) ezberdina da modu batekoa da momentu garbiaren norabidea oso bestelakoa da (ikusi VI.3 irudia). Domeinu tipiko batek 10^{-12} – 10^{-8} m^3-ko bolumena du[45], eta bakoitzeko momentu magnetikoa nahiko handia izan daiteke.

Eremu magnetikoa materialari ezartzeak bi ondorio dakartza. Alde batetik, eremuarekiko momentu paraleloa duten domeinuak zabaltzen dira, eta, beste aldetik, beste domeinu batzuen momentuak biratzen dira, eremuarekiko paralelo kokatzen saiatuzen. Materialaren momentu garbia, beraz, handitu egitzen dugu. Eta nahiz eta kanpoko eremua desagertu, lerrokatzeak iraun egiten du neurri handi batean.

Kasu horretan ere tenperaturak ondorioak ditu lerrokatze-prozesuan: ferromagnetikoa berotzen badugu lerrokatzea desagerrarazi egiten dugu. Material bakoitzak domeinuen momentuak guztiz deslerrotuta ditu berezko tenperatura jakin batean (Curie-ren tenperatura). Curie-ren tenperatura baino txikiagoa bada ferromagnetismoa berriro agertzen da.

4.3.1. Histeresia

Ferromagnetikoetan B-ren eta H-ren arteko harremana besteetan baino konplexuagoa da. Esperimentalki zehazteko, materiala eremu magnetiko batean sartu eta eremu erresultantea ondoriozkoaerresultantea neurtu behar dugu. Kanpoko eremua aldatuz (hau da, intentsitate magnetikoa) ezagutzenu ahal dugu intentsitate eta eremu magnetikoen arteko erlazioa.

Beraz, lehenik eta behin, materialaren magnetizazioa deuseztatzen dugu berotuz. Hoztu, materialari eraztun-itxura eman, eta hari bat biribildu dugu gai-

---

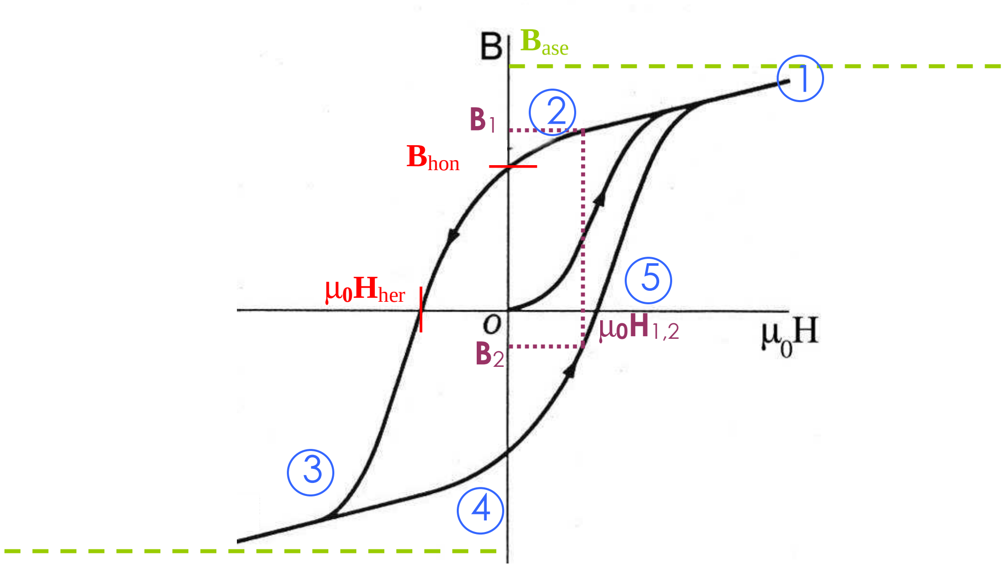
[45] *Hau da, aldea 0,1-1 mm da.*

nean,; hertsi. Haria sorgailu batekin konektatuta dago. Materialik gabe, barruko eremu magnetikoa honako hau da:

$$\vec{B} = \vec{B}_{aske} = \mu_0 \vec{H}$$

Materiala sartu ondoren, eremuaren magnitudea areagotu egitzen da eta eremu hori bigarren haril baten bidez neur daiteke (iee induzitua neurtuz, esaterako,; ikusi hurrengo irakasgaia). B eremuaren eta H intentsitate magnetikoaren arteko erlazioa hobeto ikusteko, grafiko batean irudikatu ditugu balioak: kurbaren puntu bakoitzak materialaren eremuari eta aldi bereko intentsitate magnetikoari dagozkio (ikusi VI.4 irudia).

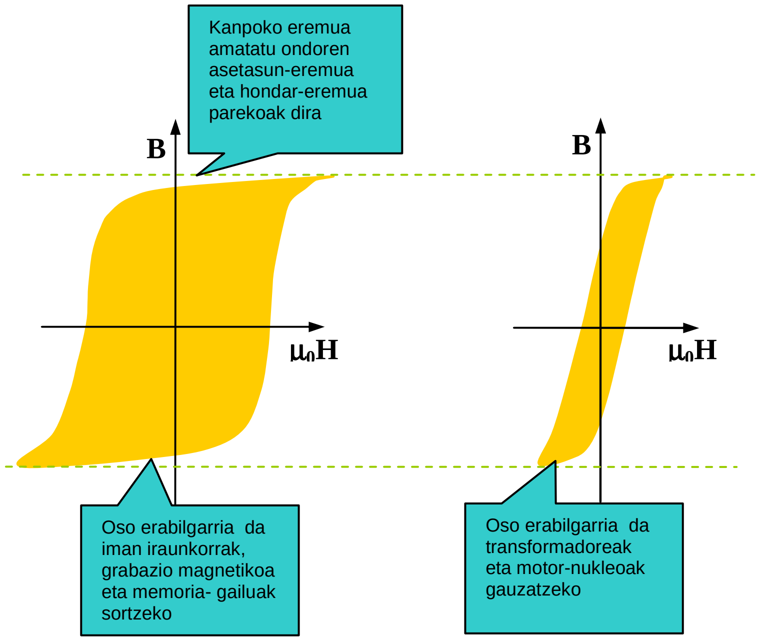
Irudian ikusten da magnetizazio-kurba hori, histeresi-kurba izenekoa. Histeresia dela eta, magnetizazio-prozesua atzeraezina da: I intentsitatea aldatu ondoren, nahiz eta aurreko balioak berriro hartu, materialak ez du hasierako magnetizazioa berrartzen, irudian ikusten den bezala. Esaterako, intentsitate magnetikoak $\mu_0 H_1$ balioa hartu du bi aldiz. Bata, korrontea balio maximotik minimora eramatean (1-2 fasean) eta bestea, 3-5 fasean (intentsitatea alderantzikatu ondoren, berriro hasierako balioa hartzera eramatean). Bigarren puntu horretan $\mu_0 H_1 = \mu_0 H_2$, baina $B_1 \neq B_2$.



VI.4. *irudia. Histeresi-zikloa. H intentsitatea zerotik handituz hasi gara, 1-2-3-4-5-1 puntuak osatuz. Hau da, harilaren intentsitatea areagotu, murriztu, kontrako noranzkoan berriro areagotu, murriztu eta, amaitzeko, berriro areagotu hasierako noranzkoan.*

Histeresia gertatzen da domeinuak haien kanpoko eremurik gabeko egoerara itzultzen ez direlako,; hau da, ez dira haien hasierako lerrokatzeetara itzultzen.

Histeresi-zikloan agertzen diren balio batzuk aipagarriak dira. Hasteko, eremuaren balio maximo bat dago, eta, nahiz eta intentsitate magnetikoa areagotu, ezin dugu balio hori gainditu. Materiala ase dugula esaten dugu, eta eremuaren balio maximo hori asetasun-eremua da (VI.4 irudian, B_{ase}). Behin aAsetasunean egonez geroda, nahiz eta intentsitate magnetikoa zerora eraman, eremu magnetikoa ez da desagertzen, materiala magnetizatuta geratu da eta. Hondar-eremua dugu, beraz (irudian, B_{hon}). Eta eremua zero izateko, orain kontrako noranzkoa duen intentsitate magnetikoa ezarri behar dugu,; kanpoko eremu hori eremu hertsatzailea da (irudian $\mu_0 H_{her}$).



VI.5. *irudia. Material mota histeresiaren arabera. Histeresi- zikloetan argi eta garbi ikus dezakegu zein material- mota dugun. Eszkerreko zikloak material gogorra bati dagokio. Eskuinekoa, berriz, material gozo bati.*

Material ferromagnetiko guztiek ez dute itxura bereko kurbarik. Batzuek (karbonoa, tungstenoa...) histeresi-kurba zabalak dituzte (ikusi VI.5 irudia). Horrek adierazten du haien domeinuek eremu handiei bakarrik erantzuten dietela, eta magnetikoki gogorrak direla esaten dugu. Baina, behin magnetizatuta ondoren, oso zaila da prozesua deuseztatzea, eta, hori dela eta, memoria-gailuetan erabiltzen dira (inguruko eremu magnetikoen eraginik izango ez dutelako).

Beste batzuek oso kurba estuak dituzte, hau da, magnetikoki gozoak dira, eta kanpoko eremuei oso ondo jarraitzen diete. Hori dela eta, korronte alternoaren prozesuetan erabiltzeniak dira, energia gutxi galtzen dugulako sortzen diren eremu aldakorrekin.

ERANSKINA: ERRESONANTZIA MAGNETIKO NUKLEARRA (EMN)

Gaur egun osasun-arloan oso erabiliak dira erresonantzia magnetiko nuklearra izeneko gailuak. Gailu horiek materiaren ezaugarri magnetikoetan datza,oinarritzen dira, nukleo atomikoen spin momentuetan, zehatzago esanda.

