

Erlatibitate Berezia: Einsteinen galdera eta erantzuna 1905eko fisikari*

ALAIN ULAZIA

ILCLI

Euskal Herriko Unibertsitatea

(The Special Theory of Relativity: Einstein's question and response to 1905 physics)

Abstract

1905 was a miraculous year for Physics. This paper intends to take a look at what happened then. Its aim is to briefly present the gestation period of Special Relativity starting with a few strokes about the technological features of that time and giving also some details about Einstein's thought mechanisms. Mainly, the paper will take into account the philosophical, theoretical and experimental antecedents of physics which had an influence on Einstein: Mach's philosophy, Lorentz's and Poincaré's works, Maxwell's electromagnetism, Faraday's electrical dynamo and Planck's cavity radiation. After analyzing those constituents I will suggest how the embryo of the theory was formed in Einstein's mind, and I will describe the most important moments that threw light upon that, emphasizing the fact that he didn't lose his extraordinary sureness in his intuition, in spite of the amazing implications of relativity theory. Finally, I will indicate that Einstein only needed usual low-velocity experimental data, in conjunction with the data coming from the thought-experiment. In fact, this paper is an effort to make clear the beauty of the trip towards Special Relativity, grounded on the history of physics of that time and the autobiography of Einstein's intuitions.

Keywords: *Special relativity, time, thought-experiment, electromagnetism, electrical dynamo, cavity radiation, light quanta.*

* Eskerrak eman nahi dizkiet lana arretaz irakurri, argibideak eman eta zuzenketak egin dituzten bi txostengileei. Baita Enetz Ezenarrori ere, eman dizkidan aholku zuhurrengatik.

«Erlatibitate Bereziaren Teoria nigan erretzen hasi zenean, era guztietako urduritasunek erasotzen zidaten. Aste haietan anabasa egoera batean egon nintzen.»

Albert Einstein

Justu mende bat pasa da fisikaren urte miragarri deritzon hartatik eta harixe begira dator lan hau. Beronen helburua garaiko teknologia berriak erakitzen ari ziren munduaren eta Einsteinen irudizko pentsamendu bereziaren zertzeladetatik abiatuta, Erlatibitate Bereziaren ernalketaren historia motzean ematea da, batez ere Einsteinengan eragina izan zuten fisikaren baitako aurrekari filosofiko, teoriko eta esperimentaletan pausatuz: Machen filosofia, Lorentz eta Poincaréren lanak, Maxwelleren elektromagnetismoa, Faradayren dinamo elektrikoa eta Plancken erradiazioa. Osagaiak aztertu ostean teoriaren enbrioia Einsteinen gogoan nola hezurmamitu zen iradokiko dugu: argi egin zioten uneak deskribatu, teoria berriak zekartzan inplikazio harrigarrien aurrean kikildu gabe bereari nola eutsi zion agerrarazi eta azken buruan, ohiko abiadura txikiko datu esperimentalak eta bere irudizko gogo-esperimentuak nahikoa izan zitzaizkiola konturazteko ondorioa burutu. Finean, Erlatibitate Bereziarako bidaiaren izaera miragarria agerian uzteko ahalegin bat da lan hau, garaiko fisikaren historian eta Einsteinen intuizioen autobiografian oinarriturik.

1. ATARIKOA. Zertzelada batzuk garaiko teknologiari eta Einsteinen irudizko pentsamendu bereizgarriari buruz

Einsteinek garai berri bat eraiki duela esan ohi da heldulekurik gabeko mundu bat sortu balu bezala; alabaina hemen, ohiko bizitza fisikoko leku eta denboretatik at sortutako teoria dirudien hori bere biluzian aztertzea baino gehiago interesatuko zaigu beste gauza bat. Duela mende bateko garai hark eraiki zituen Einstein eta bere burutapenak hein batean eta jeinuaren gogamenak beste neurri batean. Idatzi honetan erlatibitatearen teoria moduan ezagutzera eman zenari irekiko zaion arren tarte nagusia, ezin ahaztu Einsteinek beste esparruetan, fisika kuantikoan eta estatistikoan, izandako eragin nabarmena. Teoria abstraktu bat izatetik urrun, erlatibitatearen teoria fisika eta filosofiaren uztarketatik jaio zen aitzin-baldintza batzuekin. Lehenbizi garaiko beharrian praktikoei erantzunez, bigarrenik Einsteinen gogamen berezi eta ahaltsuak iragazirik. Lehenbizikoari dagokionez, erlojuak eta trenak, telegrafoak eta konkista kolonialak zeuden: hemeretzigarren mendeko aldatetek denborari esanahi berri bat eman zion garapen teorikoarentzat ezinbestekoa zen hondoa gausatua zuten jada.

Peter Galison (2003) zientziaren historialariak kontatzen digun lez, Bernako Patenteen Bulegoan lanean ari zelarik Albert Einstein gazteak parean

izan zituen Europako trenbide sarerako aurkezten ziren ideia berritzaileak. Artean baziren makina urte, kontinenteak hiriz hiri aldatzen ziren ehunka ordu lokal zituela berauek sinkronizatzeko modu barik. Denbora elektrikoki sakabanatzea ezinbestekoa zen trenen joan-etorria zuzendu ahal izateko. Erlojuak sinkronizatzeko dozenaka patente iritsi ziren Einstein lanean ari zen bulegora. Hainbeste eragin zion Henry Poincaré bera ere, Frantziako Longitudearen Bulegoko presidente zen orduan; inperioaren eskualde apartatueta-ko mapak ateratzea zuten helburu eta denboraren teknologiarekin lehian ziren hauek ere. Erlojuak sinkronizatu eta Paristik milaka kilometrotara aurkitzen ziren puntuetara seinale telegrafikoak bidaliz kalkulaten zituzten kokaguneon longitudeak, eta horrela euren kartografoentzako koordinatuak lortzen.

Denboraren kontzepzioa bilakarazten zuten garaiak garai, nola pentsatzen zuen baina Einsteinek? Ba al zen honengan bere aurkikuntzak ezaugarrituko zituen pentsamolderik, haurtzarotik nabarmen?

Aldatzen ari zen mundu baten jarraibide nagusien sarean leku eta une egokian tokatu zen gizon hau. Txikitatik geometriako jokoetako soluzioen edertasun matematikoak erakarririk, edertasun hau ezinbesteko baldintza jarri zien naturaren legeen ulermenari. Einsteinek bere autobiografia aipuetan (1949), lauzpabost urte zituela konpas magnetiko bat ikusi zuenean izandako txundiduraren berri ematen du, eta hau eta gero honela jarraitzen:

12 urte nituelarik bigarren aldiz gelditu nintzen txundituta beste modu hagitz diferente batez: Euklidear geometria lauari buruzko ikasturte hasierako liburuxka bat izan zen. Hemen agertzen ziren egiaztapenak, puntu batean elkartzten diren triangeluaren altueren kasuan adibidez (pentsatzen jarri gero argi ikusten ez diren gauzak), duda izpirik gabeko ziurtasunez frogaz zitezkeen. Argitasun eta ziurtasun honek sentipen deskriba ezin bat eragin zidan.

Honek nahiko normala dirudi gaztetan zientzian barneratu den edozeinentzat. Baina ondorengo hitzetan zerbait berezia antzeman daiteke Banesh Hoffmanen (1982) arabera, anomalia bat:

Axiomak frogatu gabe onartu behar izatea ez zitzaidan asaldagarria. Edozein kasutan, niretzat nahikoa zen frogapenak zalantzarriak ez ziruditen proposizioen gain finkatzea. Esaterako, gogoan dut nire osabak Pitagorasen teorema aitatu zidala geometriako liburuxka hura nire eskura iritsi aurretik. Saiakera asko eta gero teorema hau frogatu ahal izan nuen triangeluen arteko antzekotasuna erabiliz. Hau egiterakoan, niretzako argi zirudien triangelu zuzen baten aldean arteko arrazoiak angelu zorrotzek guztiz determinatu behar zituztela. Finean, nire arabera argi ez zegoen gauza bat baino ez zen frogaz baten beharrean aurkituko. (9-11 or.)

Baina nolatan da bigarren pasarte honetan, hain gazterik Pitagorasen teoremaren frogaz deigarri bat lortuta, dena arrazonamendu geometrikoaren

boterepekoa? Ez al zen bada batere txunditu? Geroago, aipatu liburuxka eskuetaraten zaionean harrituko du geometriako frogapenen edertasunak.

Istorioak arraroa dirudi. Pixka bat sakonduz gero, jartzen dituen bi adibi-deak (Pitagorasen teorema eta triangeluko altueren bategitea puntua) konparatuz zera da adierazgarriena: lehenbizikoa frogatzean arrazoiketa aljebraikoetan disolbatzen dela azken emaitzaren irudizko atzematea, eta triangeluen altueren kasuan berriz, irudiz deigarriagoa gertatzen dela puntu bakarrean bategitea lerrook.

Anomalia honek balio diezaguke bere *irudizko pentsamendu* horien izaeraz ohartzeko. Gogamen biza berri oso bat ireki ahal izango zion geometriak, bere aurkikuntzak ezaugarrituko zituzten irudizko gogo jardunetarantz. Edozeinentzat argiak diruditen axiometatik abiatuz, arrazoiketa simple eta garden baten bitartez, elkarloturiko teorema aldagaitzen zerrenda bat lor liteke, teorema deigarriak edertasunagatik eta askotan ustekabeak aurreiritziengatik. Hauen esanahiaren ekonomiak, teorema errefusatuz ezinen sor-kuntza magikoak, txundituko zuen Einstein. Geometriako liburuxka hark bere osotasunean, Pitagorasen teorema bakandu hura transzendituko zuen Einsteinen gogo goiztiarrean.

Irudien bidez pentsatzeko dohain horren argigarri suerta liteke, baita hizkuntza eta pentsamenduaren artean Einsteingan gauzatzen den harreman bitxia ere. Umetan, bere senitartekoak arras kezkatuak ziren gutxi eta gaizki hitz egiten zuelako. Bere esanetan, eskolan izenak eta esaldiak memorizatze-ko arazo larriak zituen eta hala, fisika eta matematika klaseetan soilik aurkitzen zen eroso. Jada gerora, hizkuntza arrotzak ikasteko ere arazoak izan omen zituen. Albertek barre egiten ei zuen jendeak hitzen bitartez pentsatzen zuela, pentsatzeko hitzen bitartekaritza ezinbestekoa zela, entzundakoa. Bere ustez, eta bere gogoetarako mekanismoan bai behintzat, lehenbizi ideia zen gogamenean leku hartzen zuena eta iturri honetatik zerion hitzak ondorenean. Hitzak, ez modu idatzian ezta ahoskatuan ere, ez zuen inongo lekuri betetzen bere gogo mekanismoan. Jacques Hadamard matematikariak (1975), matematikan nola pentsatzen den ikertzen ari zelarik, hartu-eman aberasgarria izan zuen Einsteinekin hizkuntza/pentsamendua elkarre-kintzaz:

Zeinuak pentsamenduaren oinarri beharrezkoak dira. Pentsamendu sozializatuarentzat (komunikazio egoera) eta sozializatu izaten ari den pentsamenduarentzat (formulazio egoera), zeinu sistema erabilienean hizkuntza deituriko horixe da, baina barne pentsamenduak, bereziki sortzailea denean, malguagoa, gutxiago estandarizatu den zeinu sistema bat erabiltzen du sarri pentsamendu sortzaileari askatasun eta dinamismo gehiago emanez (96. or.).

