

MATERIAREN IZAERA DISKRETUA (eta II)

Beste artikuluan aipatu genituen ideak XX. menderarte ez ziren saiakera esperimentalen bidez aztertuak izan. Halaz ere, mende honetan fisikari guztiek materiaren izaera diskretua edo atomikoa ontzat ematen zuten. Froga hauek elektroien eskutik etorri ziren.

Mende honetan sartu baino lehen, 1833. urtean hain zuzen, Faraday-k elektrikaren eredu atomiko bat eskaini zuen. Zientzilari honek, elektrolisiari buruz zenbait saiakuntza egin ondoren, hau aurkitu zuen: elektrodo batetan 96.500 coulomb-etako karga batek mol baten eta elementuaren balentziaren arteko zatidura adinako materia ezartzen zuela. Faraday-k zera pentsatu zuen: materia berez atomikoa bazen, atomo bakoitzari karga elektrikoak kopuru zehatz bat zegokiokeela.

Faraday-k ikusitako beste fenomeno garrantzitsu bat "izpi katodikoak" izan ziren. Zoritzarrez bere garaiko huts egiteko teknikak ez ziren oso onak eta oztopo horren aurrean aurkitu zen berehala. Urte batzuk geroago huts-ponpa asmatua izan zen ordea eta, azkenik, 1855. urtean Geissler-ek aurrerakuntza batzuk ezarri zizkion. Guzti hori zela bide, 1870. urte inguruan gutxi gorabehera, Plücker eta Hittorf-ek izpi horien ezaugarri gehienak aztertuak zituzten. Izpi hauei buruz lau gauza demostratu zituzten: Huts-hodi batetan izpiak katodotik irteten zirela; lerro zuzenez higitzen zirela; beiraren kontra jotzean fluoreszentzia sortarazten zutela eta, azkenik, eremu magnetikoek desbidatu egiten zituztela. Saiakuntzak urtez urte zehaztuz joan ziren: horretaz Goldstein eta Hertz arduratu ziren Alemanian, eta Ingoterran Crookes. Alemandarrentzat izpi hauek uhin elektromagnetikozko mota berri bat ziren; Crookesentzat, aldiz, katodoaren kontra jo ondoren negatiboki kargatuta ateratzen ziren molekulak ziren. Gaur egun ongi dakigunez, bata nahiz bestea bide okerretatik zebiltzan. Ikertzaile gehienentzat gauza harrigarrienetako bat honako hau zen: eremu elektrikoak ez zituela izpi horiek desbidatzen. Hertz-ek hauxe

horregatik: Δ ERREFRAKTATUA = $\tau\Delta$

$$\boxed{E''_{\vec{o}\vec{a}} = \rho'vD \cos \left[\omega \left(t - \frac{x_q}{v_2} \right) \right]}$$

izpi honen anplitudea kalkulatzeko:

$$\rho' = \frac{\Delta \text{ ISLADATUA}}{\Delta \text{ INTZIDENTEA}} = \frac{\Delta \text{ ISLADATUA}}{\tau \cdot \Delta} \Rightarrow \boxed{\Delta \text{ ISLADATUA} = \rho' \tau \Delta}$$

Orain, itzulgarritasun-printzipioa kontuan hartzen badugu eta (7) eta (8) bi irudiak konparatzen baditugu zera ikusten dugu:

(8) irudian OQ direkzioan bi izpi daudela eta (7) irudian ez dagoela bat ere.

Honek zera esan nahi du, izpi horien baturak zero izan behar duela.

$$\boxed{E'_{\vec{o}\vec{o}} + E''_{\vec{o}\vec{o}} = 0}$$

$$\tau\Delta \cos \left[\omega \left(t - \frac{x_q}{v_2} \right) \right] + \rho'vD \cos \left[\omega \left(t - \frac{x_q}{v_2} \right) \right] = 0$$

$$\tau\Delta \cos \left[\omega \left(t - \frac{x_q}{v_2} \right) \right] \{ \rho' + \rho \} = 0 \Rightarrow \boxed{\rho = -\rho'}$$

Honen ondorio bezala:

(1) eta (2) bi ingurune bereizten dituen mugan izpi intzidentek eta izpi isladatuak fase berdina badute, (2) eta (1) inguruneak bereizten dituen mugan izpi intzidentek eta isladatuak fase esberdina izango dute.