Aurreko ataletan aipatu dugunez, elektroiek ez ezik, protoiek eta neutroiek ere badute spin momentu propio bat. Ez dute eraginik ferromagnetismoaren bezalako gisako propietateetan, baina aplikazioak ere badituzte. Zein da aplikazio horietan erabiltzen den materiala? Geure gorputza, hain zuzen ere. Beraz, horrelako gailu batean sartzean eremu magnetiko baten barruan sartzen ari gara. Kontuan hartu behar dugu geure gorputzean uraren portzentajea oso handia dela.; Eeta uraren molekulan hHidrogeno atomoak ditugula. Hidrogenonukleoan dauden protoien momentuak erabiltzen dira gorputzaren barruko egiturari buruzko informazioa lortzeko, orain ikusiko dugun bezala.

Lehenik eta behin, gogoran izan ezazu atomoetan dauden partikulen jokabidea azaltzeko eredu kuantikoa garatu behar zela. Kuantikoaren arabera, nahiz eta partikula bati energia eman, emandako energia- kopurua hurrengo energiamailara jauzi egiteko behar bezain handia ez bada, partikulak ez du bere energiaegoera aldatuko. Eredu klasikoan ez zegoen horrelako arazorik, sistemek edozein energia har dezaketelako elkarrekintzen bidez. Baina esperimentuek adierazten dute maila atomikoan energia kuantizatuta dagoela, eta e. Energia- maila batetik bestera jauzi egiteko energia-pakete horiek bestelakoak aldatu egitenezberdinak dira atomoaren arabera,. eta gGeuk aukeratu ahal dugu partikulei emango diegun energia-kuantuaren tamaina eremuaren maiztasuna aldatuz: zenbat eta periodoa handiagoa izan, orduan eta txikiagoak dira elkarrekintza elektromagnetikoaren bidez elkartrukatzen ditugun energia-kuantuak.

Kasu horretan hHidrogeno atomoak ditugu. Haien protoiek spin momentuak dituzte, eta eremu magnetiko baten barruan bere joera eremuarekin lerrokatzea da beren joera, haien energiak gutxitzeko. Baina egitura eta elkarrekintza atomikoak direla eta, ezin dute guztiz lerrokatu (ez ahaztu nukleoan daudela)[46], eta eremuarekin lerrokatuta ez dauden protoiek besteaek baino energia handiago dute. Beraz, beste bi energia-maila sortu egin ditugu kanpoko eremu magnetikoaren bidez: spin paraleloko eta spin antiparaleloko energia-mailak. Spin-aren osagai paraleloa duten protoiek energia bereganatu behar dute beste maila batera aldatzeko energia bereganatu behar dute, energia- kopuru ala pakete zehatz bat, eta energia hori emateko uhin elektromagnetiko bat erabiliko dugu. Behar den maiztasuna badu, hHidrogeno -protoi horiek energia xurgatuko dute, hurrengo energia-mailara jauzi eginez. Erresonantzia gertatu dela esaten dugu. Denbora-tartetxo bat emaen ondoren, energia xurgatu duten protoiek hori iragartzen dute, beren hasierako egoerara itzuliz. Eta energia-igortze hori erraz detektatzenu ahal dugu.

VI.6. *irudia. EMN bidez gauzatutako belaun baten irudia.*

Beraz, solenoide erraldoi baten barruan sartzen gara. Kasu horretan sortutako eremua[47] ez da uniformea, gradientea daeremu-gradiente bat sortzen duguu. Zertarako? Zenbat eta eremua handiago izan orduan eta nabariagoa izango da bi spin-en energia-mailen arteko diferentzia, eta ondorioz, protoiekn xurgatuko duten energia ere bai. Gailua diseinatzen da barruko espazio- aldean hiru eremu ezberdinak sortzeko, bakoitzak espazio-alde bati dagokiona. Horrela, espazio-alde bakoitzean dagoen protoiak erresonantzia-maiztasun propio ezber-

[46] Eta egia esateko, oso protoi gutxi daude lerrokatuta,; nukleoaren energia termikoa oso handia da eremuak eragin nabarmena izateko. Baina hainbat protoi dugunez, haietariko baten batek lerrokatzen du bere spin momentua.
[47] Balioa 0,15 – 7 T da.

dina bat izango du, eta igorritako seinalearen maiztasuna neurtuz jakin dezakegu non dagoen protoia. Bestelako gradienteak sortzen dira eta prozesua errepikatzen da. Gero, ordenagailuaren bidez informazioa analizatu, datu-tratamendua gauzatu eta irudi bat osatzen dugu. Horrela lortzen dira gorputzaren barruko egituraren eta organoen irudi zehatzak.

Xurgatutako energiak oso txikiak direnez, ez dago kalterik. Erabilitako uhin elektromagnetikoak oso energia gutxiko seinaleak dira,; haien fotoiek duten energia 10^{-7} eV dira gutxi gora behera, eta molekulen arteko loturak apurtzeko beharrezkoak diren energiak 1 eV inguru dira. X edota γ izpiek, berriz, 10^4 – 10^6 eV-ko energiak dituzte, eta zelulei kalte handia egien diezaieke. Arazoak sor daitezke metalezko materialekin ala tresna elektronikoarekin, hau da, bihotzeko balbulekin eta taupada-markagailuekin, besteak beste. Kontuan hartu behar dugu metaleken emandako erantzuna aldakorra den eremu magnetiko bati (ikusi hurrengo gaia). Babestuta ez dauden ekipo elektronikoek elkarrekintza dute eremu elektromagnetiko batekin, eta posible da gaizki ibiltzea azterketa egin ondoren. Gainera, gorputzaren ehunetan badaude partikula kargatuak, eta, eremu elektromagnetikoak direla eta, korronteak sortzen dira, ehunak eta zelulak berotuz. Arriskua gutxikia da, baina, dena dela, horrelako azterketa bat egin baino lehen gaixoaren egoera analizatzen da proba egiten ahal duen ala ez erabakitzeko.

VII INDUKZIO ELEKTROMAGNETIKOA

1. SARRERA

1820an Oersted-ek magnetismoaren eta elektrizitatearen arteko erlazioari buruzko eztabaida sortu zuen. Oersted-ek esperimentu bitxi bat egin eta deskribatu zuen: orratz magnetizatu bat korronte-hari bati hurbilduz gero, orratza desbideratu egitzen zela frogatu zuen. Horrek esan nahi zuen eremu elektrikoek eremu magnetikoak sortzen dituztela, hau da, korronte elektriko batek (eremu elektrikoa) eremu magnetiko bat sortzen duela bere inguruetan… Baina, orduan, kontrakoa posible da? Zein da bi eremu hauorien artean dagoen lotura berezia? Zergatik daude hain sakonki lotuta, elkarreragin ezberdinak badira?

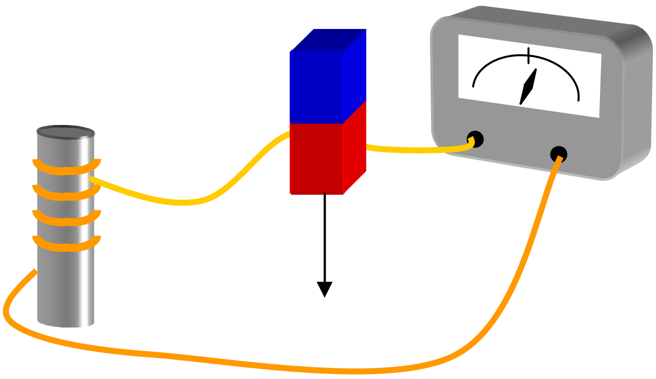
Faraday-ek sinetsi zuen eremu magnetikoak era egokian erabiliz posiblea zela korronteak sortzea,. Eta asmo horrekin hasi zen esperimentuak diseinatzen eta gauzatzen hasi zen 1831etik aurrera. Behin eta berriro saiatu zen korronte bat martxan ipintzen eremu magnetiko baten barruan dagoen zirkuitu batean. Baina hipotesia baieztatzea ez zen berak pentsatzen zuen bezain erraza… Eta nahiz eta iman ahaltsuak erabili eta esperimentu anitzak osatu, inoiz ez zebilen korronterik zirkuituan. Emaitzak etsigarriak ziren.

2. KORRONTEEN SORKUNTZA

Gauzak horrela, beste esperimentu bat osatu zuen. Bi zirkuitu erabili zituen, biak eraztun-itxura zuen burdinazko nukleo batean biribilduta. Bata bateriarekin (primarioa) eta bestea galbanometroarekin (sekundarioa) konektatuta zeunden. Hipotesia hauxe zen: primarioan korronte bat ibiltzean, eremu magnetiko bat sortuko da. Nukleo ferromagnetikoan eremua areagotu eta beste zirkuitura bideratuko da. Horrela, korronte bat sortuko da sekundarioan. Galbanometroan, orratzaren desbideraketak adieraziko digu korronte induzitua sortu egin dugula, eta horrela izatekotan, noranzkoa.

Berriro esperimentu horretan ere, emaitzak etsigarriak ziren: ez zegoen erantzunik galbanometroan. Edo, bestela esanda, ez zegoen korronterik sekundarioan. Baina, aldi berean, Faraday oso fenomeno bitxi batez konturatu zen: primarioa piztean eta amatatzean bai, galbanometroaren orratza desbideratu egin zen, eta, gainera, kontrako noranzkoan kasu bakoitzean. Zer gertatzen ari zen? Bateriak eragina zuen esperimentuan?