Kosmosa eta espazio-denbora hobeki ezagutzeko erabilitako zeinu sistema matematika eta filosofiaren hizkuntzatik bereganatu zituen, eta irudizko

pentsemenez eraiki arkitektura kognitibo ahaltuak. Goazen bada 1905. urtean bere pentsatzeko modu berezi honek asmatu zuena ikustera.

2. Espazio eta denboraren izaera eraitsirik artikulu bakarrean: «Higitzen ari diren gorputzen elektrodinamikaz»¹

a. Artikulua eta bere aitzin osagaiak

Irudikatu artikulu bat, formaz eta edukiz ez ortodoxoa, fisikako aldizkari ospetsu bateko editorialera iritsia. Izenburuak zerikusi gutxi du eduki gehienarekin; ez du ohiko literaturako aipurik; lehenbiziko erdiaren zati nagusiak oinarritzko kontzeptu fisiko zenbaiten azterketa filosofiko bat dirudi; eztabaidaturiko zehaztasun espermental bakarra fisika ohikoenarekin azal daiteke eta ez da ageri berebiziko garrantzia baleuka lez. Egilearen printzipio orokor batzuk jota laga zaituzte eta printzipiook sinplifikazio gehigarriak aginduko dituztela sumatzen duzu. Baliteke horrelakoxeak izatea *Annalen der Physik* aldizkarian txostengile ari zen Max Plancken burutazioak editorearen bulegotik Albert Einsteinen 1905eko *Higitzen ari diren gorputzen elektrodinamikaz* artikulua jaso zuenean.²

Aukeraturiko izenburu motak, garai hartan eta normalean, gorputz higikorren ezaugarriei buruzko eztabaida ekarri izango zuen, bai magnetikoei eta baita dielektrikoei buruzkoa ere. Einsteinek ez zuen topiko hauetariko bat bera ere analizatu. Izan ere, artikuluaren lehenengo laurdenak denbora eta espazioaren esanahien analisi filosofiko bat zekarren. Artikuluaren bigarren erdiak bat-batean alboratzen zituen oinarritzko garrantzia zuten zenbait arazo (ispilu higikor batek islatutako erradiazioaren ezaugarriei buruzkoa adibidez), eta elektroiaren dinamikari buruzko emaitza batzuekin amaitzen zuen. Zehazki azaldutako esperimendu bakarra artikuluaren hasieran aurkitzen zen eta indukzio elektromagnetikoari zegokion, hau da, magneto batekiko higidura erlatibo bati darraion edozein zirkuitu itxitan sortzen den korronteari.

Indukzio elektromagnetikoaren fenomenoak teknologiaren aroan sartu zuen mendebaldeko mundua, berau oinarritzkoa baita dinamo elektrikoetarako. Edozeinek ezagutzen zuen dinamoaren lana, baina arazoak zeuden funtzionatzeko modua arakatzean. 1905ean Einsteinek dinamo elektriko erraldoiei, erradiazioari, mugimendu elektrikoaren inguruneari, elektroi

¹ «Elektrodynamik bewegter Körper» artikulu famatuaren izenburuaren itzulpena, alegia. Esker ona adierazi nahi diot Jose Ramon Etxebarriari erlatibitate eta fisika euskaldunoi ekartzeko egindako lanagatik. Bere liburuko itzulpen batzuk, aipaturiko haxe tartean, baliatu ditut artikulu honetan. Ikus Etxebarria (1990).

² Einstein (1905)-eko erreferentziak ingeleseko itzulpenetik eginak dira (ikus Einstein(1923)).

dinamikari eta espazio eta denboraren izaerari buruzko arazoak uztartu zituen. Hasteko eta Einsteinen aparteko ekarpenaz konturatzeko, 1905az aurretiko zientzialari eta filosofoez zituen ezagutzak kontuan hartu eta berrikusiko ditugu.

Science of Mechanics (1883) lanean Ernst Mach filosofo-zientzialariak, kritikoki eraitsi egingo du espazio eta denbora absolutuaren nozio newtondarrak. Newtonen arabera, espazioa absolutua da, azken buruan, edozein fenomenoren gertaleku, eta denbora absolutuak erlojuen mugimenduarekiko independentziaz darraio bere bideari. Machi noziook 'iluntasun metafisikoak' iruditzen zitzaizkion gure zentzumenen ahalmenetik at geratzen zirelako. Ondorioz, Mach ez zegoen ados Immanuel Kantekin, 1781ean Newtonen denbora eta espazio absolutuaren nozioak a priorikoak diren ezagutzetaraino, beste edozertaz dugun jakituriaraino, goratu zituenarekin. Kanten ustez, intuiziook oinarri antolatzaile bezala balio zuten, gure gogora zentzumenek dakarkiguten informazio anabasan ezagutza gorpuzten laguntzeko. Horrela bada, derrigorrean ari gara barneratzen euklidear geometriadun espazio 3-dimentsional batean eta kausalitatearen legean, eta gero goragoko ordenako Newtonen fisika bezalako printzipio antolatzaileetan. 1827an geometria euklidearren aurkikuntzek ikuspegi kantiarrari kolpe serioa eman zioten arren, a priorikoak ziren printzipio antolatzaileen eginkizunari Kantek berak emandako garrantzia sekula ez zen kontuan hartu naturako lege zehatzak nola ote ziren posible ulertzeko. A prioriko printzipio antolatzaileek nagusitza zuten Hermann von Helmholtz, Heinrich Hertz, eta Henri Poincaré bezalako filosofo-zientzialarien ildo neo-kantiarrean. Hauen idatziek Machen 'eszeptizismo zuritu ezin' adina hunkitu zuten Einstein (1949, 21. or.).

Mach eta Poincarék denbora eta zentzumenen pertzepzioen arteko harremana frogatu zuten arren, beraien lanetan denborak absolutua izaten jarraitzen zuen, ez baitzen arrazoirik hau higiduraren menpeko izateko. Baina Mach eta Poincaré Newtonen espazio absolutuarekiko mugimendua izar urrunekikoarekin ordezkatzeko tematu ziren, edo hobeto esanda, elektrodinamikan aritzen ustetan Newtonen kosmosa betetzen zuen substantziarekikoarekin, eterrarekiko mugimenduarekin alegia. Honexek garamatza elektromagnetismorantz orokorki, eta dinamo elektrikorantz eta erradiazio fenomenorantz konkretuki.

i. *Teoria elektromagnetikoa*

Newtonen 1687ko mekanikak fenomeno lurter eta estralurtarrak bateratu zituen. Hurrengo sintesi handia orain dela 140 bat urte gertatu zen, James Clerk Maxwellek elektromagnetismoa eta optika bateratu zituenean. Mekanika newtondarrean perturbazioak espazio hutsean instantean hedatzen ziren bitartean, Maxwellen teorian azkar izan arren, abiada finituan iragaten ziren

eterrean zehar, uhinak putzuan lez. 1892an Maxwellen teoriaren gaineko lanketa eta birfinketaren emaitzak etorri ziren pare bat hamarkadako iharduna eta gero: hor kokatzen da Hendrik Lorentzen teoria elektromagnetikoa.

Eremu elektromagnetikoen iturriak artean aurkitu gabeko elektroiak bezalakoak zirela aurreiritzi zion, guztiz iragazkor eta mugigaitz zetzan eterrean higitzen zirenak. Lorentzen (1892, 363 or.) teoriaren funtsezko bost ekuazioak honakook ziren:

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \times \vec{B} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \rho \vec{v} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= 4\pi\rho \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{F} &= \rho \vec{E} + \rho \frac{\vec{v}}{c} \times \vec{B}\end{aligned}$$

Lehenbiziko laurak Maxwell-Lorentz ekuazioak dira, eta azkena Lorentzen indarraren ekuazioa bezala da ezaguna; \vec{E} eta \vec{B} eremu elektriko eta magnetikoa dira, hurrenez hurren, eta ρ elektroien kargaren bolumen dentsitatea. Lorentzen ekuazioak eterrarekiko geldi dagoen erreferentzia sistema batekiko idazten baditugu, S dei dezakeguna, orduan c , S sisteman neurtutako argiaren abiadura izango da, eta v elektroien S -rekiko abiadura. Maxwell-Lorentz ekuazioek argiaren uhin teoria batentzat espero dugun ezaugarria dute, hau da, S -rekiko argiaren abiadura iturriaren higidurarekiko independentea dela eta abiadura hori c dela beti ere. Baina honek ez du zertan argiaren abiadura eterrarekiko abiadura uniformeaz higitzen den erreferentzia sistemarekiko neurtzearen ondorio izan, hau da, erreferentzia sistema inertzial batekiko neurtzearen ondorio. Honegatik, eterreko erreferentzia sistemek lehentasuna lukete. Ziur izateko modua dago: esperimentuek ez zuten erakutsi lurraren eterrean zeharreko higidurak fenomeno optiko eta elektromagnetikoengan inongo eraginik zuenik.

Argiaren abiadurari dagokionez, mekanika newtondarrak zera auresaten du, iturri mugikor batek igorritako argiaren abiadurak geldirik dagoen iturri batenarekin konparatuz gero, mugitzen den iturriaren abiadura behar lukeela gehigarri:

$$\vec{c}' = \vec{v} + \vec{c}$$

Bestalde, argiaren uhin teoriaren arabera, c' eterrean pausagunean den behatzaileak neurtutakoa zera izan behar da:

$$\vec{c}' = \vec{c}$$

Eta Lorentzen ekuazioek eskakizun hau betetzen zuten. Alabaina eterrak neurtze aparatuengan lukeen eraginagatik lehenengo ekuazioa espero zuten, non c' lurrarekiko argiaren abiadura eta v eterraren lurrarekiko abiadura izango ziren. Halere, v/c arrazoia bigarren ordenaraino doitzen zuten esperimenduek azken ekuaziora zeramatzen garaiko fisikariak. Doitasun ordena honetan fenomeno optiko eta elektromagnetikoak lurra eterrean geldirik balego bezala jazotzen dira. Ordena honetan beraz, mekanika newtondarra eta elektromagnetismoa bateraezinak dira erreferentzia sistema inertzialetan kausitzen ditugun fenomenoekin.

