

EINSTEINEN KUANTU-EKARPENAK

Pedro M. Etxenike

Ezertan hasi aurretik, diodan Einsteini buruzko hitzaldi hau euskaraz emateko ez naizela osorik gauza sentitzen. Nere euskara ez da, izan ere, zeuek berehalaxe antzemango diozueenez, nahi bezain zalua. (1)

Zergatik, hortaz, hitzaldi hau egitera ausartu? Erantzuna oso erraza da. Alde batetik guk, fisikariok, Einstein-i hainbeste eta gehiago zor diogulako; bestalde, eta une honetan oso bereziki, Martin Orbe hala eskatu izan didalako. Eta jakina, nor esan ziezaikeen ezetz gure Martin Orbe jaunari?.

Gaiari dagokiona aztertu baino

lehen nere esker ona azaldu nahi diet Josu Oregi eta Jazinto Iturberi eman didaten laguntzategatik.

XX. mendearen hasieran bi iraultza nagusi gertatu izan dira fisikaren arloan. Ezagunena, behar bada, Einsteinek eraginiko erlatibitatearen teoria da, bai berezia eta bai orokorra. Bestea, jendartean hain ezaguna ez bada ere nere ustez askoz ere iraultzaileagoa, kuantu-teoria izenekoa dugu. Erlatibitatearen teoria, berezia nahiz orokorra, teoria klasikoak dira. Unibertsoaren ikuskeraz orain dainokoan eskuratutako gailurra, hain zuzen. Kuantu-Mekanikak, ordea Manu Barandiaranek eta Arantxa Iz-

tuetak aurtengo U.E.U.n ongi era kutsi digutenez, funtsezko etena dakar ikuspegi klasikoarekiko.

De Brogliek honela dio, Einstein-en zientzi lanaz ari delarik:

"Zientziaren historiaren zatirik dirdaritsuenetakotzat joko den Fisikaren ikaragarritzko bultzada izango du, ezaugarri berezizat, XX.mendearen lehen erdiak.

Urte-epe labur horretan, izan ere mendetan zehar iraungo duten monumentu bi eraikitzen ditu giza zientziak: Erlatibitatearen teoria batetik, eta kuantu-teoria bestetik.

Lehenbizikoa, jakina denez, Albert Einstein-en adimen sortzaileari dario oso-osorik. Planck-ek ezarritzen, bestalde, bigarrenaren lehen oinarriak, eta Einstein-en adimenari zor dizkio aurrerapenik nabarmenenak. Harridura eta mirespena sortarazten du, nornahiren baitan hain urte gutxitan honelako lan sakon eta berezia burutu izanak.

Albert Einstein-en izena, hortaz, giza adimenaren harrimen-bide diren bi lorpen garrantzitsuenei lotuta agertuko da betiko".

Juan Mari Agirregabiriak eta

-160-

Jose Ramon Etxeberriak beren gain izan dute arestian, Einstein-en erlatibitatearekiko lanez ihardutea. Ni neu, ondoren, Einstein-ek kuantu-teoriari eskaini zizkion aurrerapideak laburki bederen azaltzen saiatuko naiz.

1905.ean eskaini zuen Einstein-ek, lehenbiziko aldiz, argi-kuantuei buruzko lehen ideia. Hori izan zen bere annus mirabilis delakoa, lehenagoko beste zenbait urte miresgarriren ondoren jarri beharko dena. Hona halako bat edo beste: 1543, Kopernikoren De revolutionibus orbium coelestium argitara agertu zenekoa; 1686, Newtonek Philosophiae naturalis principia mathematica osatu zuenekoa; eta 1864 azkenik, Maxwell-ek jendartera Electromagnetikoa deritzana azalduakoa.

Horrelatsu bada, 1905ean ez du Einsteinek soil-soilik erlatibitatearen teoria mugatua ("Gorputz higikorren elektrodinamikaren inguruan" artikulua) eman izan; aitzitik beste funtsezko idazlan batzuren bidez (argiaren izaerari dagokiona, adibidez) kuantu-fisikaren oinarritzko gogoetak aurkeztu ere izan ditu, horretaz gainera.

$E=mc^2$ ekuazio beldurgarria ere urte horretantxe agertu zuen, "Gorputz baten inertzia bere baitako

energiaren menpekoa al da?" ize-neko bere idazlanean.