Bateriaren eragina baztertzeko beste esperimentu bat bururatu zitzaion Faraday-ri: burdinazko pieza batean hari bat biribildu, galbanometroa konektatu eta zirkuitua itxi zuen. Bateriarik gabeko zirkuitu bat zeukan. Pieza osoa bi imanen artean kokatu zuen. Geldirik badago, ez dabil korronterik zirkuituan. Baina hasten badugu pieza imanetik urruntzen edota imanerai hurbiltzen badugu, galbanometroaren orratza desbideratzen da! Beraz, bateriak ez zuen eraginik aurreko esperimentuetan.



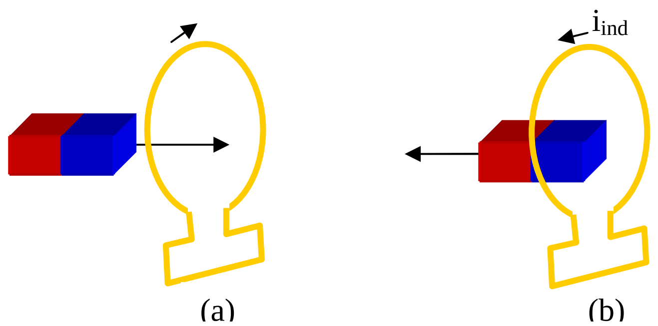
VII.1. *irudia. bBeste esperimentu bat. Bateriarik gabeko zirkuitu bat dugu. Iman bat zirkuituari hurbiltzean edota urruntzean galbanometroaren orratza desbideratzen dae oreka-posiziotik.*

Nola azaldu emaitza? Nola azaldu korrontearen sortzeakuntza aztertutako kasuetan? Zergatik ez dabil korronterik pieza geldirik badago? Erantzun bakarra hauxe da: eremu magnetiko bat sortzea edota erabiltzea ez dela nahikoa. Edo bestela esanda, ez da nahikoa eremu magnetiko aldakor bat erabiltzea,; ezinbestekoa da bere **fluxua** aldakorra izatea ezinbestekoa da.

2.1. Iee induzitua. Faraday-ren legea

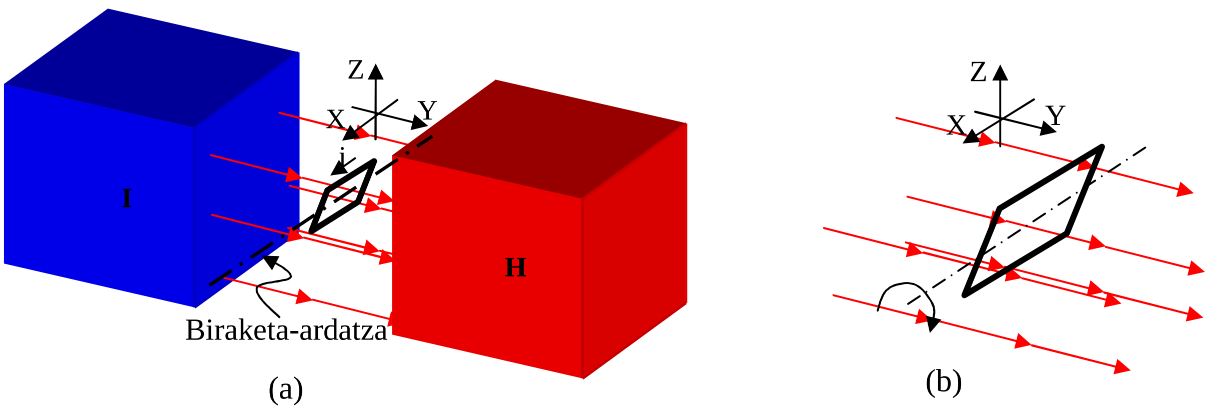
Faraday-ek hurrengo proposamen hau egin zuen: zirkuitu batean korronte bat sortzeko, zirkuituak mugatzen duen gainazalean zehar denborarekiko aldakorra den fluxu magnetiko bat sortu behar dugu. Irudiko kasuan, adibidez, harian korronte bat sortzea posiblea da baldin eta imana hurbiltzen ala urruntzen badiogu.

Zenbat eta azkarrago hurbildu (ala urrundu) orduan eta handiagoa izango da intentsitate induzitua. Hau da, horrela sortutako intentsitatearen balioa aldaketaren mende dago.



VII.2. *irudia. (a) Imana zirkuituari hurbiltzen ari zaio; (b) imana zirkuitutik urruntzen ari da. Bi kasuetan induzitzen da korrontea induzitzen da espiran induzitzen da, baina kontrako noranzkoan.*

Beste adibide bat: elektroiman batek sortutako eremu magnetikoan dagoen zirkuitua biratzen hasten bagara, korronte bat sortuko dugu zirkuituan. Eta kontrako noranzkoan biratzen badugu, korronte induzitua ere kontrako noranzkoan ibiliko da.



VII.3. *irudia. (a) Espira elektroiman baten eremu elektrikoan; (b) espira biratzen hasten bada fluxu magnetikoa aldakorra da espirak mugatutako gainazalean zehar eta korrontea induzitzen da.*

Hau da, nahiz eta eremua bera konstantea izan, zirkuitu batean zehar bere fluxua aldatzen badugu korrontea induzituko dugu. Fenomenoa sakonki aztertu ondoren, Faraday-ek ondorioztatu zuen iee induzituaren balioa eta eremu magnetikoaren fluxu-aldaketa proportzionalak zirela :

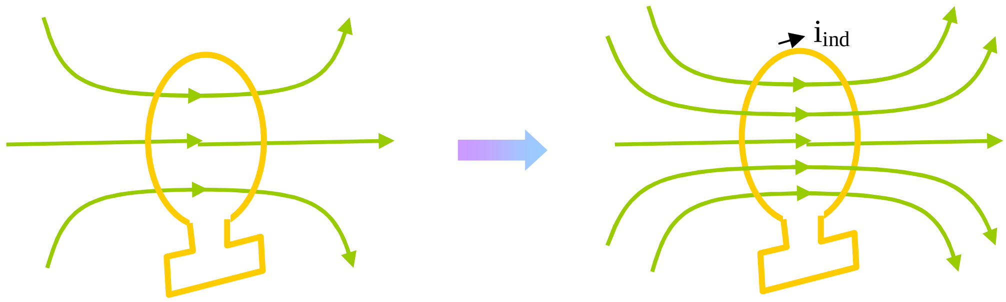
$$\varepsilon_{ind} = -\frac{d\phi_B}{dt}$$

Horixe da Faraday-ren legea, hain zuzen. Eta $\varepsilon = \oint \vec{E}d\vec{l}$ dela kontuan hartuta, beste era batean adieraz dezakegu:

$$\oint \vec{E}d\vec{l} = -\frac{d\phi_B}{dt}\text{, non } \phi_B = \oint \vec{B}d\vec{A} \text{ baita.}$$

Zirkuituaren orientazioa kontuan hartzeko, berriro eskuinemako eskua erabiliko dugu berriro: eskuaren atzamarrak $\oint \vec{E}d\vec{l}$ integralaren noranzkoan lerrokatzen baditugu, hatz lodiak adieraziko du $d\vec{A}$ bektorearen noranzko positiboa.

Zergatik zeinu negatiboa? Intentsitatearen noranzkoa adierazteko. Hobeto ulertzeko, adibide bat aztertuko dugu. Demagun irudiko espira dugula, eta eremu magnetiko baten barruan dagoela. Espiran zehar fluxua handitzen ari da, eta intentsitate induzitua ibiltzen hasten da, irudian ikusten den noranzkoan. Fluxua gero eta handiagoa bada, $\frac{d\phi_B}{dt} > 0$ da. Baina eskuinemako eskuaren- legearen arabera, dabilen intentsitatea negatiboa da. Horrek esan nahi du $\varepsilon_{ind} = -\frac{d\phi_B}{dt}$ dela, beraz.



VII.4. *irudia. Fluxu- aldaketa eta korronte induzituaren noranzkoa. Denbora aurrera doala, irudiko espiran fluxu magnetikoa (berdez) areagotzen da. Ondorioz, fluxuaren deribatua denborarekiko positiboa da, iee induzitua negatiboa, eta induzitzen den intentsitatea irudiko noranzkoan dabil.*

Duda bat sor daiteke: zein gainazal hartu behar dugu kontuan fluxua kalkulatzeko? Zirkuituak mugatzen dituen gainazalak infinituak dira eta! Hartutako gainazalak ez du eraginik emaitzan, fluxua berdina izango da gainazal guztietan. Horren azalpena eremu magnetikoaren ezaugarri berezietan datza: eremu magnetikoaren eremu-lerroak jarraituak dira, ez dute ez iturririk ez isurbiderik. Ondorioz, zirkuituak berak mugatzen dituen gainazal guztiak zeharkatzen dituzten eremu-lerroak berak dira.