1895eko monografiko batean lurra higidurak fenomeno optiko eta elektromagnetikoengan duen eragina neurtzeko egindako lehen ordenako esperimenduek balio gabeziari egokiro erantzun zion Lorentzek; esperimenduok eterrean zeharreko higidura aztertzen zuten. Materiarik gabeko eterraren eskualdeak, edota materia ez magnetiko eta ez dielektrikodun, materia neutrodun eskualdeak kontuan harturik alegia, Lorentzen ekuazioak eterrarekiko geldi zegoen erreferentzia sistema batean behean zerrendaturikoak ziren (S). Denbora eta espazioaren transformazio berriak aplikatuz gero, Lorentzek aipatutako ekuazioen analogoak lortu zituen S_r erreferentzia sistema inertzialean.

Lorentzen lorpena begirada batean mirets dezakegu, v/c kantitatearen lehen ordenako doitasunez Maxwell-Lorentz ekuazioek forma bera dutelako S_r sistema inertzialean eta eterrean geldi dagoen S sisteman, eta ondorioz lege fisiko berberak dagozkie bi sistemei; beste era batera esanda, doitasun ordena honetan ez esperimendu optikoek ezta elektromagnetikoek ere, ezin dezakete frogatu S_r sistemaren higidura. Emaitza desiragarri hau *egoera baliokideen teorema* bezala bataiatu zuen Lorentzek. Teorema «denbora koordenatu lokala» (t_l) zeritzon hipotesi matematikoan oinarritzen zen. Artean benetako denbora Newtonen denbora absolutua zen. Beraz, v/c ordenarako, S_r -ko argiaren abiadura S -koaren berdina zen, hau da, $c'=c$. Doitasun ordena honetan beraz, Lorentzen egoera baliokideen teorema Newtonen auresandakoaren eta teoria elektromagnetikoaren arteko bateraezintasuna gainditu zuen, teoria elektromagnetikoaren faboretan.

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \times \vec{B} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \rho \vec{v} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= 4\pi\rho \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0\end{aligned}$$

S , eterrarekiko geldi dagoen sisteman
Lorentz-Maxwellen ekuazioak

Honako transformazioak proposatu zituen Lorentzek koordinatu bakoi-tzeko. Aurreko lau ekuazio fundamentalekin proba eginez gero S_r sistemara pasatzean ekuazioak analogoak direla ohartzen gara denbora lokalaren uztar-pean:

$$\begin{aligned}
 x_r &= \gamma(x - vt) & \vec{\nabla}_r \times \vec{E}_r &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}_r}{\partial t_L} \\
 y_r &= y & \vec{\nabla}_r \times \vec{B}_r &= \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}_r}{\partial t_L} \\
 z_r &= z & \vec{\nabla}_r \cdot \vec{E}_r &= 0 \\
 t_L &= \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right) & \vec{\nabla}_r \cdot \vec{B}_r &= 0
 \end{aligned}
 \Rightarrow$$

Ezkerrean Lorentzen transformazio berriak. Eskuinean S -koetatik abiatuz kalkula daitezkeen aipatutako ekuazio elektromagnetiko analogoak S_r siste-ma inertzialerako; eta $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$.

Baina Lorentzek artean ez zuen esplikatu v/c arrazoa bigarren ordenarai-no doitzen zuen 1887ko Michelson eta Morleyren esperimntua. Bertan argi-izpiek denbora berdinean iragaten zituzten lurrarekiko geldi zeuden luzera berdineko bi arraila ortogonal. 1895eko saiakerako azken kapituluan eztabai-datu zuen hau Lorentzek beste bi esperimnturekin batera, bere ustez «beste-rik gabe azal ezin zitezkeenak». ³ Michelson-Morleyren esperimntua esplika-tzarren Lorentz lokatz artean sartu zen. Egoera baliokideen teoremak ekidin zuen Newtonen abiaduren batuketaren legetik abiatuz zera proposatu zuen: lurraren higidura norabideari paralelo ziren arrailen luzera uzkurdu egin zela $\sqrt{(1 - v^2/c^2)}$ arrazoiaren arabera. Motzean esanda, Lorentzen espazioaren uz-kurdura hipotesia betelan hutsa zen. Lorentzen teoriaren orban hau Poinca-réren kritika filosofiko-zientifikoak nabarmendu zuen arren, frantziarra ha-rrituta zegoen Lorentzen egoera baliokideen teoremarekin higidura absolutua baztertzen baitzuen.

Newtonen fisika hain argigarria izan zen ezen zientzialari asko teoria fisi-ko oro honexen baitan mugatzen saiatu baitzen munduaren ikuspegi meka-nikoa jarraituz. Adibidez, eredu mekaniko ikaragarri konplexuak erabili zi-tuzten eterraren ondoz-ondoko ekintzak simulatzeko. Baina saiakerok Lorentzen teoria agertu ondoren alde batera utzi zituzten. Izan ere, Wilhelm Wienek (1900) «mekanikarako fundamentu elektromagnetikoak» suposatu zituen, hau da, Lorentzen ekuazioetan oinarrituriko munduaren ikuspegi elektromagnetiko bat. Programa honen inplikazioak irispen handikoak ziren elektroaren kasuan, bere masak bere eremu elektriko propioan baitzuen ja-

³ Lorentzen jatorrizko uzkurdu hipotesiaren proposamena 1892koa da. Ikus Lorentz (1892, 74. or.)

torria eta ondorioz abiaduraren menpeko izan behar baitzen. Ereku elektriko eta magnetiko paraleloen baitan perpendikularki txertatuak izan ziren elektroik azkarren portaera aztertuz Walter Kaufmannek (1901) elektroien masa eta abiaduraren arteko menpekotasunaren berri ematen zuten datuak eskuratu zituen: bata infinituraino hazten zen bestea argiaren abiadurara hurbiltzen zen heinean. Kaufmannen kide batek, Max Abrahamek, partikula elemental baten lehenbiziko deskripzio teorikoa garatu zuen eremuen bidez. Bere esfera zurrunaren ereduko elektroiak higidura norabidearekiko indar zeharkako edo paralelo bat jasaten zuen arabera, eta elektroien azelerazioarentzat murrizketa gogorak kontsideratuz, Abrahamek (1902) zeharkako eta luzetarako masa aurrekusi zituen honentzat.

Abrahamen teoriako zeharkako masa Kaufmannen datuekin bat zetorren, eta munduaren ikuspegi elektromagnetikoaren helburuak lortzear ziru-dien. Halere, Abrahamen teoriak ez zuen esplikaziorik eskaintzen Michelson-Morley esperimentuarentzat, eta 1904 inguruan v/c -ren bigarren ordenako doitasunez zertutako Lord Rayleighen (1902) eta B. B. Bracen (1904) esperimentuekin desadostasun nabariak agertu zituen teoria honek.

Bigarren ordenako datu berriek, Kaufmannen neurketek eta Poincaréren kritikek eraginda Lorentzek (1904) bere elektroien teoria propioa proposatu zuen, uzkurdua hipotesiak betelan izateari utzi eta esperimentu bat baino gehiago azaltzeko gaitasuna lortzen zuelarik. Lorentzen elektroia karga banaketa uniformeaz inguratutako globoa bezala irudika zitekeen. Pausagunean, Lorentzen elektroia esfera bat zen, baina higitzen ari zela, Lorentzen uzkurdua espaziala zela eta, bere masa bi osagaiko kantitate bilakatuko zen:

$$m_T = \frac{4}{3} \frac{m_0^e}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$m_L = \frac{4}{3} \frac{m_0^e}{(1-\beta^2)}$$

Lorentzen zeharkako masa bat zetorren Kaufmannen datuekin, baita Abrahamenekin ere. Baina Abrahamek berehala gauzatu zuen kritika zorrotz bat Lorentzen teoriaren kontra. Lorentzen elektroia deformatu ezezagokorra zen bere zatien arteko indar aldentezailer handiengatik leher baitzitekeen. Berriki topatutako Lorentz eta Poincaréren arteko idatzizko harremanengatik, badakigu frantziarrak bere kabuz arazo hau berrantolatu zuela bere munizio matematiko boteretsuenarekin erasotzeko. Bide honetatik Poincarék (1904) ateratako artikuluak azken ahalegin bat dira Lorentzen teoria elektromagnetikoa oinarri duen munduaren ikuskera elektromagnetikorantz. Artikuluok espazio 4-dimentsionalak eta talde-teoria bezalako nozio matematiko aurreratuak ageri zituzten. Geometriako ikasketetan ohikoa den termino bat era-

biliz Poincarék Lorentzen 1904ko egoera baliokideen teorema berrizendatu zuen (eta sekulako bistaz gainera) *erlatibitatearen printzipioa* bezala. Einsteinek ez omen zuen ikusita Poincarék sortutako Lorentzen elektroien teoriaren bertsioa erlatibitateari buruzko artikulua idatzi zuenean.

Laburbilduz, 1905ean fisikariek teoria elektromagnetikoa bide onean zihoala uste zuten. Gehienak ziur zeuden, pixka bat gehiago arakaturaz gero Lorentzen elektroien teoria, naturaren eremu teoria bateratu baten funtsa izango zelakoan zeuden. Lorentzena teoria dinamiko bat zen, datu anitz azaltzeko kapaz: espero zitekeen luzeraren uzkuradura, jada behatua zen elektroien masaren abiaduragatiko aldaketa, eta argiaren neurtutako abiadura beti berdina izatea –guztiak elektroiak eterrarekin lukeen elkarrekintzaren emaitza moduan azalduak. Egoerak esanguratsua zirudien aurrera begira, garai berri bat erdituko zuen lur emankorra zen Lorentzek jorratutakoa. Baina ez zen hau izan gertatutakoa. Ondoren zientzia eta injinerutzako esparru batean kokatuko gara bertako arazoak garrantzitsuak izan baitziren oinarritzko fisikaren garapenerako: hortxe zegoen indukzio elektromagnetikoa. Aleman hizkuntzadun lurraldeetan esparru honetako arazoen baitan teknologia eta oinarritzko ikerketa uztartu zituzten. Arazook trataera bereziki interesgarria jaso zuten Merz (1954, 215. or.) historialariak idatzia utzi zuen bezala: «zientzialari alemaniarra filosofo bat zen».

ii. *Dinamo elektrikoa*

1831an Michael Faradayk magneto baten eta kiribildutako eroale baten (bobina baten) arteko higadura erlatiboak eroalean zehar korronea sortzen zuela aurkitu zuen. Faradayk zera interpretatu zuen: magnetoaren ipar polotik atera eta hego poloan sartzen diren indar lerroek kiribildutako harilarengan eragiten dute; honela, higadura erlatiboak indar lerroen eta kiribilaren planoaren arteko ebakidura dakar. Faradayren legeak indar lerroen ebakidura eritmoak indutitutako korronearen potentziala determinatzen duela dio, indutitutako korronearen norabide eta magnitudea soilik bobinaren eta magnetoaren arteko abiaduraren menpeko izanik.