Fasea aldatu egin behar dugun ala ez jakiteko teoria elektromagnetikoa erabili behar dugu. Teoria hau aztertuko bagenu erizpide honetara iritsiko ginateke:

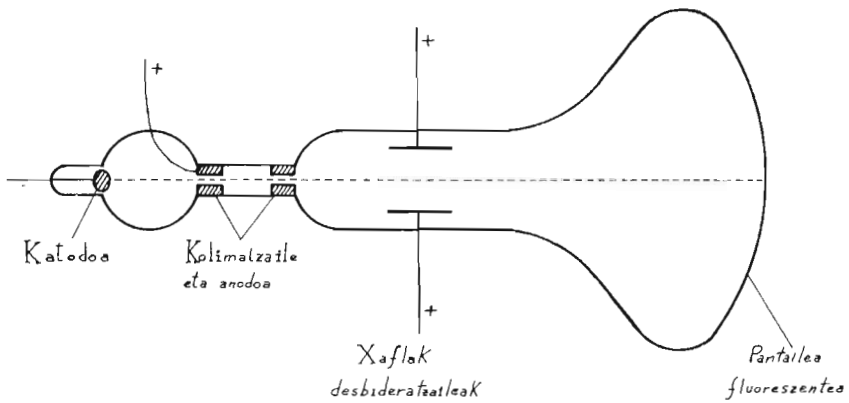
Izpi intzidentek eta isladatuak gainazalean fase berdina izango dute bigarren ingurunean hedatze-abiadura lehengoa baino handiagoa denean; eta desberdina alderantziz gertatzen bada.

JUANJO PEÑA

kalkulatu zuen: zenbatekoa izan behar zuen izpi kargatu horien abiadurak, lurreko eremu magnetikoak desbida zitzan baina berak zerabiltzan 1 v/mm-ko eremu elektrikoak desbida ez zitzan. Hertz-ek honela zion: "izpi horiek zatiki kargatuak badira, izango duten abiaduraz segundo bakoitzean Lurreko hamai-ka koadrante baino gehiago ibili beharko dute (hots, 10^8 m/s. gutxi gora-behera)... honelako abiadura bat gertatzea ez da oso probablea*.

1895. urtean J. P. Perrin-ek izpi-multzo bat katilu isolatu batean metatu zuen, eta bide batez negatiboki kargatuta zeudela ikusi zuen. 1897. urtean J. J. Thomson-ek eremu elektriko baten bidez desbidatu egin zituen; hori zela eta, karga elektrikoaren eta masaren arteko erlazioa aurkitu zuen; hots, e/m.

Thomson-ek erabili zuen hodi katodikoaren eskema ondoko irudian ikus daiteke.



1. IRUDIA

Irudian azaltzen ez diren bi bobinek paperarekiko elkartuta den eremu magnetiko bat eman dezakete.

Aurretik zatikien abiadura ezaguna izango balitz e/m erlazioa aurkitzea erraza izango litzateke: ezagutzen den B eremu magnetiko bat jarri eta izpien desbidazioa neurtu; dakigunez izpi kargatuek eremu magnetiko batetan R erradioko zirkunferentzia baten arku bat osatzen dute izan ere. Beraz,

$$e \cdot v \cdot B = \frac{mv^2}{R} \quad \text{edo} \quad \frac{e}{m} = \frac{v}{RB}$$

* H. Hertz: "Miscellaneous Papers". Macmillan, London, 1836.

Baina v abiadura ez zen ezaguna, eta aurkitzeko Thomson-ek eremu elektrikoa erabili zuen; zera egin zuen: desbidazio osoa zero izateraino egokitu zituen eremu elektrikoa eta magnetikoa. Kasu horretan indar elektrikoa eta magnetikoa berdinak izango dira:

$$eE = e \cdot v \cdot B \quad \text{edo} \quad v = \frac{E}{B}$$

balio hau lehen ikusi dugun ekuaziora eramanez:

$$\frac{e}{m} = \frac{E}{RB^2}$$

Zatikien abiadura handia azaldu bazen ere, ez zen Hertz-ek kalkulatu zue-na. Thomson-en eritziz Hertz-en akatsa hauxe izan zen: hodian gelditzen zen gasa kontutan ez hartzea.