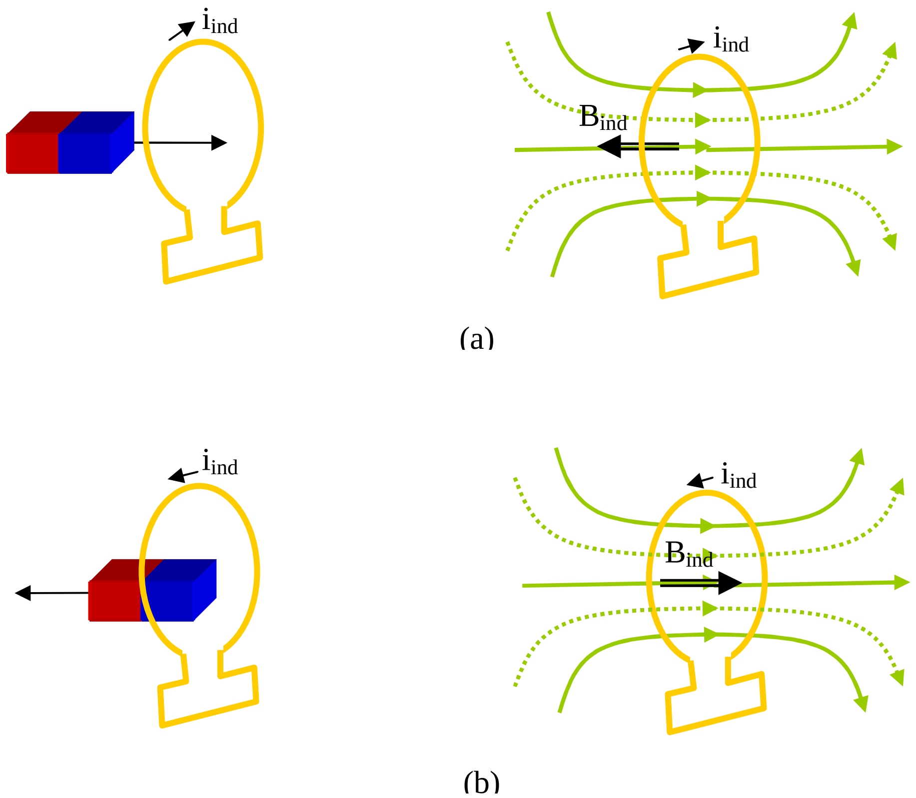
Faraday-ren legea, adierazteko bigarren formula, (hau da, $\oint \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d\phi_B}{dt}$),

sakonkiago aztertzen badugu, ematen du orain arte ikusitakoaren kontraesana dela. Gogora ezazu eremu elektriko induzituak kontserbatzaileak direla ondorioztatu genuela,; hau da, $\oint \vec{E} d\vec{l} = 0$ denez, energia potentzial elektrikoa definitzenu ahal dugula. Baina, orain, eremu magnetikoak kontuan hartuta, erabili behar dugun erlazioa hauxe da: $\oint \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d\phi_B}{dt}$. Ezin dugu erabili (ezta definitu ere) potentzial -funtziorik?

Edo, bestela esanda, zergatik ez da energia kontserbatzen? Esan behar dugu iItxurazko hutsegitea dela. Energia kontserbatzen da, baina orain kontuan hartu behar ditugu elkarreraginaren bi aldeak, elektrikoa nahiz magnetikoa, kontuan hartu behar ditugu.

2.2. Korronte induzitua. Lenz-en legea

Ez dugu ezer aipatu momentuz korronte induzituaren noranzkoari buruz. Faraday-ek ikusi zuen esperimentuetan fluxu magnetikoa hainbat era ezberdinetan aldatu bazuen galbanometroaren orratza noranzko batean edo bestean desbideratzen zela. Faradey-rekin batera, beste ikertzaile batzuek ere arazo bera aztertu zuten, eta Lenz-ek nahiz Faraday-ek, bakoitzak bere kabuz, erlazio bat proposatu zuten: intentsitate induzituak sortzen duen eremu magnetikoak kontra egiten die intentsitatea bera sortzen duten aldaketei kontra egiten du.



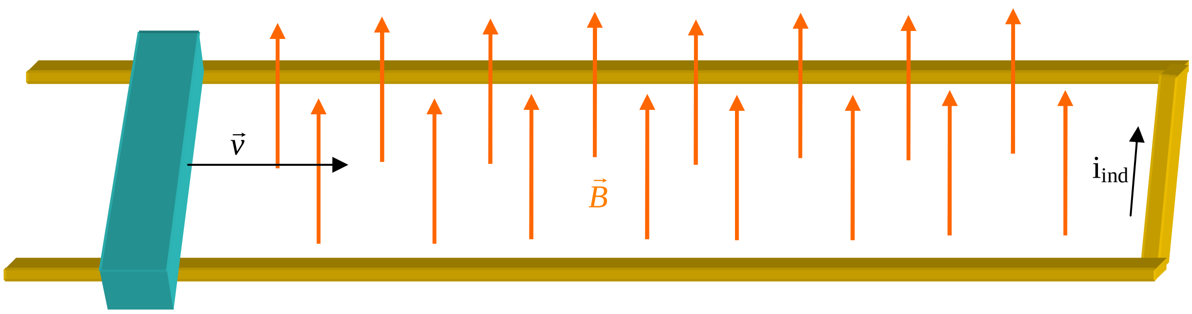
VII.5. *irudia. Lenz-en legea. (a) Imana hurbiltzen ari zaio zirkuituari. Fluxu magnetikoa handitzen ari da, zehatzago, areagotzen ari da. Intentsitate induzituak sortzen duen eremuak, beraz, imanak sortutakoaren kontrako noranzkoa du. (b) Kasu honetan ere, fluxua aldatzen ari da, baina orain murrizten ari da, imana espiratik urruntzen ari delako. Intentsitate induzituak sortzen duen eremuaren noranzkoa eta imanak sortutakoarena berak dira.*

Adibide batekin hobeto uler dezakegu ondorio hori. Demagun bateriarik gabeko zirkuitu bat dugula eta iman bat hurbiltzen ari zaiola. Fluxu- magnetikoaren aldaketa gertatzen ari da: gero eta handiago da fluxu hori. Horrek esan nahi du, imana hurbildu bitartean korrontea induzituko dela zirkuituan. Zein noranzko du korronte horrek? Fluxu-aldaketaren kontra egiteko, hau da, fluxuaren handiagotzearen kontra egiteko, korronte induzituak sortu behar duen eremu magnetikoa imanak sortutakoaren kontrakoa izango da, irudian ikusten den bezala.

Imana urruntzean, korronte induzituaren noranzkoa kontrakoa izango da. Imana urrunduz gero zirkuitua zeharkatzen duen fluxu-magnetikoa txikiagotu egiten da, eta joera horren kontra egiteko korronte induzituak sortutako eremua imanak sortutakoari gehitzen zaio.

2.3. Higiduraren bidezko iee induzitua

Ikusi egin dugunez, zirkuitu itxi batean korronte bat sortzeko fluxu- magnetikoen aldaketak gertatu behar dira. Eta aldaketa horiek sortzeko, ez da beharrezkoa eremua bera aldakorra izatea. Orain, hHorrelako kasu berezi bat hartuko dugu kontuan. Demagun R erresistentziadun bi errail ditugula, eta haien gainean barra bat labaintzen dela, abiadura konstantez eta marruskadurarik gabe. Osatu egin dugu, beraz, zirkuitu berezi bat: barra labainduz gero zirkuitu horien dimentsioak aldakorrak dira.



VII.6. *irudia. Higiduraren bidezko fluxu- aldaketak. Barra bat (urdinez) R erresistentzia dituten bi errailen gainean labaintzen ari da, v abiadurazabiaduran. Espazio- alde horretan eremu magnetiko bat sortu dugu (laranjaz). Labainketa-planoarekiko perpendikularra eta uniformea da. Korrontea induzituko dugu barraz eta errailez osatutako zirkuituan.*

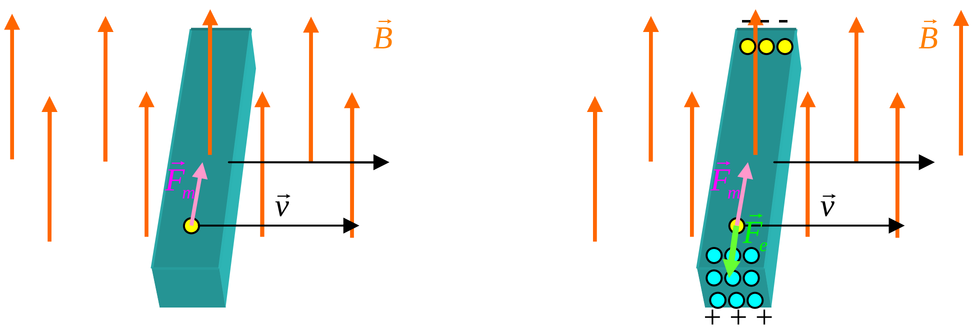
Espazio- alde horretan eremu magnetiko uniforme bat sortzen badugu, zirkuituan fluxu- aldaketak gertatuko dira eta, horren ondorioz, intentsitate induzitua bat ibiliko da. Balioa kalkula dezakegu aurreko formulak erabiliz:

$$\phi_B = \int_A \vec{B}d\vec{A} = AB = BvLt \Rightarrow \frac{d\phi_B}{dt} = -BvL \Rightarrow \varepsilon = BvL \Rightarrow i = \frac{BvL}{R}$$

non kontuan hartu baitugu eremua uniformea eta zirkuituarekiko perpendikularra dela. Eta horretaz gain, zeintzuk diren zirkuituaren dimentsioak denboraren mende. Eta emaitza hauxe da: erloju-orratzen kontrako noranzkoan ibiliko da intentsitatea. Eta horrela dela baieztatzen dugu neurketak osatu ondoren. Nola azaldu horrelako jokabiderik? Hobeto ulertzeko Lorentz-en indarra erabiliko dugu, higiduran dagoenean barraren kargei zer gertatzen zaien aztertzeko. Hasiko gara barra bakarrik bultzatzen ari garela.