Baina Faradayren indukzio magnetikoaren interpretazioa aldatu egingo da magnetoa eta bobina bata bestearekiko biraka ari direnean. Mota honetako aparatua garrantzitsua izan zen Faradayrentzat 1851ean, sinetsita baitzegoen indar lerroek magnetoaren higadura linealean soilik parte hartzen zutela eta ez biraketan. Kiribildutako harilak magnetoaren periferia birakariarekin laxatuta lotzen dira magnetoaren poloetako bat ukituz; mota honetako dinamo elektromagnetikoa unipolarra deitzen da. Indukzio unipolarren interpretazioa zera da Faradayrentzat: bobina hariak erlojuen zentzuan biratzen badu, korronea agertzen da indar lerroak ebakitzeagatik. Kiribilek geldidiraute, eta magnetoak erlojuen zentzuan biratzen badu, magnitude eta no-

rabide bereko korronea agertuko da zirkuituan. Uste zuenez, magnetoan korronea indar lerro propioen zeharkako biraketa medio sortzen zen. Magnetoak eta bobinak elkarrekin zentzu berean biratzen dutenean ez dago korronterik osotara, bobinako korronteari magnetoaren barne korronea kontrajartzen baitzaio. Horrela bada, bi esplikazio desberdin behar dira bobinak induzitutako korrontearentzako, bobinak ala magnetoak biratzen duen arabera. Argi eta garbi, datu esperimentalak errazago ulertu izan zituzten bobinaren eta magnetoaren arteko higidura erlatiboa kontuan hartuta, azken honen batera zihoazen indar lerroak ahaztu gabe.

Alemana hitz egiten zuten herrialdeetan eremu magnetikoak indar lerroen bidez irudikatzea oso zabaldua zegoen. Zientzialari britainiarrek garrantzia pedagogikoa soilik aitortzen zioten bitartean, alemaniarren ikuspegi filosofiko kantiarrean indar lerroek *Anschauung* maila zeukaten.⁴ Testuinguru honetan *Anschauung* delakoak pertzepzioen munduko prozesu fisikoen aurrekustek gogoaren begian marraturiko errepresentazioak adieraziko lituzke, intuizio moduan; begiekin soilik ikustea baino goragokoa da kontzeptu hau. Motzean esanda, indar lerroak munduko toki guztietan present ziren. Injineru eta zientzialari komunitate alemaniarretan eztabaidagai bilakatu zen Faradayren lerro-birakarien ikuspuntuaren *Anschauungen* hura, eta esperimentuak berau bereiztera bideratu ziren.

Alde teorikoari dagokionez, indukzio unipolarrean korronea nola agertzen ote zen galdera bitarteko, zenbait fisikarik Faradayren indukzio legearen balio unibertuala ezbaian ipini zuten. Faradayren legea zirkuitu itxietarako hartzen zen kontuan. Arazoa Faradayren legeak dinamo unipolarreko zirkuitu irekian korronea nola sortzen zen esplikatzeari zetzan magnetoaren azalera eta kiribilduriko harilaren labainketaren bitartez. Mugalde baldintzen problema konplexu bat zen hau eterraren eta harilkaturiko magnetoaren arteko trantsizio geruzan (labainketarenean) kantitate elektromagnetikoak nola aldatzen ziren suposatu behar baitzen. August Föppl (1894) eta Max Abrahamek mekanikaren eta elektromagnetismoaren legeen arteko harremana nabarmendu zuten indukzio elektromagnetikoaren azalpenean. Mekanikako legeak zirkuituaren eta magnetoaren mugimendua azaltzeko erabiliko dituzte, zirkuituko korronea honen eta magnetoaren arteko higidura erlatiboaren menpekota da soilik, eta emaitza hau bat dator mekanikako higidura erlatiboaren printzipioarekin. Printzipio honek, fenomeno fisikoak gorputz materialen arteko higidura erlatiboaren ondorioz gertatzen direla dio eta mekanikako legeak berdinak direla sistema inertzial orotan. Abrahamek garbi laga nahi izan zuen esperimenduek v/c -ren lehen ordenarako bakarrik sostengatzen zutela higidura erlatiboaren printzipioa Lorentzen teoriarentzat. Föpplek harilaren azaleraren nozio konplikatuez Faradayren legearenganako

⁴ Kontzeptu honen garrantziaz ohartzeko ikus Miller (1978, 1981).

erabateko konfiantza adierazi zuen bitartean, Abrahamek Herten teoria elektromagnetikoari hertsiki eutsiz indukzio unipolarraren edozein arazo baztertu zuen, higidura erlatiboaren printzipioa zehazki irauarazten zuelarik. Gero itzuli erdi baterako korronea kalkulatu zuen Faradayren legea bere interpretazio linealean erabiliz; alderantzizko kasua Faradayren legean v abiadura, $-v$ aurkakoaz ordezkaturaz lortu zuen.

Abrahamen ikuspuntuan, indar lerroak ez, induzituriko korronteak soilik ziren neurgarriak; hau da, teoria elektromagnetikoko ekuazioek zer behatuko zen zehazten zuten, eta indar lerroak kantitate laguntzaile batzuk baino ez ziren. 1904an Lorentzek bere teoria elektromagnetikoa higitzen ari ziren gorputz dielektriko eta magnetikoak deskribatzeko hedatu zuen, eta bere emaitzak gehiago gerturatu ziren behatutako datuetara Hertenak baino. Lorentzen hedapen honek hiru elektroi mota diferente postulatu zituen hasiera batean: kondukzio elektroiak korronte elektrikoaren arduradun; propietate dielektrikoak azaleratzen zituzten polarizazio elektroiak; eta materiaren propietate magnetikoak esplikatzen, magnetizazio elektroiak. Denbora koordenatu lokal bezala erabiliz, higitzen ari den magneto batek zirkuitu-korronte batean eragiten duen efektuak (higitzen ari den magnetoagatikoko eremu elektrikoa alegia) bere jatorria garatzen dituen propietate dielektrikoetan duela erakutsi zuen Lorentzek. Baina indukzio elektromagnetikoaren azalpen honek bi elektroi mota ezberdinen arteko nahaste konplexu bat eskatzen du, kondukzio eta magnetizazio elektroiak osatzen duten uestezko substantzia batean. Lorentzentzat berarentzat ere, azalpen nahasgarriegia zen hau.

Jadanik gainezkatuta zegoen super-egitura bati elektroi gehigarrien hipotesia erantsi arren, artean 1904aren bukaeran, Lorentz ez zen bere elektroia-aren egonkortasunaren arazoa argi uzteko gai. Horrela bada, Max Plancken 1900eko gorputz beroen erradiazioaren azalpenak ezarri zuen eta eskainiko digu Einsteinen 1905eko erlatibitatearen ikuskera berezi eta bakarra deskribatzeko azken osagaia.

iii. *Erradiazioa*

Gorputz opaku batera iristen den erradiazioaren zati bat honen azalera zeharkatu eta barnean harrapaturik geratzen da. Modu berean, berotzerakoan energia mota berbera sortzen bada, aipatu energia zatiki berak ihes egingen du gorputzetik. Gorputz beltza, erradiazio igorle perfektua litzatekeena, xurgatzaile ezin hobea izango da eta guztiz beltza lez agertuko zaigu. Beltzatsun hau izan, espektroaren uhin luzera guztietarako izango da. Ezagutzen ditugun materialetako bat bera ere ez da guztiz «beltza», baina anitz gertura gaitezke gorputz opaku baten barrunbeetan hutsune bat eginez (gune ia isolatu gisa) eta berau behatzeko zulo txiki bat ipiniz kanpotik. Gorputz beltz idealak litzateke hau kasik, gune isolatuaren (substantzia beroz bete daitekeena-

ren) temperatura banaketa homogenea ziurtatuz gero. Bada denbora kontu hauek aztertzen hasi zirela; XIX. mendearen bukaeraz geroztik, substantzia beroz betetako gune batek igorritako argiak zientzialariak txunditu zituen, bere ezaugarriak substantziaren osaketaren arabekoak ez baitziren.

Bere harridurarako, Planck zeraz ohartu zen: gune isolatutiko erradiazioa egokiro deskribatzen zuen formula enpirikoak energiaren kantitate diskretutan emandako trukaketa behar zuela erradiazioaren eta substantzia beroa osatzen zuten elektroien artean⁵. Izan ere, teoria elektromagnetikoaren arabera erradiazioari zegozkion prozesuek jarraituak beharko zuketena, eta behatutakoa kontrakoa zen. Gainera, jakineko energia trukaketa ez-jarraitu batzuk bakarrik baziren posible, orduan elektroiei osagarrien higidura egoera posibleak ere berdintsu murriztuta egongo ziren. Bide honetatik Plancken formulak mekanika eta elektromagnetismoa, biak bortxatzen zituen. 1904an egoera hau «funtsezko bigarren krisia» zela ohartarazi zuen Einsteinek bere ohar autobiografikoetan (1949, 37. or.), Lorentzen elektroien ezegonkortasunarekin batera. Adierazpen honetan bakar bakarrik geldituko zen.

b. Osagaien sintesia: teoriaren hezurramitza eta ikuskera

Gorputz beltzaren erradiazioaren Plancken teoriari buruzko Einsteinen iritziak konfirmazioa jaso zuen 1904an, Einstein berak atomoek gasetan duten portaera aztertu zuenean. Argiak, elektroien bolumenaren tamainako espazio eskualdeetan ezaugarri partikularrak agertzen dituela topatu zuen⁶. Beraz, ohiko teoria elektromagnetikoa ez zen nahikoa elektroien izaera eztabaidatzeko. Gainera, solutu partikulen ikerketak (higidura browndarra) bolumen mikroskopikoetarako termodinamika eta mekanika nahikoa ez zirela sinestarazi zion. *Annalen der Physik* famatuko 17. alean aurkeztu zituen lehen bi artikuluek argi-partikulen⁷ ondorioak aztertzen zituzten, argi-kuantuak (1905a) eta higidura browndarra (1905b), mundu ikuskera elektromagnetikoa eta mekanikoa gaindituz. 1905eko hirugarren artikuluan (erlatibitatearenean) Einsteinek argiaren ezaugarriak arakatuko ditu berriro.⁸

Helmholtz, Hertz eta Poincaré bezalako filosofo-zientzialariak estudiantzeak behatoki neo-kantiar batean fundamentuen analisiak duen botereaz konturatu zuen Einstein. Baina zer eta nola aztertu pentsatzen hasterako zalan-tzan zen. Materiaren konstituzioari zegozkion ildoetan oinarrituriko teoriak

⁵ Plancken lana aztertzeke ikus Klein (1962) eta Kuhn (1978).