Thomson-ek aurkitu zuen e/m erlazioaren balioaren arabera, izpi katodikoek hidrogeno atomoek baino karga askoz handiagoa edo masa askoz txikiagoa izan behar zuten. Garai hartan hidrogeno atomoaren masa ez zen ezaguna, baina bai bere kargaren eta masaren arteko erlazioa, 96.500 c/g-koa hain zuzen. Baina izpi katodikoen erlazio hori e/m 10^8 c/g-koa zen.

Hori ikusi ondoren Thomson-ek zera pentsatu zuen, izpi katodikoak atomo guztiek osagaiak zirela, eta honela zion: "Beraz, ikusgune honetatik, izpi katodikoetan materia egoera berri batean daukagu. Egoera honetan materia-zatiketa ohizko gas-egoeran baino askoz urrutirago joan da: egoera honetan materia guztia mota bat eta berdinekoa da; hori dela eta, elementu kimiko guztiak materia horretaz osaturik daude (*).

Baieztape hau egia oso hurbil dago, materialak elektroietatik aparte beste zatiki batzuk kontutan harturik noski. Baina Thomson-en garaian elektrikaren diskretutasuna ez zen oso erraz onartzen. Maxwell-en idea isurki jarrai baten idea zen, edo bestela "eter"-en desplazamenduaren azalpen bat. 1897. urtean Weichert-ek honela zion: "elektrika irudimenkari bat da, ez benetan dagoenik ezer, baizik gure pentsamenduan dagoen zerbait" (**).

Beraz, Thomson-ek aurkitu zuen giroa ez zen oso lagungarria izan. Baina beste nonbait ere elektroien existentziaren aztarnak azaltzen ari ziren. Holandan P. Zeeman-ek Faraday-k egin nahi izan zuen saiakuntza bat berregin zuen: Magneto baten bi buruen artean argi-iturri bat jarri zuen; hori egi-

(*) J. J. Thomson, Phil. Mag. 44, 312 (1897).

(**) P. Lenard "Über Kathodenstrahlen". Berlin-Leipzig, 1920.

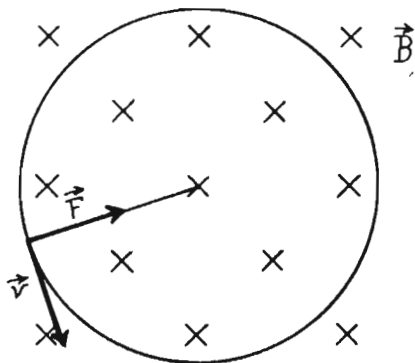
nik, iturrien lerro espektralak zabaltzen zirela ikusi zuen. Magneto kementsua-go bat erabiliz zera aurkitu zuen: lerro bakoitzak hiru lerro distantzikideak ematen zituela. Erdiko lerroaren frekuentzia hasierako lerroarena zen (hots, eremurik ez zegoeneko) eta eremuaren direkzioan polarizatuta zegoen. Beste bi lerroak eremuarekiko direkzio elkartuztean polarizatuta zeuden. Iturria eremuarekiko paraleloki ikusteko Zeeman-ek magnetoaren aurpegi batetan zulo bat egin zuen: erdiko lerroa desagertzen zela eta beste biak kontrako direkzioetan zirkularki polarizatuak zirela ikusi zuen orduan.

Guzti honi adierazpen bat aurkitu nahiz, H. A. Lorentz-engan jo zuen, Holandako bere garaiko teoriko handienarengana, alegia. Garai hartan Lorentz-en helburua materiaren teoria elektronikoko bat eraikitzea zen. Lorentz-ek Zeeman-en problemak oso pozik adierazi zizkion bere teoriaren bidez.