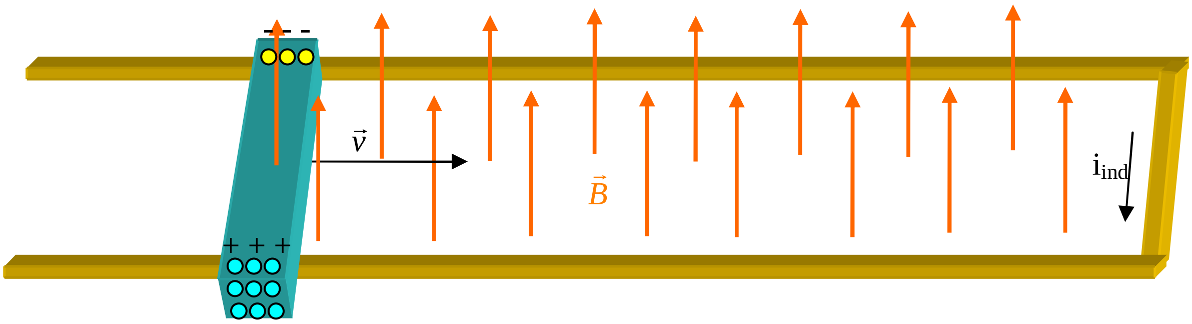
Elektroi bakoitzak jasaten duen indar magnetikoaren balioa hauxe da: $q_e vB$. Horren ondorioz, barra polarizatzen da, eta oreka- egoerara iritsiko da indar elektrikoek eta magnetikoek elkar deuseztatzen dutenean, hau da: $F_m = F_e \Rightarrow q_e vB = q_e E \Rightarrow E = vB$. Beraz, barra higitzenduran mantentzen badugu barra, haien ertzen artean potentzial-aldediferentzia diferentzia bat sortzen dugu. Bere balioa hauxe da:

$$\Delta V = -\int \vec{E}d\vec{l} = EL = vBL$$



VII.7. *irudia. Barraren elektroi batek duen indar magnetikoa. Barra higitzean, bere elektroieak indar magnetikoa izango dute eremu magnetikoaren barruan. Desbideratu eta, irudian ikusten den bezala, barraren ertz batean metatzen dira. Horren ondorioz, kanpoko eremu magnetikoaz gain, eremu elektriko bat sortzen da barraren barruan. . Bere eragina funtzioaEremu elektrikoaren eraginez elektroien gaineko indar magnetikoa ahultzea ahultzen da, baina elektroiek desbideratzen jarraitzen dute. Zenbat eta elektroi gehiago metatu, orduan eta handiagoa da indar elektrikoa, eta, azkenean, orekan, bi indarrek elkar deuseztatzen dute.*

Orain, errailen gainean kokatuko dugu barra. Higitzenduran hasi ondoren korrontea neurtuko dugu zirkuituan, potentzial-alddiferentziea diferentzia mantentzen dugulako barraren ertzen artean.



VII.8. *irudia. Barraren eragina zirkuituan. Potentzial-aldea diferentzia sortu da barraren ertzen artean, eta, ondorioz, errailen korrontea dabil.*

Barra zeharkatzean, elektroiek energia gehiago hartzen dute indar magnetikoa dela eta. Ez dugu orekarik lortuko indar elektrikoaren eta magnetikoaren artean:; izan ere, kargak gelditurik gabe higitzen diraenez, indar elektrikoa magnetikoa baino pixka bat txikiagoa da eta.

Bestela esanda: iee bat diseinatu dugu!. Eta bere balioak Faraday-ren legeak adierazitakoa da:

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon &= vBL \\ \frac{d\phi_B}{dt} &= -vBL \end{aligned}\right\} \Rightarrow \varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt}$$

Korrontea ibiltzean, errailak berotzen dira zirkuituaren erresistentziaren ondorioz errailak berotzen dira. Nondik hartu du energiía sistemak? Energia kontserbatzen dela esan dugu, baina, nola? Ez dugu ahaztu behar zirkuituan barra abiadura konstanteaazn higitzen jarraitzeko bultzatu egin behar dugula;, bestela, korrontea ibiltzean, kontrako noranzkoanko jasango du indar magnetikoa, jasango du kanpoko eremu magnetikoa dela eta. Eta horrela, sistema bultzatzean, energia ematen diogu:

$$\vec{F} = -\vec{F}_m \Rightarrow \vec{v} = kte$$

$$\left.\begin{aligned} \left|\vec{F}_m\right| &= \left|\vec{F}\right| = iLB \\ i &= \frac{\varepsilon}{R} = \frac{vBL}{R} \end{aligned}\right\} \Rightarrow F = \frac{v}{R}(LB)^2$$

Egindako lana eta potentzia Δt denbora- tarte zehatz batean, beraz, hauexek dira:

$$W = F\Delta x = Fv\Delta t \Rightarrow P = Fv = \frac{1}{R}\left(LBv\right)^2$$

non Δx denbora-tarte horretan barrak osatu duen distantzia baita.

Aplikazioetan oso egoera arrunta da hori eta horrela sortutako korronteak dira ***hondakin korronteak*** izenekoak dira. Horren ondorioz, besteak beste, pieza berotzen da (Joule efektua), eta, hori dela eta, fenomenoa kaltegarria izan daiteke. Berotzeari saihesteko zirrikituak egiten dira piezetan, edota materialak ijezten dira,; isolatzaile bat xaflen artean.

Beste kasu batzuetan, ordea, berotzea horiren sortu nahi izatenkuntza bilatzen da:; hauorixe da, hain zuzen, motor elektrikoetan erabiltzen den galga magnetikoen oinarria, adibidez.

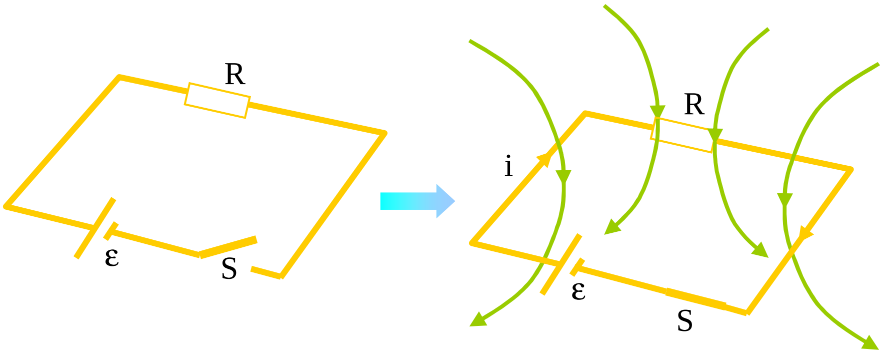
3. INDUKZIOA ZIRKUITUETAN

Zirkuituetan eremu magnetikoen denborarekiko fluxu-aldaketak gertatzen dira, behin eta berriro. Batzuetan, bilatzen ari garen efektua da,; beste batzuetan, berriz, saihestu nahi diougun efektua. Ezaugarri hori hobeto adierazteko eta erabiltzeko, induktantzia- koefizienteak erabiltzen ditugu. Eta zirkuituaren beste ezaugarri bat dira.

3.1. Autoinduktantzia

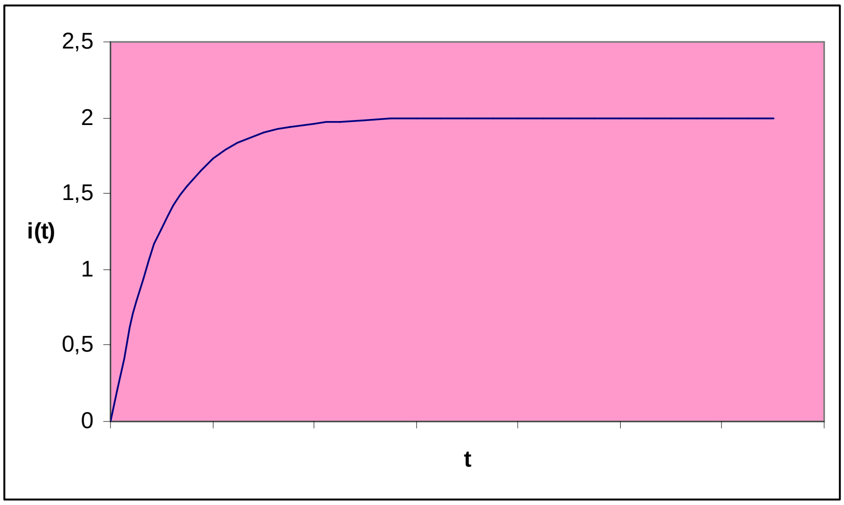
Hasiko gara zirkuitu bakar baten autoinduktantzia aztertzen;, hau da, zirkuituak berak fluxu magnetiko aldakorrak sortzeko gai denez, edozein korronte- aldaketa gertatzen bada, kontuan hartu beharko dugu indar elektroeragile induzitu bat kontuan hartu beharko dugu.

Egoera hori oso arrunta da, ia aplikazio guztietan (ordenagailuak, telebista, autoaren sistema elektrikoa) korronteak denborarekiko aldakorrak dira eta. Baina, nahiz eta korronte iraunkorrak erabilitzea, efektua aurkitzen dugu etengailua piztean edota amatatzean: zirkuitua piztu ondoren korronteak zerotik beste balio zehatzeraino igotzeko joera du,; baina horrek eremua magnetiko aldakor bat dakar, eta, honrrekin batera, zirkuituak mugatzen duen gainazalean zehar fluxu magnetikoak ere handitzeko joera izango du denbora aurrera doala. Hau da, iee induzitzen da, eta zirkuitu-bateriaren kontra jotzen duena. Ondorioz, korrontea ez da hain azkar aldatzen (ikusi grafikoa VII.10 irudian)



VII.9. *irudia. Korronte zuzeneko zirkuituaren autoinduktantzia. Zirkuitua piztean korrontea ibiltzen hasten da,; baina orduan zirkuitua zeharkatzen duen fluxu magnetikoa areagotzen da, eta, ondorioz, horren kontra jotzen duen iee bat induzituko da.*

Denbora- tarte batean piztuta egoman ondoren, zirkuitua amatatzeko etengailua irekitzen badugu, berriro joera izango da intentsitatea aldatzekoa joera izango da, zerora pasatuzen. Baina, iee induzitua dela eta, murrizketa moteldu egingko da.