⁶ Ikus Miller (1981, 2. eta 11. kap.)

⁷ *Partikula* maila batean kuantua irudikatzeke agertu ohi den kontzeptu gisa soilik erabili nahi nuke hemen; izan ere, Einsteinek *energia-kuantu* erabili zuen urte hartan, inoiz ez *argi-partikula* adierazpidea. Fotoia partikula bat dela, eta beraz momentu lineala dakarrela, beranduago ikusi zuen. Hurrengo ataletarako ere kontuan hartu beharreko oharra da hau.

⁸ Ikus artikuluen kronologiari buruzko eranskina.

ez ziren egokiak funtsezko analisi baterako. Puntu honetan, Einsteinek irudizko pentsamenduarekiko zaletasuna bere aldeko zeukan, Zurichen Boltzmann eta Helmholtzen idatziak aurkitu zituenean indartu izango zen zaletasuna. Einsteinen aurretik inork ez zituen hain ongi uztartu irudizko pentsamendua eta gogo-esperimentuak, gogamenean gauza daitezkeen esperimentuak, alegia.

1895ean, hamar urte buru-belarri jardun eta gero, Einsteinek erlatibitate teoria bereziaren hazia izango zen gogo-esperimentua irudikatu zuen. Esperimentu honen funtsa zera da: (1) ohiko fisikak dioenez, bere iturriak eterrean higitzen den argi uhin batekin batera mugitzen den behatzaile batek bere higiduraren efektuak igartzeko gai izan behar du, argiaren abiadura neurtuz adibidez. (2) Baina Einsteinentzat «intuitiboki argi» zegoen optikako legeak behatzailearen higiduraren menpekoak ezin direla izan. (1) eta (2) kontraesanak dira, eta Einsteinen ustez (1949, 53. or.) paradoxa bat zen gogo-esperimentu hau.

Bide propioak ibiliaz, Lorentz eta Poincaré ere paradoxa honen irtenbidearen bila zebiltzan, ikusi dugun bezala, denbora lokala eta higitzen ari diren gorputzen uzkuradura hipotesizat izanik. Baina 1904ko argiaren izaeraren inguruko emaitzek Einsteini garbi utzi zioten materiaren teoriek ez zezaketela inoiz eterraren desplazamenduari zegozkion esperimentuentzat azalpen zehatzik eta mundu ikuskera osorik eskaini.

Geroago aztertuko ditugu Einsteini paradoxa askatzeko giltza eman zioten aurrekariak, berak esan moduan (1949, 53. or.) zera apurtzeko: «denboraren izaera absolutuaren axioma, aldiberekotasunarena, oharkabean gure kontzientzietan ainguratuta duena». Aurkikuntza honetarantz berregin dezagun Einsteinek bere garaian izandako pentsamenduen ildo ondoko ekuazioetatik abiatuta⁹:

$$\begin{array}{ll}
 x_r = x - vt & x_r = \gamma(x - vt) \\
 y_r = y & y_r = y \\
 z_r = z & z_r = z \\
 t_r = t & t_r = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right)
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \text{(a)} \\
 \text{(b)}
 \end{array}$$

(a) GALILEOREN TRANSFORMAZIOAK. (x_r, y_r, z_r, t_r) eta (x, y, z, t) koordenatuak S_r eta S bi erreferentzia sistema inertzialei dagokie.

⁹ Berregite hau Arthur Millerren (1981) *Einstein's Special Theory of Relativity* lanean oinarritu dut.

- (b) LORENTZEN ESPAZIO ETA DENBORAREN TRANSFORMAZIO BERRITUAK ($x_r, y_r, z_r = t$) eta (x, y, z, t) koordinatuak S_r erreferentzia sistema inertzialari eta eterrean geldi datzan S sistemari dagozkie eta t_r denbora lokal deritzon koordinatu matematikoa da; eta bestalde,
$$\gamma = 1 / \sqrt{1 - v^2 / c^2} .$$

Eterraren desplazamenduagatik sorturiko galderak, v/c -ren bigarren ordenako doitasunez, Lorentzen egoera baliokideen teoremaren bitartez erantzun zitezkeen, berrituriko espazio eta denboraren transformazioetan oinarriturik eta denbora lokalaren koordinatu matematikoa kontuan harturik (b). Transformazioon pean Maxwell-Lorentzen ekuazioek aldagaitz diraute, Galileoren transformazioen pean ez bezala (a). Horrela bada, Lorentzen transformazio berrien arabera, mekanikako legeak ez ziren berdinak sistema inertzial orotan. Baina ondorio honek Newtonen higidura erlatiboaren printzipioa bortxatzen zuen, mekanikako esperimendu batek sistema inertzial baten higidura ezin duela frogatu ziurtatzen zuena. Newtonen higidura erlatiboaren printzipioaren oinarri matematikoa lehen ikusitako transformazio galilearretan aurkitzen da, S eta S_r , biak, erreferentzia sistema inertzialak direlarik mekanikarako. Ondorioz, mekanika eta elektromagnetismoko legeen transformazio arauak denboraren bi nozio desberdinen arabera ziren (bata fisikoa eta bestea matematikoa), Lorentzen bateratze nahiaren aurka. Horrela bada, 1905ean zientzialari gehienek mekanika eta elektromagnetismoaren arteko tentsioa mekanikak argiaren abiadura neurtzeko zuen ezintasunean errotuta zegoela uste zuten bitartean, Einsteinek sakonago miatu eta ohiko fisikan mekanika eta elektromagnetismoa bateraezinak zirela topatu zuen.

Föppl eta Abrahamen testuetatik, Einsteinek ondo ikasi ahal izan zuen mekanika eta elektromagnetismoaren arteko harreman estua nokakoa zen, indukzio elektromagnetikoa interpretatzeko. Faradayren legea ere oinarritua zen Lorentzen teoria elektromagnetikoarentzat, denbora lokalak posible egiten zuelarik magneto higikariaren zirkuitu geldia edota indukzio unipolarreko zirkuitu irekiaren gaineko efektua kalkulatzeko. Baina, ikusi bezala, kalkulu hau materiaren konstituzioari buruzko aurreiritzi batzutan sostengatzen zen. Teoria elektromagnetikoa indukzio elektromagnetikoa bi modu diferentetan esplikatzen zuen, magnetoa edo eroalea mugitzen zen arabera, efektu fisiko neurgarria soilik higidura erlatiboaren arabera zela jakinik ere: eroalea magnetoarekiko mugitzen zenean eroaleko elektroietan eragiten zuen indarragatik korrontea sortzen zen; kontrako kasuan, korrontea eroalearen baitan eragiten zuen eremu elektrikoagatik sortuko zen. Einsteinen ustez, soilik higidura erlatiboaren menpeko zen efektu bat esplikatzeko bi azalpen erabiltzea, fenomenoari berezkoa ez zitzaien asimmetria bat zen. Baliokidetza baten bila ari zen magnetoan eta eroalean leudekeen behatzaileentzat. Mekanika eta elektromagnetismoa bata bestearengan murriztu ordez, oreka batera iritsi nahi zuen Newtonen higidura erlatiboaren printzipioan

bide eginez. Erlatibitatearen artikuluan, Newtonen aipatutako printzipioaren bertsio zabalduari «erlatibitatearen printzipioa» deitu zion. Galileoren transformazioek argiaren abiadura azaldu ezin zuten, Lorentzen transformazio berrituek, denbora lokalaren koordenatu mamigabearekin, leku bat izan behar zuten erreferentzien arteko fenomenoak deskribatzerakoan. Lorentzen transformazioetatik abiaduren baturarako emaitza berri bat lortu ahal izango zuten Einsteinek:

$$w_r = \frac{w - v}{1 - vw/c^2}$$

w_r , S_r sistemarekiko mugitzen ari den puntu baten abiadura delarik, eta w , S sistemarekiko puntu beraren abiadura. Erreferentzia sistemen arteko abiadura litzateke v . Kalkulatuz gero $w=c$ denean, $w_r=c=c'$, Newtonen batura legearen partez, non $c'=c - v$ dugun. Horrela bada, Einstein bere gogo-esperimentuaren intuizioarekin bat zetorren emaitza honetaz jabetuko zen Lorentzen transformazio berrituengatik adizio legearen bitartez. Lorentzen transformazioen eta Galileorenen arteko ezberdintasuna denbora lokalean aurkitzen zenez, Einsteinek denbora lokala denbora fisikoa izango ote zen galdetu zion bere buruari. Baina galdera honek zuzenki inplikatzeko du sistema inertzial diferenteetan denbora diferentea izatea, denbora lokala hauen higadura erlatiboaren menpeko baita. Artean, denboraren izaera absolutua beti onartu izan zen. Gainera, gogo-esperimentatzailearen intuizioak Newtonen higadura erlatiboaren printzipioaren eta Lorentzen egoera baliokideen teoremaren arteko harremanaren azterketa matematikoa eskatzen zuen. Azken finean, Lorentzen transformazioetako koordenatu espazialak Galileorenetakoen berdinak ziren, eta denbora koordenatu lokala teoria elektromagnetikoan erabiltzeko asmatu zen. Einsteinek Lorentzen transformazio ekuazioengan batasun newtondarra ezarri izanak, bi erreferentzia sistemen arteko baliokidetasuna onartzen zuela esan nahi du. Hau pauso handi bat zen, Lorentzen eterra baztertea eta teoria ahaltsu baten irakurketa dinamikoa zekartzalako. Harriturik, hitzen ari diren gorputzen elektrodinamikaren gakoa denboraren nozioa zela aurkitu zuen Einsteinek.