Zientzilari honek zera suposatu zuen: argia, iturriaren barruan dauden karga azeleratuen (elektroiak) bidez sortarazten dela. Karga horietariko baten higidura elipse bat baldin bada, hiru ardatz angeluzuzenetako hiru oszilazio linealez eman daiteke. Bedi eremuaren direkzioa x ardatzarena. Eremu magnetikoa jartzean x ardatzari dagokion higidurak ez du aldatzerik izan. Yz planoko bi oszilazio linealak bi kontrako biraketa-higidura hauen frekuentzia kontsidera daitezke. Eremua jartzean bi biraketa-higidura hauen frekuentzia aldatzen da, eta hauxe da hain zuzen beste bi lerroen eta beren polarizazioen kausa.

Hori kalkulatzeko, bedi $\delta\omega$ frekuentzi aldaketa, ω hasierako biraketa-higiduraren frekuentzia izanik. Hasierako biraketa-higiduraren kausa F_0 indar zentripetu bat izango da: $F_0 = m r \omega^2$. Eremua jartzean beste indar bat azaltzen da:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$



2. IRUDIA

Indar hau, q positiboa bada, eta \vec{B} eta \vec{v} norantzak irudian azaltzen direnak badira, zentru alderanzkoa izango da.

Mugimenduaren frekuentzia aldatu egingo da eta $\omega + \delta\omega$ izango da:

$$F + F_0 = m r (\omega + \delta\omega)^2 \simeq m r \omega^2 + 2 m r \omega \delta\omega$$

$\delta\omega$, ω -rekin alderaturik oso txikia bada.

$$F_0 = m r \omega^2 \text{ kenduz}$$

$$F = q \cdot v \cdot B = 2 m r \omega \delta\omega \text{ izango dugu.}$$

Baina,

$$v = \omega r \quad ; \quad \text{beraz,} \quad \frac{q}{m} = 2 \frac{\delta\omega}{B}$$

Lerroen polarizazio-direkzioa ikusi eta q negatiboa dela azaltzen da. Bestetik, q/m erlazioarentzat aurkitutako balioa izpi katodikoaren e/m -rena zen doioi. Hori ez litzateke erraz kasualitate hutsa izango. Horrela, piskana-piskana, fisika elektronikoaren mundua irekitzen joan zen.

AVOGADRO-REN ZENBAKIA

Mende honen hasieran, elektroiaren kargaren eta masaren arteko erlazioa bi era zeharo desberdinez neurtua izan bazen ere, elektroiaren karga hutsaren neurketa esperimentalak ez zegoen oraindik egina. Baina bestalde, garaiko teoria zela bide, elektrolisiko ioi monobalentearen karga e izango zela nahiko argi zegoen; beraz, e kargaren eta N_A Avogadro-ren zenbakiaren arteko biderkadurak faraday bat (96.500 coulomb alegia) izan beharko zuen.

Hori zela eta, Avogadro-ren zenbakia nolabait aurkituz gero, e -ren balioa ezaguna izango zen, eta alderantziz. Bi zenbaki hauen (hots, elektroiaren kargaren eta Avogadroren zenbakiaren) aurkikuntza bide desberdinez saiatu izan zen.

Mende hau baino lehen bazegoen jadanik N_A balioaren hurbilketazko ezaguera bat. 1871. urtean Lord Rayleigh-ek zera adierazi zuen: zeruaren urdintasuna N_A -ren balioaren ezaugarri bat zela. Airearen ez-homogenotasuna da, hain zuzen, kolore horren kausa; horri zor zaizkio aireko argi urdinak, uhin-luzera handiagoko argiak baino dispersio handiago bat jasaten bait du. Dispersatzen den kopurua airearen dentsitatearen fluktuazio estatistikoaren magnitudeez baldintzaturik dago, eta fluktuazio horien magnitudea 1 cm^3 airetan

dagoen molekula-kopuruaz baldintzaturik dago. Guzti hori zela bide, zeruaren argiaren eta Eguzkiaren benetako argiaren banaketa espektrala alderatu ondoren, Rayleigh-k N_A zenbakia 3×10^{23} eta 15×10^{23} -ren artean zegoela aurkitu zuen.