VII.10. *irudia. Korrontea zirkuituan etengailua itxi ondoren. Etengailua itxi bezain laster korrontea ez da bat-batean aldatzen, denbora-tarte labur bat ematen behar du balio iraunkorrera iritsi arte. Zenbat eta handiagoa izan autoinduktantzia, orduan eta motelago iritsiko da balio horretara.*

Beraz, noiz hartuko dugu kontuan? Korronte zuzena bada, zirkuitua piztean eta amatatzean, eta korrontea alternoa bada, bateriaz gain indar elektroeragile induzitua kontuan hartu beharko dugu zirkuituaren jokaera aurresateko.

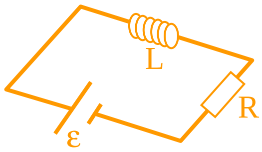
Beste aukera bat: solenoide bat zirkuituan konektatzean dugunean. Solenoidean induzitzen diren iee-ak ez dira mespretxagarriak, eta zirkuituaren helburuen

RL, LC eta RLC zirkuituak

Zirkuituetan induktoreak badaude era berean ebazten ditugu, hau da, Kirchhoff legeak erabiltzen ditugu intentsitatea aurresateko ere.

RL zirkuituak:

Irudiko zirkuitua dugu; honako hau betetzen da:

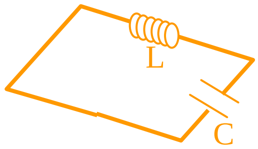


$\varepsilon - iR + \varepsilon_{ind} = 0 \Rightarrow \varepsilon - iR - L\dfrac{di}{dt} = 0$. Ekuazio diferentzial bat da. RC zirkuituetan garatu genuenaren antzekoa. Emaitza, beraz, parekotasuna erabiliz, hauxe da: $i(t) = \dfrac{\varepsilon}{R}\left(1 - e^{-Lt/R}\right)$

LC zirkuituak:

Irudiko zirkuitua dugu; honako hau betetzen da:

$\dfrac{q}{C} + L\dfrac{di}{dt} = 0 \Rightarrow \dfrac{q}{C} + L\dfrac{d^2q}{dt^2} = 0$. Beste ekuazio diferentzial bat dugu.



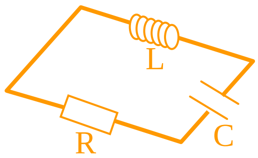
Kasu horretan ere, beste ekuazio baten antza du, osziladore baten ekuazioa diferentzialaren antza, hain zuzen. Intentsitatea, beraz, oszilakorra da. Hau da, erresistentziarik gabe (egoera ideala, jakina), karga behin eta berriro lekualdatzen ari da kondentsadorearen plaka batetik bestera, periodikoki gainera:

$i(t) = -Q_0 \omega \sin\left(\omega t + \phi\right)$, non Q_0 hasierako karga eta $\omega = \dfrac{1}{\sqrt{LC}}$ baitira, hurrenez hurren, eta ϕ hasierako egoeraren mende baitago.

RLC zirkuituak:

Irudiko zirkuitua dugu; honako hau betetzen da:

$-L\dfrac{di}{dt} - iR - \dfrac{q}{C} = 0 \Rightarrow L\dfrac{d^2q}{dt^2} - R\dfrac{dq}{dt} - \dfrac{q}{C} = 0$. Zirkuitua aurreko kasuaren antzekoa da: orain erresistentzia bat dugu, eta horrek esan nahi du oszilazioak gertatzen direla berriro kasu horretan ere, baina energia poliki-poliki galtzen ari da erresistentzian karga kondentsadorearen plaka batetik bestera pasatzean.



Bestela esanda, intentsitatearen oszilazioak indargetuak dira. Kondentsadorean metatuko karga gero eta txikiagoa da: $q(t) = Q_0 e^{-\alpha t}\cos\left(\omega' t + \phi\right)$, non $\alpha = \dfrac{R}{2L}$ eta

$\omega'^2 = \omega^2 - \alpha^2$ baitira.

arabera oso erabilgarriak izan daitezke.

Zirkuitu batek sortzen duen eremu magnetikoa intentsitatearekiko proportzionala dela kontuan hartuta, zirkuituak mugatzen duen gainazalean zehar fluxu magnetikoa ere intentsitatearekiko proportzionala izango da, hau da, $\phi_B = Li$, non L zirkuituaren konstante propio bat baita, autoinduktantzia izenekoa. Unitatea NSn: henrya (H). Balioa zirkuituaren ezaugarri geometrikoen mende dago. Eta horrela kalkula dezakeguindar elektroeragile induzitua, beraz, horrela kalkula dezakegu indar elektroeragile induzitua, L autoinduktantzia erabiliz: $\varepsilon_{ind} = -\frac{d\phi_B}{dt} = -L\frac{di}{dt}$

3.2. Elkarren arteko induktantzia

Bi zirkuitu ditugunean, autoinduktantziaz gain, haien arteko induktantzia ere kontuan haertu behar dugu. Hau da, zirkuitu bakoitzak mugatzen duen gainazalean zehar fluxuak bi osagai izango ditu,: bata, zirkuituan bertan dabilen intentsitatearekiko proportzionala, eta, bestea, beste zirkuituaren intentsitatearekiko proportzionala. Beraz, fluxua adierazteko beste konstante bat definituko dugu, elkarren arteko -induktantzia izenekoa (M):

$$\phi_B = Li_1 + Mi_2$$

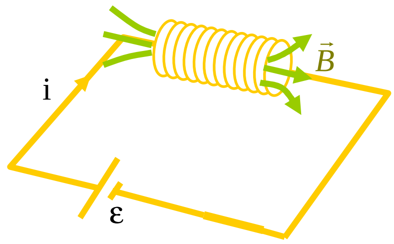
Eta konstante hori ere bakarrik dago geometrikoen mende. Indar elektroeragile induzitua, beraz, hauxe da: $\varepsilon_{ind} = -\frac{d\phi_B}{dt} = -L\frac{di_1}{dt} - M\frac{di_2}{dt}$.

3.3. Energia induktoreetan

Kondentsadore baten barruan eremu elektriko bat sortzean, energia metatzen dugu eremuan. Antzekoa gertatzen da solenoide baten barruan: eremu magnetiko bat bere barruan sortzean ere energia metatzen dugu energia, baina kasu horretan eremu magnetikoan: solenoidearen induktantzia dela eta, solenoideak intentsitatearen aldaketenak kontra jotzen du beti, eta, ondorioz, zirkuituaren bateriak lana egin behar du korrontea solenoidean ibiltzeko. Bateriak egindako lana bobinan metatutako energia da.

Hori dela eta, bobina batean metatutako energia -kopurua kalkulatzeko, zirkuituan dabilen intentsitatea sortzeko iee batek egin beharko duen lana kalkulatuko dugu:

$$\varepsilon + \varepsilon_{ind} = 0 \Rightarrow \varepsilon - L\frac{di}{dt} = 0 \Rightarrow \varepsilon = L\frac{di}{dt}$$



VII.11. *irudia. Solenoidean eremu magnetikoa sortzeko erabili dezakegun zirkuitua. Ezinbestekoa da korrontea solenoidean ibiltzea, beraz, iee bat behar dugu korronte hori sortzeko. Bestela esanda, eremu magnetikoa sortzeko energia behar dugu.*

Hau da, zirkuituan bateria eta solenoidea, besterik ez badugu, iee-ren balioak solenoidean induzitzen den iee-rena izan behar du. Bateriak emandako potentzia, beraz:

$$P = i\varepsilon = Li\frac{di}{dt}$$

Eta emandako energia kalkula dezakegu:

$$P = Li\frac{di}{dt} = \frac{dU_M}{dt} \Rightarrow dU_M = Lidi \Rightarrow U_M = \int_0^i Lidi = \frac{1}{2}Li^2$$

Horrek esan nahi du korrontea handitzean kanpoko iee-ak lana egin beharko duela harilari energia emateko. Korrontea murriztuko bagenu potentzia negatiboa izango litzateke, edo, bestela esanda, kanpoko iee-k induktoreetatik atera du energia.

4. MAXWELL-EN EKUAZIOAK

Indukzioa aztertu egin ondoren hobeto ulertzen dugu fenomenoa, baina oraindik ez dugu argitu zergatik dauden hain sakonki erlazionatuta elkarrekintza elektrikoa eta magnetikoa. 1873an Maxwell-ek erantzuna aurkitu eta elkarrekintza elektromagnetikoaren benetako izatea argitu zuen: elkarrekintza hori karga elektrikoa izeneko ezaugarriarekin erlazionatuta dago. Kargek eremu elektromagnetikoak sortzen dituzte, bi bektoreak ezaugarri dituztenak: eremu elektrikoa eta eremu magnetikoa.

Edo, bestela esanda, bakarrik dago elkarreragin bat bakarrik dago, elektromagnetismoa, eta eremu elektrikoa eta magnetikoa elkarrekintza horien aldeak edota osagaiak dira eremu elektrikoa eta magnetikoa. Osagai horiek eremuak sortzen dituten kargen eta behatzailearen arteko higidura erlatiboaren mende daude: kargekiko geldiunean dagoen behatzaile batek eta higitzen ari denduran dagoen beste batek deskribatzen dituzten osagai elektrikoak eta magnetikoak ezberdinak dira (ikusi eranskina). Horixe da elkarreraginaren bi osagaien zergatia.