Denboraren izaera aztertzeko bidean, Einstein arrazoiketa kritikoaz baliatu zen, «bereziki David Hume eta Ernst Machen filosofia idatziez». Idatzi hauetako zentzumenen pertzepzioen analisisiek argi erakutsi zioten naturako lege zehatzak ezin daitezkeela datu enpirikoetatik eratorri. Eta zentzuek denboraren eta kausalitatearen nozioei ezarritako mugen inguruko autoreon azterketek Einstein (1949, 53. or.) zeraz konturarazi zuten: argiaren abiaduren izugarritzko tamainak, egunerokotasunean aurki ditzakegun beste abiadurekin erkatuz, ez digu laga denboraren izaera absolutua gure inkontzientean oharkabean ainguraturik dela konturatzen. Einsteinen teoria fisikoaren fun-

tsezko azterketa zientziaren ohiko lana baino urrunago joan zen; indukzio elektromagnetikoaren azterketatik zentzumeneren azterketaraino, eta hortik pentsamendu beraren azterketaraino. Aldiberekotasun eta denboraren senezko ohiko nozioek asimetriaz jositako fisika batera, behatu ezin diren kantitateetara, eta betelan hutsal diren hipotesietara bideratzen gintuztela ondorioztatu zuen. Amets dogmatiko batean ez erortzeko tentuz, ikuspegi neo-kantiarraren jabe egin zen Einstein, termodinamikaren bigarren printzipioa lako egitateak atontzeko erabilgarria izan zenaren jabe. Newtonen erlatibitatearen printzipioa hedatu zuen Lorentzen teoria barneratzeko, gero axioma bilakatu zituen hau eta edozein uhin teoriari atxiki behar zaion oinarrizko printzipioa: eterrean geldi aurkitzen den S sisteman argiaren abiadura honen iturriaren abiadurarekiko independentea eta beti bera da.

Einsteinen bi printzipioek ez zuten ezer esplikatu nahi propioki (adibidez, argiaren neurtutako abiadurak zergatik izan behar zuen beti bera). Lorentz eta Poincaréren erlatibitate printzipioa datu esperimentalen araberako materiaren teoria batean oinarritzen zen bitartean, Einsteinena elektroiei zegokien egiaztapen mota orotatik independentea zen; axioma bat zen. Einsteinek 1907an idatzi bezala, erlatibitatearen printzipioa funtsezkoa izango zen materiaren konstituzioa arakatuko zuten fisikako legeen zehaztapenerako; printzipiozko teoria bat zen. Fisika teorikoaren korrante garrantzitsuenetatik aparte mugitu zen Einstein, arazo batzuk suertatzen ez diren fisikaren esparru bat hesituz, 1895eko paradoxa fikzio bilakaturik. Ondorioz, Einsteinen erlatibitatearen artikulua makala zirudien Abrahamen, Lorentzen eta Poincaréren ondoan, fisika matematikoaren metodorik aurreratuenak erabiltzen baitzituzten hauek Einsteinek axioma lez hartu zuena eratortzeko.

Hain zuzen ere, erlatibitatearen artikuluan, Einsteinek teoria fisikoaren aurka zeuden arazo nagusiak materiaren osaketari buruzkoak ez zirela zioen, baizik eta behatzaile mugikorren arteko ikuspuntuen baliokidetzari buruzkoak. Helburu honetarako, indukzio elektromagnetikoaren arazoak ilustratzen dituen gogo-esperimentu sinpleenarekin hasi zen: magnetoa eta eroale kiribildua higidura erlatiboan. Matematikaririk ez zen beharrezkoa Maxwellen elektrodinamikak eroalean eta magnetoan kokaturiko behatzaileak fisikoki neurgarriak diren efektuen interpretazio diferenteetara eramaten zituela frogatzeko. Horrela bada, Faradayren legea unibertsalki baliagarria zen, gaizki interpretatua izan zen arren.

Erlatibitatearen artikulua bigarren paragrafoan eterretiko desplazamenduaren esperimenduek azaltzen zituzten emaitzen alderdi bat aipatu zuen Einsteinek, mundu ikuskera elektromagnetikoaren pean: erreferentzia sistema inertzialetan elektrodinamika eta mekanikaren legeak balekoak ziren v/c -ren lehen ordenako doitasuneko esperimenduetan. Einsteinen buruhauste nagusia eterretiko desplazamenduaren esperimenduetan, eta magneto eta eroalearen esperimendua elkarlotzea zen. Indukzio elektromagnetikoa mekanika-

ko legeen eta elektromagnetismoaren (zeintzuk optika ere bere baitan baitute) araberakoa zela arrazonatu zuen, eta honen bidez Newtonen higidura erlatiboaren printzipioak hiru esparru hauek bere baitan dituela bururatu zitzaion v/c -ren lehen ordenarako. Hala borobildu zuen arrazonamendua, eta postulatu baten statusera goratu zuen estreinakoz aieru baino ez zena. Erlatibitatearen printzipioa eta argiaren abiadura gobernatzen zuen printzipioa erabiliz, fisikaren hain ikuspuntu boteretsua garatu zuen Einsteinek, ezen indukzio unipolarraren arazoak zentzugabeak bilakatzen baitziren. Erlatibitatearen artikuluan, Lorentzen espazioaren uzkuradura eta Lorentzen beste hipotesi gehienak ondorio sekundario lez azaleratzen ziren, eta Einsteinentzat ez zen beharrezkoa eterraren desplazamenduaren esperimendua zabalki berrikustea, bere ikuskeran esperimenduen emaitzak hasera batetik ondorio ekidinazinezinak zirelako.

Gogo-esperimentu arras sinpleekin erlatibitatearen artikulua lehen parteak denbora eta espazioaren ohiko nozioak zeinen zehaztugabeak diren frogatu zuen, eta nozio hauen izaera erlatiboa jalgi zen. 1905eko irakurle gehienek ordea, artikulua bukaera nabarmentzen zuten, non Einsteinek zehazki deduzitzen zuen Lorentzena ere bazen formula bat elektroien zeharkako masarentzako, eta bide honetatik Einsteinen lana Lorentzen elektroien teoriaren orokorpen baliagarri gisa zeukaten. Kaufmannek laster adierazi zuen bi ekuaziook berdinak izan behar zutela, eta «Einstein-Lorentz teoria» izena erabili zuen lehenengoetarikoa izan zen. Baina zer esan behar zuen Einsteinek bere artikuluan Kaufmannen 1902 eta 1903ko artikuluei buruz? Ezer ere ez, bazekielako ondo datuok ez zetozeela bat bere elektroien masaren formularekin (Miller, 1981, 333. or.). Halere, iragarpen honi ez zion garrantzia handiegirik eman Einsteinek. Erlatibitatearen printzipioaren statusa berrikusten zuen 1907ko artikuluan, Einsteinek Kaufmannen datuak zailantzan jarri zituen zera nabarmenduz: Einstein-Lorentzen iragarpenekiko Kaufmannen datuek agertzen zuten aldentez sistematikoak oharkabeko errore iturri bat adieraz zezakeela. Einstein datu gehiagoren zain zegoen. Fenomeno konplexu zabalago bat barneratzen ez zuten teoriak sostengatzen zitu elako baztertzeko modukoak iruditu zitzaizkion Kaufmannen datuak, v/c -ren bigarren ordenaraino doituriko optikako esperimendua azaltzeko gai ez ziren teoriak.

Lorentzek Poincaréri idatzitako gutun batean datuek erlatibitate printzipioarekin zuten desadostasunari buruz aritu zen Lorentz, modu arras ezkor batean, elektroien eite deformearen hipotesia abandonatzeko hautua egitearaino. Elektrizitate eta optikako fenomenoaren arteko translazioreragin barik, ezinezkoa zitzaion teoria bat ezartzea, eta hala aitortuko zuen.

Einsteini ondo lagundu zion intuizioak, finean, Kaufmannen datuak okerrak ziren eta. 1908an Buchererren (1908) datu berriek Lorentz-Einsteinen elektroien zeharkako masa aldarrikatu zuten. Buchererren datuak ez

zituen berehalakoan onartu komunitate zientifikoak, baina Poincaré eta Lorentz ez ziren test gehiagoren zain geratu. Kasualitatez, hiru hamarkada eta gero Buchererren datuak ere esperimentera okerrak zirela frogatu zuten. Kaufmannen 1907ko pasarteak izango zuen seguru buruan Einsteinek 1946an teoria zientifiko bat onartzeko bi irizpideak deskribatu zituen: «Lehenengo irizpidea nabarmena da: teoria ezin da datu enpirikoen kontra egon. Hailere, eta aitzin-baldintza honek lehen postuan egon behar duen arren, honen gauzapeña nahiko bihurria gerta liteke.» (1949, 21. or.)

Laburrean esan, 1905eko oinarritzko teoria fisikoa abiadura handiko datuen menpekota zen arren, Einsteinek abiadura txikiko ohiko datuak eta sen onezkoak behar izan zituela soilik fisika XX. menderaino eramateko: indukzio elektromagnetikoa eta gogo-esperimentuaren datuak.

3. Erlatibitatearen eta argiaren partikula izaeraren arteko kontraesanak Einsteinen ziurtasunaren ilustragarri

1905eko lehenbiziko artikuluan (efektu fotoelektrikoarenean), argiak uhin izaerari men egiten ziola zioen garaiko korrante nagusia alboratu, eta guztiz baztertuta zen partikula izaera aitortu zion Einsteinek. Zenbaitetan esan izan da Einsteinen artikuluetako sarrerak materiaren bihotzera bidertzen direla. Argi-partikulen (kuantuen) artikuluan hitzok erabili zituen has-teko:

Desberdintasun formal sakona existitzen da gasen inguruan fisikariek eratutako kontzeptu teorikoaren eta espazio hutsaren baitako fenomeno elektromagnetikoen teoria maxwelldarraren artean. Gorputz material baten egoera, alimalekoa baina finitua den atomo eta elektroien kopuru baten posizio eta abiadurek guztiz determinatzen dutela kontsideratzen dugun bitartean, bolumen jakin baten eite elektromagnetikoa deskribatzeko funtzio espazial jarraituak darabiltzagu, eta parametro kopuru finitu bat ezin daiteke nahikotzat jo aipatutako eitea osoki determinatzeko. Maxwellen teoriaren arabera, fenomeno elektromagnetiko puru guztien kasuan energia funtzio espazial jarraitu bezala ikusten da, argiaren fenomenoa barne; gorputz pisudunen kasuan aldiz, egungo fisikaren ikusmoldearen arabera, energia atomo eta elektroien batura lez kalkulatu da. Gorputz pisudun baten energia ezin daiteke zatibanatu parte txiki arbitrariotan; bestalde, iturri batetik argi-izpi baten energia (argiaren teoria maxwelldarrari kasu eginez, edo orokorrage, edozein uhin teoriari) tai gabe hedatuko da hazten ari den bolumen batean zehar.