1905ean, nolana ere, argiaren uhin-teoriak zituen oztopoez era bat jabetuta zegoen Einstein, bai eta argi-sortzeak eta -zurgapenak dakarten auzi asko kuantu-teoriaren bidez askozaz ulergarriago zirenaz ere. Hogeigarren mendean hasieran fisikaren oinarriez zegoen teori bitasunak erabat kezkatuta zeukan Einstein. Bitasun honetaz ziharduelarik hasi zuen, hain zuzen, Argiaren sortze eta aldakuntzei buruzko teoria neuristikoko bat deritzan bere idazlana.

"Desberdintasun sakon bat dago -dio Einsteinek- fisikariek gasei buruz gauzatu dituzten teoriaren eta Maxwellek espazio hutsa deritzanaren baitarako ematen duen Teoria Elektromagnetikoaren artean".

Bi teoriaren arteko desberdintasun honetaz ari da: materiaren teoria mekanikoa egituraz atomikoa da eta, hortaz, hainbat aldagaik fin katzen dute sistema baten egoera. Ereku elektromagnetikoaren teoriak alderantziz, aldagai-kopuru infinitu bat behar du sistema baten egoera zehazteko.

Azter dezagun Einstein-en auzi honekiko tratamendua. Horma irradia

tzaile baten barrua du aztergai, gas bat eta elkarri harmonikoki lotutako hainbat elektroi barruan dituela. Elektroi horiek sorburu izateaz gainera irradiazio elektromagnetikoa absorbatzen dute; eta hori, gorputz beltzaren irradiazioaren pareko izango da sistema hori oreka termodinamikora iritsi dadinean. Einsteinek, Mekanika estatistikoaren bidez problema hau uztartzeak "hondamendi ultramorera" garamala ikusi ondoren, sistemaren entropiari ekiten dio. Berak, energia (E) eta entropia (S) balio zehatz batzuek dituen orekako sistema darabil irradiazioa. Bolumenaren V_0 -tik V -rairako aldakuntza astiro batek entropiaren honelako aldakuntza hau dakarrela erakusten du:

$$\Delta S = \frac{E}{\beta v} \cdot \ln \frac{V}{V_0} \quad (1)$$

β hori Wien-ek 1896ean aurkeztutako legean agertzen den konstantea da. Dakizenez, Wieneen legeak gorputz beltzaren maiztasun handitako irradiazioa adierazten du. Honako honek ematen digu, v eta $v + \delta v$ arteko maiztasunetan, irradiazioaren bolumen-unitateko energia.

$$\rho(v, T) = a v^3 \exp(-\beta \cdot v/T) \quad (2)$$

Horako a eta β horiek konstanteak dira.

N partikulaz osaturiko gas ideal baten entropian gertatzen den aldakuntza bezalako erabat,

$$\Delta S_{\text{gas}} = N K_B \ln \frac{V}{V_0} \quad (3)$$

Bat-etortze hori osorik zorizkoa den ala funtsezko zerba it adierazten ote zuen erabakitzeko Einstein-ek Boltzmann-en entropiaren estatistikari buruzko adierazpena hartu zuen. Boltzmann-ek zioenaz, entropi aldaketa bi egoera horiek azaldu ahal izatearen w probabilitatearen araberakoa da.

$$S = K_B \ln(w) \quad (4)$$

Ondorioa nahia zekoa da Einstein-entzatz gertaera termikoei buruz, dentsitate txikiko (Wien-en banaketak balio duen eremuan) irradiazio monokromatikoa, $K_B \beta v$ magnitudezko bata bestarekiko erlaziorik gabeko energia kuantikoa bailitzen gertatzen da. $K_B \beta$ bideketaren emaitzari Planck-en konstantea deritza.

Pentsabide honek eraman zuen Einstein, hain zuzen, irradiazioa bata bestarekiko erlaziorik gabeko energi partikulez osatuta bailegoan ikustera. Einsteinek beste gertaera fisikoak bide horretatik aztertzeari ekin zion;

horietariko bat, ongi dakizuen ez ondorio fotoelektrikoa izan zen; lan horrexegatik eman zioten, hain zuzen, 1921ean Nobel Saria.