Eremu elektromagnetikoaren teoria lau legek laburtzen dute: Maxwellen ekuazioaek, hain zuzen. Ekuazio horien bidez Maxwellek elektrizitatearen eta magnetismoaren arteko erlazioa zehatz-mehatz deskribatu zuen, eta horretarako kontzeptu berri batez baliatu zen: uhin elektromagnetikoa. Uhin elektromagnetikoak erabiliz, elkarrekintza elektromagnetikoaren deskribapen matematikoa osoa zen. Bere teoriaren arabera laborategian uhin elektromagnetikoak sortzea posible zenla,; eta 1887an Hertz-ek lehenengo uhin elektromagnetikoak sortu zituen, eta, horrela, Maxwellen lana baieztatu zuen.

Oso ondorio arrakastatsua zen hori: elkarrekintza elektromagnetikoaren menderatzeari esker egungo teknologia garatu zen, eta natura-prozesuen oinarria ulertzeko aurrerapauso handia eman zuten. Hain arrakastatsu zen non ikerlariek pentsatzen baitzuten gutxi falta zela unibertsoaren oinarriak ulertzeko gutxi falta zela. Baina XIX. mendearen hasieran oztopo handi batekin topatu ziren eta mekanika kuantikoa sortu zen. Partikula atomikoekin egindako esperimentuek hankaz gora ipini zuten *Fisika klasikoa* deritzona hankaz gora ipini zuten; horren ondorioz, eta gaur egun badakigu oinarrizko partikulen arteko elkarrekintzak, bereziki energia handiz, beste era batean aztertu behar ditugula.

Baina maila makroskopikoan Maxwellen legeak erabiltzen ditugunez, gogora dezagun zeintzuk diren lege horiek (hutsean):

$\oint \vec{E}d\vec{S} = \frac{q_{bar}}{\varepsilon_0}$	$\oint \vec{E}d\vec{l} = -\frac{d\phi_B}{dt}$
$\oint \vec{B}d\vec{S} = 0$	$\oint \vec{B}d\vec{l} = \mu_0\left(i + \varepsilon_0\frac{d\phi_E}{dt}\right) = \mu_0 i + \mu_0\varepsilon_0\frac{d\phi_E}{dt}$

Beste era batean (era diferentzialean) adieraztea ere posiblea da:

$\vec{\nabla}\cdot\vec{E}=\dfrac{\rho}{\varepsilon_0}$	$\vec{\nabla}\times\vec{E}=-\dfrac{d\vec{B}}{dt}$
$\vec{\nabla}\cdot\vec{B}=0$	$\vec{\nabla}\times\vec{B}=\mu_0\vec{j}+\mu_0\varepsilon_0\dfrac{d\vec{E}}{dt}$

non $\vec{\nabla}=\frac{\partial}{\partial x}\hat{i}+\frac{\partial}{\partial y}\hat{j}+\frac{\partial}{\partial z}\hat{k}$ *nabla eragilea* denbaita, eta ρ, $\vec{j}$ karga eta korronte dentsitateak, hurrenez hurren. Ezagunak dira, guztiak, azkena izan ezik. Ampereren legea pixka bat moldatu egin behar dugu. Hurrengo atalean azaltzen da zergatia.

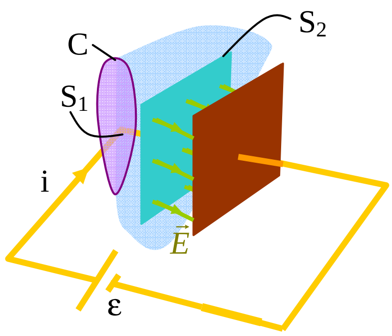
4.1. Desplazamendu- korronteak

Azter dezagun zer gertatzen den Ampereren- legea oso egoera berezi batean erabiltzen saiatzen garenean:, kargatzen ari den kondentsadore bat duen zirkuitu batean.

Kargatu bitartean, karga kondentsadorearen xafletan metatzen da eta zirkuituan dabilen korrontea aldakorra da denbora aurrera doala. Irudian ikusten den bezala, aukeratutako gainazalaren arabera, gainazala zeharkatzen duen korrontea ez da bera. Zergatik egiten du huts Ampereren legeak kasu horretan?

Maxwellek argudiatu zuen ez zela horrela: nahiz eta bigarren gainazala zeharkatzen duen korronterik ez egon, badago gainazala zeharkatzen duen fluxu elektriko aldakor bat. Ez dugu ahaztu behar kondentsadorea kargatu bitartean eta, ondorioz, karga bere xafletan metatu bitartean, barruko eremu elektrikoa gero eta bortitzagoa dela:

$$\left.\begin{aligned}\phi_E&=EA\\ E&=\frac{\sigma}{\varepsilon_0}\end{aligned}\right\}\Rightarrow\frac{d\phi_E}{dt}=\frac{d}{dt}\left(\frac{q}{\varepsilon_0}\right)=\frac{1}{\varepsilon_0}\frac{dq}{dt}=\frac{i}{\varepsilon_0}\Rightarrow i=\varepsilon_0\frac{d\phi_E}{dt}$$



VII.12. *irudia. Ampereren legea eta kargatzen ari den kondentsadorea. C kurba itxiak mugatzen ditu S1 nahiz S2 gainazalak. Eremu magnetikoaren zirkulazioa kalkulatzeko C ibilbidea erabiliz gero, balioa Ampereren legeak adierazten duena izango da, hau da, C ibilbideak mugatzen duen edozein gainazala zeharkatzen duen intentsitate garbia. Baina, kalkulu hori egiteko S1 eta S2 gainazalak erabiltzen baditugu kalkulu hori egiteko, emaitza beste batezberdina izango da. Ampereren legea zuzendu behar dugu, beraz.*

Gai hori kontuan hartzen badugu Ampereren- legean, horrela garatu ahal dugu:

$$\oint \vec{B}d\vec{l} = \mu_0\left(i + \varepsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt}\right) = \mu_0 i + \mu_0\varepsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt}$$

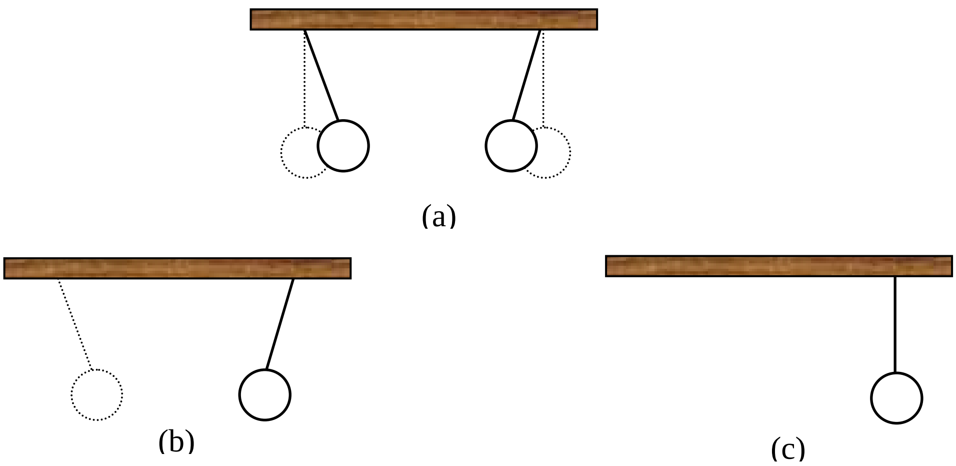
Eta azken gaiari desplazamendu-korrontea deritzo. Horren bidez adierazi nahi dugu denborarekiko aldakorra den eremu elektriko bat eremu magnetikoak sortzeko gai dela. Hautemangarria den eremu magnetiko bat sortzeko eremua elektrikoaren aldaketa-erritmoak oso handia izan behar duenez, zaila da horrelako fenomeno bat detektatzea horrelako fenomenoa.

Uhin elektromagnetikoak

Zer da uhin bat? Hedatzen den perturbazio bat. Esaterako, harri bat urmael batera jaurtitzen badugu, uraren azaleran perturbazio bat sortzen dugu. Perturbazio hori urmael osoan zehar hedatzen da, bazterrera iritsi arte. Uhinak sortu ditugula esaten dugu. Ez dago sistema baten deplazamendurik: urmaela zegoen lekuan dago, beraz, harriaren bidez emandako energia beste prozesu bat sortzeko erabil dezakegu, uhinak sortzeko eta hedatzeko, hain zuzen. Edo, bestela esanda, perturbazioak ingurugune batean zehar hedatzeko.

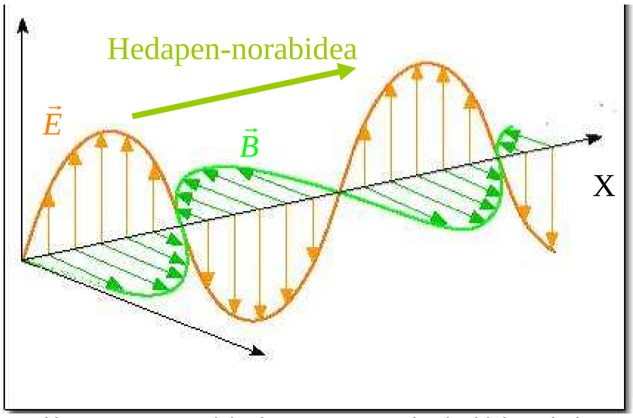
Eremu elektromagnetikoetan ere perturbazioak sor ditzakegu perturbazioakere. Kasu horretan, ez dugu ingurugune material baten egoera aldatzen, baizik eta eremua bera. Beraz, uhin elektromagnetikoak hedatzeko ez da beharrezkoa euskarri bat (hau da, ingurugune materiala), hutsean ere hedatzen dira.