1909.urtean Perrin-ek (*) N_A neurtzeko hamalau metodo desberdinen laburpena eman zuen. Horietariko bat gorputz beltzen erradiazioan oinarritzen da. Beste hiru erradioaktibitatean, e. a. Denak oso adierazgarriak direla esan daiteke.

Guk horietariko bat aztertuko dugu hemen. Gai honi buruz argitaratutako 1.artikuluan (ikus Elhuyar 22.a) honako formula hau aurkitu genuen:

$$n = n_0^{-mgz/kt} = n_0^{-Mgz/RT}$$

Formula hau era erraz batez erabiltzeko gas berezi bat beharko litzateke. Gas horretako zatikien masak ezaguna izan beharko luke eta zatiki horiek ikuskorrak izan beharko lukete. Hori izango balitz, $n(z)$ z-ren funtziotan zatikien kontaketa eginez aurkitu ahal izango genuke. Eta orduan, formularen bidez k atera, eta k ezagutu ondoren N_A aurkitu ($N_A = R/k$ -ela medio).

Perrin-ek zera ikusi zuen: zatiki oso txikizko multzo bat isurki batetan murgiltzean zatikiak gas baten zatikiak bezala aritzen zirela. Multzo horretako zatikiak isurkiko molekulak ia existituko ez balira bezala sakabanatzen dira. Zatikiak handiegi izango balira, ekuazioaren m handiegia izango litzateke eta formulak zero emango liguke. Baina Perrinek tamaina oso egokiko zatiki-multzo baten esegidura lortu zuen; zatiki hauek denak ia berdinak ziren, eta beren diametroak 10^{-4} eta 10^{-5} cm artean zeuden. Hori zela eta, 3×10^{-3} cm-ko tarteko altuera desberdinetan zeuden zatikien kopurua kontatu ahal izan zuen. Aurkitutako balioak grafiko batera eramanez ($\log n = f(z)$) zuzen bat eman zuten. Zuzen horren malda $-N_A \mu g/RT$ zen, μ zatikien "masa efektiboa" izanik. Hau da, isurkiaren flotazio-efektua kontutan hartu behar zen eta, Arkimedesen hastapena dela medio, masa efektiboa hauxe izango dugu:

$$\mu = \frac{4}{3} \pi a (\rho - \rho')$$

ρ = zatiki-dentsitatea

ρ' = isurkiaren dentsitatea

a = zatikiaren erradioa

(*) J. P. Perrin "Mouvement Brownien et le Réalité Moléculaire", Ann. Chin. (ser. 8) 18,1 (1909).

Beraz, μ ezagutu ondoren eta R, T eta g ezagunak direnez gero, zuzenaren malda neurtu ondoren N_A atera daiteke; hori da, hain zuzen, Perrin-ek egin zuena.

MILLIKAN-EN SAIKUNTZA

N_A edo e-ren balioaren aurkikuntzarako egin diren saiakuntzen artean famatuena Millikan-ek asmatu zuena dugu. Zientzilari hau 1906 urtean hasi zen neurketa horietaz arduratzen.

Millikan-en saiakuntzaren oinarria, bere aurretik Wilson-ek erabilitako ber-bera zen. Hau da, masa ezaguneko zatiki bati e karga bat datzekio eta, beraz, ezagutzen ez den elektroiairen masak ez du parte hartzerik.

Millikan zientzilariak berak asmatutako tresna bat erabili zuen. Tresna honek bi xafra horizontal zeharo paraleloak ditu. Goiko xafren gainean olio-tanta oso txikiak sakabanatzen dira; horietariko batzuk xafrek duen zulo baten barrendik erori egingo dira.

Bi xafren artean argi-izpi bat botatzen da, eta izpiarekiko ardatza elkartuta duen betaurreko bat ipintzen. Olio-tantatxoak, argi-izpia dela medio, eta betaurrekoaren bidez, izartxo batzuren antzera ikusten dira. Tantaren pisua, airearen bultzada eta biskositatearen indarrak direla medio, izartxo horiek jaisten ikusiko dira.

Olioia tapta erataraz pasatzean elektrikatu egiten da; seguruenik elektrikatze horren kausa marruskadura izango da.