Ondorio fotoelektrikoa metal baten gainazala argi ultramorez argizatzen denean gertatzen den elektroi-igorpena da. Metalari darrizkion elektroien energia, metal horrek hartzen duen argiaren intentsitatearekiko independentea da. Argia uhintzat joz gero, jakina, erabat ulertezina zitekeen hori; uhinaren intentsitatea, izan ere, bere baitan daraman energiaren araberakoa bait da.

Einstein-en teoriari jarraituz, ordea, efektu hau ulerterraza da. Metaleko elektroi batek ihes egin dezake bertatik, fotoiak daraman energia bereganatuz. Askaturiko elektroiak daukan energia maximoa ez da inoiz fotoiak ekarritakoaren adinekora izango, elektroia metaletik ateratzeko energia bat behar bait da, metaletik ateratzeko behar den energiari, hain zuzen Φ deritzo.

Fotoelektroiaren energia maximoa honelako formula baten bidez ematen da

$$E_{\text{max}} = h\nu - \Phi \quad (5)$$

Erlazio honek garbi erakusten du ateratako elektroiaren energia ren eta zurgaturiko argiaren intentsitatearen arteko loturarik eza. Argiaren intentsitatea gehitzean bertara sartzen den kuantu-kopurua gehitu egiten da, baina kuantu bakoitzaren energia ez da aldatzen.

Fotoelektroiak duen energia maximo hori zehazki determinatzeko zera egiten da, fotoelektroi bat elektrodo batekin elkartzerak hel ez dadin oztopo gisan jarri behar den V potentzial minimoa neurtu. Potentzial minimo hau izango da, hain zuzen, fotoelektroiak duen energia maximoa.

5. erlazioa ondoko era honetara ere idatz daiteke:

$$v = \left(\frac{h}{e} \right) \nu - \frac{\Phi}{e} \quad (6)$$

Erlazio honetan, e hori elektroien karga da, eta V hori oztopo-potentziala. Potentzial honen balioa bertara sartzen den irradiazioaren maiztasunarekiko irudikatuz, lerro zuzen bat aterako litzateke: lerro horren malda bat eta berdina litzateke, gainazal igorle guztientzat, konstante fundamentalei soilik baliatzen diren (hots, h eta e balioei). Φ lan-funtzioa, bestalde, metal-gainazal bakoitzaren naturaren

menpekoa da. Hona hemen, hortaz, lan-funtzioak adierazten duena: elektroi bat solidoaren barrutik "kanpora" ateratzeko behar den energia. "Kanpora" diodanean, atomoaren neurriaren aldean hantzia, baina kristalaren neurriaren oso txikia den distantzia batez ari naiz noski. Azken urteotararte ez da lortu izan, saiaketa bidezko emaitzak eta lehen Printzipiotik ateratzen diren ondorioak elkarrekin ados jartzea. Bi alderdi garrantzitsu dituzten lan-funtzioak: bata elektrosztatiko hutsa, eta bestea gorputz askoren eraginari dariona: elkaraldaketa eta koerlazioa; lan-funtzioaren balio tipiko bat 4 e.v da.

Robert A. Millikan-ek 1916. an egin zituen saiaketa-lanek betebetean egiaztatu zuten Einstein-en ekuazioa.

1905. ean Einstein-ek ez du berak eta Planck-ek egindako lanen arteko loturarik somatzen. Jabetu ere 1906. ean jabetzen da Planck-ek bere banaketa-legearen bidez

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi \nu^2}{c^3} \frac{h \nu}{e^{h\nu/k_B T} - 1} \quad (7)$$

etenduraren kontzeptua Fisikan da goenekoz sartua zuela. Planck-ek ez zuen etendurari buruzko eraba-

teko garbitasunik eskaini. Hain zuzen ere, kalkuluak burutu ahal izateko sar erazi zuen etendura hori (egia esan, hasiera batean bere formula hori tarteko balioak (interpolazioak alegia) aurkitzeko bidea zuen ("eine glücklich erratene Interpolationsformel") 1900. ean asmatu zituztenean, ez zien bere energi aleei inolako ezaugarri fisikorik aitortu. 1906. ean eraman zituen Einsteinek, azken muturreraino, etendurari buruzko bere ideak, Planck-en liburua sakonki aztertu ondoren.