Uhin elektromagnetikoen hedapena hobeto ulertzeko, kontuan hartu behar dugu eremu batean zer edo zer aldatzen badugu, aldaketa nabaria izango dela eremuaren puntu guztietan,; bai, baina aldaketaren berria abiadura zehatz batez hedatzen da. Esaterako, demagun irudiko bi esfera kargatuak ditugula, eta haien artean, jakina, indar elektrikoak sortzen ari direla. Hari baten bidez eskegita daude, irudian ikusten den bezala. Esfera bat kentzen badugu, horrek sortutako eremu elektrikoa desagertuko da eta bestea hasierako oreka- posiziora itzuliko da. Baina denbora- tarte batean dagoen moduan jarraituko dau, nahiz eta bestea ez egon. Zergatik? Eremuan sortutako aldaketeak denbora-tarte bat eman behar dutelako espazio puntu guztietara iristeko, aldaketa ez delako bat-batekoa ez delako, eta espazioan zehar hedatzen delako, argiaren c abiaduraz, gainera



(a) Hasieran bi esferak orekan zeunden, baina, behin kargatu ondorenta, haien artean indar elektrikoak sortzen dira eta oreka-posizioa berrian aurkituko ditugu. (b) Ezkerreko esfera kendu dugu, baina denbora-tarte bateanz besteak zegoen moduan jarraitzen du, bestea ezkerrekoa oraindik egongo balitz bezala. Zergatik? Eremuaren aldaketa ez da hedatu bere posiziora, eta, ondorioz, hasierakoa da oraindik espazioko puntu batzuetan. (c) Orain bai, aldaketa hedatu da eta bigarren esfera hasierako oreka-posiziora itzuli da.

Ondorioz, eremuaren perturbazio periodiko bat sortzen badugu, uhin elektromagnetikoak izango ditugu. Ez dugu ahaztu behar Maxwellen ekuazioen arabera eremu elektrikoa eta magnetikoa ez direla bata bestearekikon askeak, baizik eta elkarakoplatuta daudela. Ondorioz, periodikoki aldakorra den eremu elektriko bat sortzen badugu (ikusi irudia), berharekin batera eremu magnetiko bat sortuko dugu, periodikoki ere aldatzen dena. Perturbazioa beti plano berean gertatzen bada, linealki polarizatuta dagoela diogu, irudiko uhina dagoen moduan bezala,; baina posiblea da beste polarizazio batzuk aurkitzea.



Uhin elektromagnetiko baten irudikapena. Eremu elektrikoa eta magnetikoak aldakorrak dira. Une bateko eremuen bektoreak irudikatu ditugu. Denbora- tarte bat eman ondoren, uhinen gandorrak aurrerago aurkituko ditugu. Eta espazioko puntu bakoitzean eremuak periodikoki aldatzen direla ikusiko dugu.

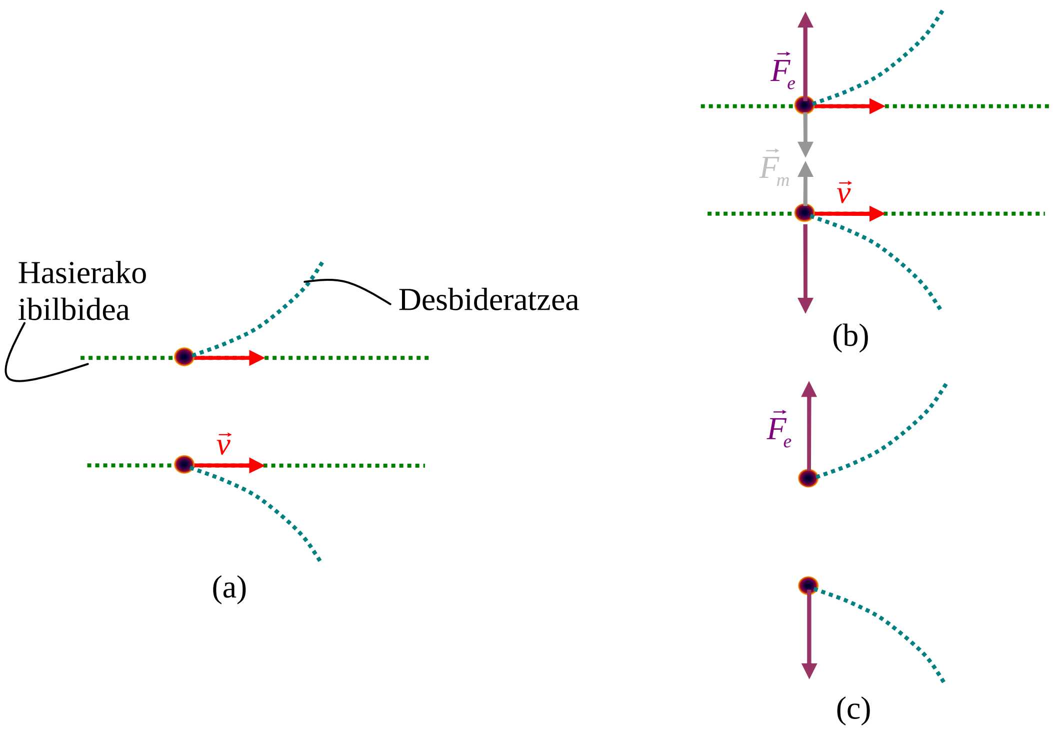
Maxwellen ekuazioetan oinarrituta uhin elektromagnetikoen hedapen-abiadura (hutsean) zehaztu ahal dugu,; honako haurrengoa da:

$$v^2 = c^2 = \frac{1}{\mu_0 \varepsilon_0}$$

Lehen esan dugun bezala, argiaren abiadura. Ez dugu ahaztu behar argia uhin elektromagnetikoa dela, jakina. Hori dela eta, emaitza ez da harritzekoa.

ERANSKINA:. ELKARREKINTZA ELEKTRO-MAGNETIKOA ETA BEHATZAILEAK

Maxwellen legeak azaldu ditugunean behatzaileen eragina aipatu dugu. Azter dezagun gaia sakonkiago. Demagun bi protoi ditugula gela batean, eta biak *v* abiaduraz abiaduran higitzen ari direla, bata bestearen gainean, irudian ikusten den bezala. Haien arteko elkarrekintzak eta higidurak deskribatzeko bi behatzaile daude. Bata, geldiunean dago gelan, eta bestea *v* abiaduraz ere higitzen ari da, protoiekin batera. Hau da, gelako behatzailea protoiak higitzen ari direla ikusten ari da eta beste behatzailea, berriz, biak geldiunean daudela ikusten biak.



(a)VII.13. *irudia: Bi protoiak higitzenduran gelako behatzailearen ikuspuntutik. (b) Protoiek dituzten indarrak gelako behatzailearen arabera. (c) Protoiek dituzten indarrak beste behatzailearen arabera.*

Argi dago bakoitzak modu bateko aurresango dituen indar magnetikoak eta elektriko ezberdinakak aurresango dituelaezberdinak direla: protoiekin batera higitzen ari denak indar magnetikorik ez dagoela esango du, eta, besteak, berriz, indar elektrikoak nahiz magnetikoak zehaztuko ditu. Baina biek ados egon behar dute ikusten duten bi protoien jokabidearekin ados egon behar da!

Gelako behatzailearen kalkuluen arabera, hauxe da karga bakoitzaren indar elektrikoaren eta magnetikoaren arteko erlazioa hauxe da:

$$\left.\begin{aligned} F_e &= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q^2}{r^2} \\ F_m &= \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{q^2v^2}{r^2} \end{aligned}\right\} \Rightarrow \frac{F_e}{F_m} = \mu_0\varepsilon_0 v^2 = \frac{v^2}{c^2}$$

Horrek esan nahi du protoien abiadura argiaren abiadura baina askoz txikiagoa bada, indar magnetikoa ere elektrikoa baina askoz txikiagoa izango dela, eta bi behatzaileek ikusiko dituztela bi protoienak bata bestearengandtik urruntzen, indar elektrikoa aldaratzailea dela eta. Beraz, bien behaketak bat datoz. Kontuan hartu behar dugu honako haurrengoa: eremu elektrikoa eta magnetikoa elkarrekintza baten bi alde, besterik ez diraela, eta, ondorioz, bata bestea bilakatzen da behatzaileen arabera.

Dena dela, gauza bat azpimarratu behar dugu: gelako behatzaileak besteak baino pixka bat beranduago geroago ikusiko ditu protoien talkak sabaiarekin eta zoruarekin kontra? Ez dugu ahaztu behar, nahiz eta oso txikia izan, protoien indar magnetikoek elektrikoen kontra jotzen dituztela, eta, ondorioz, karga bakoitzaren indar erresultantea ondoriozkoaerresultantea elektrikoa baino txikiagoa dela. Baina txikiagoa bada, protoien azelerazioak ere txikiagoak dira... Ezinezkoa da talkak egin gertatu arte protoiek empasatzen duten denbora-tartea ezberdina izatea,; beraz, bi behatzaileen erlojuak ez doazela aurrera aldi berean aurrera. Edo, bestela esanda, *denbora ezberdina da behatzailearen arabera*. Hauxe da, hain zuzen, erlatibitatearen ondorio nagusia....

IRUDIEI BURUZKO INFORMAZIOA

Baimena duzu testuan agertzen diren irudi batzuk kopiatzeko, banatzeko edota aldatzeko GNU Free Documentation License balditzapean. Honako hauek dira: V.5, V.10, V.13, V.14, V.24, VI.6 eta galbanometroaren irudia.