Hitzok materiaren bihotzera doaz. Baina era berean, modu adierazgarri batean, ez doaz. Artikuluaren sarrerako aipuetan, Einsteinek eite granular eta etereoaren arteko berezko gatazka aipatu zuen, argia uhin moduan hartzen

denean eta materia atomoz eratua. Bere burua itotzeko gai den gatazka da hau, argia eta materiaren arteko elkarrekintza kontuan hartzerakoan. Einsteinek gatazka hau saihestuko zuen argia ere, materia bezalaxe, partikulaz osatua balego moduan tratatuz. Eta alde honetatik bai, artikuluko hitzak materiaren bihotzera bideratuak lirateke. Baina hurrengo hitzetan zera zioen:

«funtzio espazial jarraituekin egituratzen den argiaren uhin teoriak fenomeno optiko soilen errepresentaziorako balio izan du eta ziurrenik ez du inoiz beste teoria batek ordezkatu.» Etereotasuna nabarmentzeko zera zioen: «kontuan hartu behar da... soilik optikoak diren behaketak hedapen denboren batezbestekoei buruzkoak direla.» Halere, berak ondo zekien bezala datuek argitzen zutenagatik ezin zuen esplikatuz interferentzia efektua argi partikulen bidez, hots, ezin zen libratu argi uhin etereoetatik.

Berreraiki dezagun bada, kontu hau, Erlatibitate Bereziarekin dituen zubiak aztertzeko. Einsteinek, bere sarrerako aipuetan, uhin/partikula gatazka berri eman zuen argi uhinek materia atomikoa erasotzen duten adibiderako. Baina lehen baino gatazka okerrago batekin egin zuen topo. Argia versus materiaren kasurako uhin/partikula gatazkaren ordez, uhin/partikula gatazka izan zuen artean bere aurrean, baina argia versus materia kasurako ez, argia versus argia berarekiko baizik. Eta hau da materiaren benetakoa muina. Gatazka teoriko bat nabarmenduz hasiko zen, eta arazo handiago bat sortuz bukatuko. Horrela begiratu gero, Einsteinen hitzek intuizio harrigarri bat erakusten dute 1905eko lehen artikulua honetan, partikula teoria jada hiltzat jotzen zuten aro batean Einsteinek gaur egun uhin-partikula bikoiztasuna lez ezagutzen duguna sumatu zuen eta. Egin kontu, bikoiztasun famatua formulatu baino pare bat hamarkada lehenago izan zela guzti hau. Halere, aitortu beharra dago, Einstein ez zen sekula gustura egon formulazio honekin.

Argi-partikulen intuizioarekin loturiko Einsteinen ziurtasun honi buruz zerbait gehiago esan beharra dago. 1905ean, ideia aurkeztu eta hamahiru astetara, helarazi zuen lehen aztertu dugun erlatibitatearen artikulua. Bertan ez zuen argi-partikulen aipamenik egingo espresuki. Lehen esan dugun bezala, artikuluko bi oinarriak, Newtonen mekanikatik hartutako erlatibitatearen printzipioa eta argiaren higidurak bere iturriarekiko lukeen independentzia ziren. Bigarrena interesatuko zaigu hemen. Nabarmena da, argia eterraren baitako uhin batzuk eratzen dutela sinesten badugu, uhinen ibilera euren iturriarekiko libre eta iragaten diren ingurunearen arabera izango dela. Idatzian aurrerago, printzipioa jada ezarririk, Einsteinek zuhurki zimendatu zituen honen fundamentuak espresuki zera aipatu ondoren: «neure teoria honetan eter luminiko baten ezartzea betelan bat besterik ez dela frogatuko da.» Dakigun bezala, bere bi printzipioak zintzoki garatu zituen, elkarrekiko higitzen ari ziren bi behatzaileraren erlojuak bata bestea baino motelago ibiliko ziren teoria batera iritsiko zela ikusita ere.

Argia partikulaz eratua delako sinestearekin hasten bagara, zer izango dugu halere? Bigarren postulatu zentzugabea da, eta honek adoregabetzen duen arren, tentazio ahaltsu baten arriskupean ipintzen gaitu. Kontsideratu Einsteinen egoera bere garaian. Bat-batean onartua izateko iraultzailegia zen argi-partikulen ideia proposatu zuen, hain justu, lehenengo artikuluan. Berak ondo zekien hori erlatibitatearena idazten hasi zenean. Luze eta zabal bilatu behar izango zituen ideari egiazkotasuna aitortuko zioten aplikazioak. Aurkeztu zuen artikuluan halako hiru aplikazio sartu zituen eta orain laugarren baten aukera agertzen zaigu: uhin legezko bigarren postulatu baztertu eta argi-partikulei beste edozein partikula newtondarren portaera atxiki. Orduan, Newtonen erlatibitatearen printzipioa aplikatu ahalko zen, eta arras sinplea zen azalpena lortuko lurraren eterrarekiko abiadura kalkulatu nahi zuten esperimendu optikoentzako (ohiko espazio eta denbora erabiliz lortutako azalpena gainera). Pentsa zeinen garaipen handia zatekeen hau Einsteinen argi-partikulen ideiarentzako. Tentazioak alimalekoa behar zuen izan (ez fisikarientzat orokorrean, Einsteinentzat soilik, bera baitzen garai hartan argi-partikulak bazirela sinesten zuen bakarra). Baina Einsteinek tentazioari eutsi zion, uhin legezko bigarren postulatu aukeratu eta denbora eta espazioaren portaera berri eta arrotzari bide emanaz. Berrito dakusagu hemen bere intuizioarekiko zuen erabateko ziurtasuna.¹⁰

4. Bidearen alderdi nagusiak

Espazio-denboraren dimentsio kosmikoetara, eta materiaren bihotzaren mikrokosmosera ailegatu zen Einsteinen gogoia 1905ean bidaia miragarri baten buruan. Konkretuki Erlatibitate Berezirako bidean hauek nabarmendu nahi izan dira lan honetan:

- a) Garaiko aldatuta teknologikoen eraiki zuten hondo berria eta Einsteinen irudizko pentsamendu berezia aitzin-baldintza lez finkatu dira.
- b) Teoriari argi egiten zioten osagai filosofiko eta zientifikoei dagokionez, batez ere hauek finkatu nahi izan dira: Machen filosofia, Maxwellen elektromagnetismoa, Faradayren dinamoa, Plancken erradiazioa eta Lorentzen eta Poincaréren aurrekariak.

¹⁰ 2. eranskineko kalkuluan atal honetako kontraesanak gaintuz Erlatibitate Berezia eta energia-kuantuen arteko lokarria agerrarazi nahi da Einsteinek zeukan ziurtasunari eta intuizioari irudi matematiko bat eman nahian. Einsteinek garai hartan horrela egingo ez zukeen arren, aurkeztutako kalkulua lokarriaren ideia hori ongi kondentsatzen duelakoan nago fisikarien formulazioak ezagun zaizkion edozeinentzat. Izatez kalkulu hori beste modu batera egin zuen Einsteinek baina hemen teoriaren berehalako beste ondorio ezagun batzuetatik abiatuko gara argigarritasunagatik.

- c) Azken buruan baina, abiadura txikiko datu esperimentalak, indukzio elektromagnetikoarenak, eta irudizko gogo-esperimentua nahikoa izan zituen Einsteinek osagaion arteko azken sintesirako.
- d) Gainera, argiaren partikula izaeraren eta argiaren abiaduraren aldaezintasunaren arteko kontraesana zirudikeenak ez zuen bide okerrera eramanez.

5. Erreferentziak

- ABRAHAM, M. (1902). «Dynamik des Elektrons». *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, 20-41.
- BRACE, D. B. (1904). «On Double Refraction in Matter Moving through the Aether». *Philosophical Magazine* 7, 317-329.
- BUCHERER, A. H. (1908). «Messungen a Becquerelstrahlen. Die experimentelle. Bestätigung der Lorentz-Einsteinschen Theorie». *Physikalische Zeitschrift* 9, 755-762.
- GALISON, P. (2003). *Einstein's clocks, Poincaré's maps*. London: Sceptre.
- EINSTEIN, A. (1905a). «Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt». *Annalen der Physik* 17, 132-148.
- EINSTEIN, A. (1905b). «Die von der Molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen», *Annalen der Physik* 17, 549-560.
- EINSTEIN, A. (1905c). «Elektrodynamik bewegter Körper». *Annalen der Physik* 17, 891-921. XXen ingelesko itzulpena (1923) «On the electrodynamics of Moving Bodies». New York: Dover.
- EINSTEIN, A. (1907). «Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen». *Jahrbuch der Radiaktivität* 4, 411-462.
- EINSTEIN, A. (1949). «Autobiographical Notes». Itzulpena P. A. Schilpp in Schilpp (arg.), *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*. Evanston, Illinois: Library of Living Philosophers.
- ETXEBARRIA, J.R. (1990). *Albert Einstein: kosmosa pentsagai*. Donostia: Gaiak.
- FÖPPL, A. (1894). *Einführung in die Maxwellsche Theorie der Elektrizität*. Leipzig: Teubner.
- HADAMARD, J. (1975). *Essai sur la psychologie de l'invention dans le domaine mathématique*. Paris: Gauttier-Villars.
- HOFFMAN B. (1982). «Some Einstein Anomalies», in G. Holton, Y. Elkana (argk.), *Albert Einstein: Historical and Cultural Perspectives*. Princenton: Princenton University Press
- KAUFMANN, W. (1901). «Die magnetische und elektrische Abweichung der Becquerelstrahlen und die scheinbare Masse der Elektronen». *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, 143-155.
- KLEIN, J.M. (1962). «Max Planck and the Beginnings of the Quantum Theory». *Archive for History of Exact Sciences* 1, 459-479.
- KUHN, T. S. (1978). *Blackbody Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912*. Oxford: Oxford University Press.
- LORENTZ, H. (1892). «La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants». *Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles* 25, 363 or.

- LORENTZ, H. (1904). «Electromagnetic Phenomena in a System Moving with Any Velocity Less than That of Light». *Proceedings of the Royal Academy, Amsterdam* 6, 809 or.
- LORENTZ, H. (1892). «The Relative Motion of the Earth and the Ether». *Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam* 1.
- LORENTZ, H. (1895). *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*. Leiden: Brill.
- LORD RAYLEIGH. (1902). «Does Motion through the Ether Cause Double Refraction?». *Philosophical Magazine* 4, 678-683.
- MACH, E. (1883). *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of Its Development*. La Salle: The Open Court Publishing Company, 1960.
- MERZ, J. T. (1954). *A History of European Scientific Thought in the Nineteenth Century* (1904-1912). 2 bol. New York: Dover.
- MILLER, A. (1978). «Visualization Lost and Regained: The Genesis of the Quantum Theory in the Period 1913-27». *On Aesthetics in Science*, 72-102.
- MILLER, A. (1981). «Unipolar Induction: A Case Study of the Interaction between Science and Technology». *Annals of Science* 38, 155-189.
- MILLER, A. (1981). *Albert Einstein's Special Theory of Relativity: Emergence (1905) and Early Interpretation (1905-1911)*. Massachusetts: Addison-Wesley.
- POINCARÉ, H. (1904). «Sur la dynamique de l'électron». *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* 140, 1504-1508.
- POINCARÉ, H. (1906) «Sur la dynamique de l'électron». *Rendiconti del circolo matematico di Palermo* 21, 129-175.
- WIEN, W. (1900). «Übre die Möglichkeit einer elektromagnetischen Begründung der Mechanik». *Recueil de travaux offerts par les auteurs à H. A. Lorentz*, 96-107. The Hague: Nijhoff.