Tantek hartzen duten karga negatiboa izaten da. Orain goiko xafra potentzial positibo batera eta behekoa negatibora eramaten baditugu, bi xafren artean dagoen espazioa eremu elektriko uniforme bat bilakatzen zaigu. Eremu horren intentsitatea behar den bezala aldatzen badugu, tantaren gainean azaltzen den indar elektrikoak pisuaren eta bultzadaren ekintzak oreka ditzake, eta orduan tanta geldirik geratuko da:

$$q \cdot E = \text{pisua-bultzada} = \frac{4}{3} \pi a^3 g (\rho - \rho')$$

Hemen: q, tantaren karga; E, eremuaren intentsitatea; g, grabitatearen azelerazioa; a, tantaren erradioa; ρ , bere dentsitatea, eta ρ' , airearen dentsitatea izanik.

Beraz, formula horren bidez q atera daiteke.

Tanten erradioak oso txikiak dira, 10^{-5} cm-takoa gutxi gora-behera eta beraz ez dira zuzenean neurgarriak. Neurketa hori egiteko Millikan-ek bide

oso egoki bat asmatu zuen: eremu elektrikoa kendu ondoren tantak oso astiro erortzen dira, eta beraz beren abiadura neur daiteke. Ingurune biskoso batetan erortzen den gorputz baten abiadura muga bateraino handituz doa. Muga horretara iristean behera aldera dagoen indarra (hots, pisua ken bultzada) eta biskositateak egiten duena berdina dira; gertaera hau Stokes-en legeak ematen digu. Beraz,

$$\frac{4}{3} \pi a^3 g (\rho - \rho') = 6 \pi \eta a v$$

Hemen: η , ingurunearen biskositatea, eta v , muga-abiadura.

Erlazio horretatik a atera eta lehen ikusi dugun ekuaziora eramanez q aurki daiteke.

1909 eta 1913. urteen artean Millikan-ek eta bere laguntzaileak saiakuntza asko egin zuten. Milaka tanta batzuren kargak neurtu zituzten eta gauza harrigarri bat aurkitu zuten: tantek hartzen zuten karga, beti ere kargakopuru berdina baten multiploa zela (hots, e , $2e$, $3e$, ... e.a. baina inola ere ez $0,75e$ edo $0,33e$ -takoa). Beraz, karga elektrikoa ez da nahi adina zati daitekeen gauza bat, baizik eta muga bat du. Hau da, Naturan karga-unitate huts bat badago, e elektroien karga hain zuten. Elektroien karga aurkitu ondoren N_A Avogadro-ren zenbakia kalkulatu zuen, eta zera aurkitu zuen: $N_A = (6,002 \pm 0,006) \times 10^{23}$.

Millikan-en lanak 1931. urterarte N_A aurkitzeko bide zuzenena bezala iraun zuen. Urte honetan J. A. Bearden-ek (*) x izpien bidez kaltitzako kristalaren atomoen arteko distantziak neurtu zituen. Hori zela bide, Beardenek N_A aurkitzeko beste bide bat eskaini zuen: hau da, bolumen ezagun bati dagoen atomo-kopurua kalkulatu eta hortik Avogadro-ren zenbakia atera. Zientzilaria honek N_A -rentzat $(6,019 \pm 0,003) 10^{23}$ balioa aurkitu zuen. Balio hau eta Millikan-ek aurkitutakoa aski desberdinak dira. Hori dela eta, Beardenek kristalaren ez-homogenotasun bat edo beste izan zitekeela pentsatu zuen. Baina, garai berean, Millikan-ek airearen dentsitatezt hartutako balioa txiki-egia zela ikusi izan zen. Millikan-en lanetan airearen benetako dentsitatea erabiliz N_A -rentzat aurkitzen den balioa eta Beardenen metodoaren bidez azaltzen dena berdina dira; hau da,

$$N_A = (6,022169 \pm 0,000040) \times 10^{23}$$

Eta beraz, gaur egun elektroien kargaren balio onena hau da:

$$e = (1,6021917 \pm 0,0000070) \times 10^{-19} \text{ c}$$

L. M. BANDRES

(*) J. A. Bearden, Phys. Rev. 37, 1210 (1931).