Planck-ek oszilatzaile harmonikoak erabiltzeko zeukan modua zera zen, ν maiztasuneko oszilatzaile batek $0, h\nu, 2h\nu, \dots, nh$ energiak har zitzaizkeela baieztatzea: hau horrela izanik,

$$E = \frac{h\nu}{e^{h\nu/K_B T} - 1} \quad (8)$$

formulak ematen zuen oszilatzailearen batezbesteko energia. Formula hau klasikoarekin bat egiten da, $\frac{h\nu}{K_B T}$ txikia denean. Guztira honek, Einsteinek argi eta garbi azpimarratzen zuenez, beroa ren teoria zinetikoaren aldakuntza bat zekarren berekin. Berak zioen:

"Oraindainokoa molekulen higidu

ra eta gorputz makroskopioena lege berdinez gobernatuta daudela uste izan da

Maiztasun-muga estu baten barruan bibratzen ari den ioi baten kasuan -energiaren eta materiaren arteko elkarraldaketa gertakizun egiten dutenean hortaz- honek izan ditzakeen egoerak begi hutsez ikusten ditugunak baino askozaz ere mugatuagoak dira".

Eta Einstein-ek honela jarraitzen du

"Planck-en teoria materiaren izanerari badagokio, oraingo teoria zinetiko-molekularraren eta saiakuntza bidezko emaitzen artean kontraesanak aurkituko ditugula segur egon gaitzke; kontraesan horiek era berean garbitu behar dira". Era berean dioenean, jakina, etenduraren kontzeptua erabiliz esan nahi du.

Einstein-ek, beraz, irradiazioari buruzko teoria kuantikoaren beharra ez ezik materiari buruzkoarena ere ikusten du. Berak ezin zuen teoria orokor hori osatu, baina saiakuntzen eta teoria zinetikoaren arteko elkarren aurkako ziren alderdietatik bat argitu bai: honetaz ari da, hain zuzen, 1907ko bere espezifikokiari buruzko idazlan ospetsuan. Estatistika klasikoaren arabera, edozein gairen bero-energiak mol bakoitzeko $3 N_0 K_B T$ izan behar luke (N_0 ho-

ri Avogadroren zenbakia izanik).

Bero espezifikoa temperatura gradu batez aldatzeko gorputz batek behar duen energiaren ara berakoa da. Beraz, klasikoki, bero espezifikoa $3N_O \cdot K_B$ balio du. Hau dugu gaiek tenperatura altu etan betetzen duten Dulong eta Petiten legea. Ordurako gauza ja kina zen gai askok ez zuela tenperatura baxutan Dulong eta Petiten legea betetzen.

Baina bazen horrekin lotuta zegoen beste problema bat, Dulong eta Petiten legearen betetzea baino kezkarriagoa zena. Atomoek barne-egitura bat badaukate, zer delata ez dute elektroiek so lidoaren bero espezifikoa, teoria klasikoak behar lukeenez, bi brazio bakoitzeko K_B -z eskuhartzetzen?.

Hauxe da, funtsean, Boltzmann-ek 1890. ean (beraz kuantu-teoria baino askozaz lehenago) adierazitako paradoxa. Kuantu-teoria iritsi arte ez zen ulertuko, zergatik energia ez den atomoaren barruraino sartzen eta zergatik, azkenik, bertako askatasun-graduak ez dituen zirikatzen.

Weisskopf-en "kuantu-eskailera" izeneko dugu auzi hau ulertu

ahal izateko giltza. Teoria kuantikoak atomo bati emandako energia, maila batetik beherakoa den artean, zatitu ezinezkoa dela esaten digu: beraz, bere barneko askatasun-graduak ez dute inolako eskuhartzerik. Energiak maila bat gainditzen duenean, ordea, atomoa hautsi egiten da, eta nukleoak eta elektroiak bereiztu egiten dira. Honela, kuantu-eskailerak Boltzmann-en paradoxaren aterabidea eskaintzen digu. Materiaren barne-egiturak ez du energiaren elkaraldakuntzan eskuhartzen, energia hori kuantu-eskailerari dagokion mailaraino iristen ez den artean.