1. ERANSKINA: 1905eko artikuluak kronologia¹¹

1905eko Martxoa

Einsteinek *Annalen der Physik* fisikako aldizkari alemaniar nagusira artikulu bat bidali zuen argiaren izaeraren kontzeptu berri bat aurkeztuz. Argia energia-partikula diskretu eta independentez osatua balego lez portatzen zela zioen bertan. Argiak metaletatik elektroiak nola askatzen dituen esplikatu zuen, berak argi-kuantu izendatu zituen energia partikulen bidez.

1905eko Maiatza

Annalen der Physik aldizkariak beste artikulu bat jaso zuen. Ondo ezaguna zen energia zinetikoaren teoriak beroa atomoen etengabeko agitazio higidu-

¹¹ Lau artikulu izan ziren arren, askotan 1905eko trilogiaz hitz egiten da Arthur Miller berak egiten duen bezala. Izan ere, azken bi artikuluak erlatibitate bereziari buruzkoak dira, laugarrena eta azkenena hirugarren maisulanean buruturiko iraultzaren ondorio edo luzapentzat har daitekeelarik.

ra gisa esplikatzen zuen; Einsteinek teoria hau bidegurutzean, azken proba baten aurrean, jarri zuen. Zera zioen, likido batean partikula oso txikiak baina ikus zitezkeenak esekiz gero, likidoko atomo ikusezinen bonbardaketa irregularrak zoriz dantzaraziko zituela hauek. Hain zuzen, partikula mikroskopikoen zorizko dantza hori biologoek behatua zuten jada (mugimendu brownarra bezala ezagutzen zen). Artikuluan Einsteinek mugimendu hori xehetasunez azaldu zuen. Gainera, teoria zinetikoa indartu zuen eta tresna berri eta boteretsu bat sortu atomoen mugimenduak aztertzeko.

1905eko Ekaina

Aztertu dugun *Higitzen ari diren gorputzen elektrodinamikaz* iritsiko da aldizkari berberera. Erlatibitate Bereziaren Teoria ezarriko da bertan.

1905eko Iraila

«*Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?*», *Gorputz baten inertzia daukan energiaren menpekoa al da?* deitzen zen 1905eko iraileko laugarren eta azken artikulua. Erlatibitate Bereziaren Teoriaren ondorio esanguratsu bat plazaratzen du bertan: gorputz batek energia kantitate bat igortzen baldin badu, orduan bere masa kantitate proportzional batez murriztu beharko da. Zera idazten zion bitartean lagun bati Einsteinek: «erlatibitatearen printzipioak, Maxwellen ekuazioekin harremanetan, masa gorputzen baitan dagoen energiaren neurri zuzena izatea eskatzen du; argiak masa transferitzen du...» Horra hor, masa eta energiaren baliokidetzaz ospetsuaren ($E = mc^2$) lehen aztarnak.

2. ERANSKINA: *kalkulu bat argi kuantu eta Erlatibitate Bereziaren arteko lokarria agertzeko*

Hausnarketa honetan zehar Plancken kuantuen edo energia-paketeen teoria erlatibitatearen artikulua erditzeko bidelagun gisa aurkeztu dugun arren, erlatibitatearen artikuluko bi postulatu nagusiek badirudi ez dutela inongo harremanik, ez eratorpenean ezta inplikazioetan ere, teoria honekin. Kontuan izan, teoria hau izan zela egun mikrokosmosa ezagutzeko aukera ematen digun teoria kuantikoaren oinarri aitzindaria. Baina hau lehen begiratu batean soilik da egia. Espazio-denboraren kontzepzio berri honen altzozan datzan tresneria matematikoak emaitza harrigarri bat ahalbideratzen digu, lehen aipatu bi postulatuetatik abiatuz masa eta energiaren arteko erlazioaren inguruan. Pausagunean m masa duen puntu materialari dagokion energia zinetikoa ez da teoria galilearreko

$$\frac{1}{2}mv^2$$

adierazpenaren bidez ematen Erlatibitate Berezian,

$$(\gamma - 1)mc^2$$

delakoaz baizik. Adierazpen honek masaren eta energiaren arteko baliokidetzaz adierazten du eta, izatez, geroago aurkitu zen energia nuklearraren erabilpenerako giltza da (pausaguneko energia gehituta), nahiz eta lehenengo fisio nuklearra Einsteinek Erlatibitate Berezia plazaratu eta hogeita hamahiru urte beranduago gauzatu. Jadanik ikusi dugun

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

parametroa handiagotu egiten da abiadura handitzean, eta horregatik, masa erlatibista ere (klasikoki masa inтрintseko gisa har daitekeena apartatuz lortzen dena: $M = \gamma m$) handiagotu egingo da bizkorrago joatean. Horixe da beste ondorio harrigarri bat, esangura sakona eta praktikoa duena.

Badirudi materiaren bihotzean sartzen ari garela berriro masaren eta energiaren arteko batasun honen baitan. Eta adibide honetan erakutsi nahi dudana bide horretan doa. Erlatibitate Berezia, materiaren bihotzean leudekeen partikulen arteko elkarrekintzak baztertu eta espazio eta denbora bezalako makro-kontzeptuei bira kopernikar bat emanik osatua izan denak, argia bezalako substantziaren osaerarako erator dezake zerbait? Bada matematikoki froga daitekeen harremanik Erlatibitate Berezia eta Plancken legearen artean? Erantzuna baiezkoa da, eta erlatibitate teoriaren ahalmen praktikoaz, botereaz, ohartarazten gaitu.

Argi-partikulak, fotoi bezala ere ezagun direnak, energia-kuantuak, energia pakete indibidualak ziren. Kuantu bakoitzaren energiak maiztasunaren menpeko behar zuen, eta lege sinplea proposatu zuen:

$$E = hv$$

Non h Plancken konstantea bezala ezagutzen den konstante unibertsal bat den gaurkoz. Ikusi bezala, kuantuaren ideia Einsteinek garatu zuen gehiago bere lehen artikuluan, efektu fotoelektrikoa esplikatzen nahian. Azalera metaliko bat erasotzen duen argiaren kasua da Plancken hipotesia sostengatzera datorrena efektu fotoelektrikoaren izenpean. Gaur egun, teoria kuantikoa ongi ezarria da eta bere aplikazioak molekulen propietateak eta

atomoen propietateak esplikatzeko gai den fisika modernoaren muinean daude. Argiaren teoriak uhin-partikula bikoiztasuna agertzen du bertan. Propietate batzuk, difrakzioa eta interferentzia adibidez, uhin lakoak dira naturan; aldiz, efektu fotoelektrikoa eta argiaren eta atomoen arteko beste elkarrekintza zenbait partikulak oinarri hartuta esplikatzen ditugu.

Argiaren partikula izaeraren baitan, argia fotoi deituriko kuantu sorta bat lez irudika dezakegu. Erlatibitate printzipioak ematen digun masaren hazkundearen ekuaziotik

$$m_0 = (1 - v^2 / c^2)^{1/2} m = 0$$

Pausaguneko masak zero behar du izan! Hau ez da dirudien bezain arraroa hasera batean, behatzaile inertzial batek berak ere ez duelako sekula fotoi bat pausagunean ikusiko (bere abiadura beti da c) eta pausaguneko masaren kontzeptua nozio kantitate bat soilik delako. Elektroiaren norabidean doan momentu-bektorearen modulua p izanik, energiaren ekuazioa honela geratzen da pausaguneko masa nulua denean

$$(E^2 / c^2) - p^2 = 0, \quad p \text{ eta } c \text{ positiboak direnez,}$$

$$E = pc$$

Eta masa erlatibista $m = p / c$ geratuko da.

Komeni da konturatzea argiaren eta materiaren propietate zinematikoak elkarrekin konponarazteko sortu zen erlatibitate bereziak sistema orokor sinple baten baitan dituela txertatuta hauen propietate mekanikoak. Horrela prest gara jada planteatutako galderari erantzungo dion adibidea plazaratzeko.

Bedi Doppler efektu erlatibista, higitzen ari den argi iturri batekiko abian den behatzaile inertzialak jasotako uhinen uhin-luzera eta pausagunekoak jasotakoen arteko arrazoiak emana (espazioaren uzkurduraren ondorioa)

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \left(\frac{1 + v/c}{1 - v/c} \right)^{1/2}$$

uhinen maiztasunentzako halaber

$$\frac{\nu_0}{\nu} = \left(\frac{1 + v/c}{1 - v/c} \right)^{1/2} \quad (1)$$

Iturriak E_0 energiadun argi izpi bat igorriko du. Behatzailearen erreferentzia sisteman jasotakoa topatzeko erabil ditzagun erreferentzia sistema bate-

tik bestera pasatzeko energia eta momentuaren transformazioak, espazio eta denbora transformazioen simetria bera eta pareko aldagaiztasuna agertzen duten ekuazioen bidez. Bi erreferentzia sistemen noranzko negatiboan ibiliko da argi izpia, $p_x' = -E_0 / c$, beste momentuen osagaiak nuluak izaki. Ordezkatuz:

$$E = \frac{E' + v p_x'}{(1 - v^2 / c^2)^{1/2}} = \frac{E_0(1 - v/c)}{(1 - v^2 / c^2)^{1/2}} = E_0 \left(\frac{1 - v/c}{1 + v/c} \right)^{1/2} \rightarrow \frac{E_0}{E} = \left(\frac{1 + v/c}{1 - v/c} \right)^{1/2} \quad (2)$$

hau maiztasunarentzako Doppler efektuarekin konbinatuz, (1) eta (2) alegia

$$\frac{E_0}{E} = \frac{v_0}{v}$$

Energia eta maiztasuna proportzionalak dira beraz, eta proportzionaltasun-konstanteak unibertsala izan beharra du, erlazio hau edozein bi erreferentzia sistema inertzialentzako balekoa baita, beraien arteko abiadurarekiko independentziaz. Konstante unibertsal hori litzateke h , *Plancken konstantea*. Egin dugu orduan egitekoa: Erlatibitate Berezitik zuzenki eratorri dugu Plancken legea.