Ekipartizio orokorra ezina zena, 1907a baino lehenago ere ezaguna zen. 1900eko Apirilean "Royal Institution in Albermarle Street in London"-en egindako "XIX. mendeko lainoak argiaren eta beroaren teoria dinamikoaren gainean" ("Nineteenth Century Clouds over the dynamical theory of heat and light") delako hitzaldian, Lord Kelvin-ek ekipartizio-printzipioaz ari zen laino horietako batez ziharduenean. Honela zion bertan:

"N₂ nitrogeno gisako atomobidun molekula batez ihardun dezagun. Zer dela eta, bolumen konstantean, mol bakoitzeko bero espezifikoa 5 da eta ez 6?. Hiru errotazio-as-

katasunen mailako bat bazterrean utzi izatearen ondorio ote da? Zergatik ez ditugu atomoen arteko bibrazioak lekarkeen bero espezifikorekiko eraginak somatzen?.

Einstein-ek behin eta betiko ematen du guzti horrentzako atarabidea.

Oszilatzaileak kuantifikaturik baldin badaude 8 ekuazioak ematen digu bakoitzaren batezbesteko energia, $K_B T$ balio klasikoaren ordeztu. Kalkulabideak errazteko, hortaz, oszilatzaile guztiak bata bestearekiko askatasun osoz eta maiztasun bereko ν bibrazioetan daudela jotzen du.

ν maiztasuneko N oszilatzaileen batezbesteko bero-energia honako hau da

$$(\omega = 2\pi\nu, h = \frac{h}{2\pi})$$

$$\frac{3N h \nu}{e^{\frac{h\nu}{K_B T}} - 1} \quad (9)$$

Oszilatzailearen bero-ahalmena honako formula honek ematen digu.

$$C_v = \left(\frac{\partial}{\partial T} \right)_v = 3N K_B \left(\frac{h \nu}{K_B T} \right)^2 \frac{e^{\frac{h\nu}{K_B T}}}{(e^{\frac{h\nu}{K_B T}} - 1)^2} \quad (10)$$

Temperatura altuetan, C_v horrek Dulong eta Petit-en legearen balio

bera ematen du. Temperatura baxuetan, aldiz, C_v temperaturaren alderantzizkoaren exponentzialaren arabera gutxitzen da. Bero-ahalmenari buruzko Einstein-en teoriaren alderdi garrantzitsuena, bestalde, ondoko hau da: Temperatura zerorantz doanean, bero espezifikoa ere zerorantz doala erakusten duela. Exponentzialaren araberrako joera, hala ere, ez da guztiz honelakoa eta, berak aitortzen duenez, bibrazio guztiak maiztasun berdinekoak direla onartzea axalkeria izateari darioke. Gaur, uhin-luzera bata edo beste izatearen arabera, maiztasun desberdina dela badakigu. Uhin-bektorearen eta maiztasunaren arteko erlazioak, kitzikapen-espektroak beraz, bero espezifikoa ateratzeko bidea ematen digu.

Urte askoz, Einstein-ek erradiazioaren alorrean lanean ihardun zuen, 1908tik 1911rarte ekuazio ez-lineal bat aurkitzen saiatu zen, h eta e teoriaran sartu ahal izateko bidea zatekeena. Hortaz, iraitzeko artikulua garrantzigeak salbu bestelako ezer argitaratu ez zuen arren, H.A. Lorentz-ekiko eskutitzen bidez argi dakigu orain urte horietan hortaz egin zuen lan handiaren berri. 1911an, horrela, "... Nire adimena hori lortzeko gauza ez dela dakidalako..." teoria hori mamitu nahia alde batera utzi

Elhuyar, 7, 2, 1981

ta zeukala ziotson Michel Besson bere adiskide handiari, garai hartan egindako eskutitz batean. 1951. ean, berriz ere Besson adiskideari idazten ziolarik, honela zioen:

"Berrogeitamar urteotan nire adimena jo ta ke biraka ibili izanak ez nau kuantuak zer diren ulertzetik hurbildu. Gaur egun edozein Tom, Dick edo Harry-k badakiela uste du, baina oker dabil".

Orduan utzi zuen alde batera Einstein-ek, hain zuzen, orain arte aipatu ditugun gora-behera hauen azterketa, eta bere burua erlatibitatearen teoria orokorrari lotu zion erabat. Dagoenez garbi esan dezakegu saio honetan berak utzi dizkigun ikerlanek ororako zertarainoko garrantzia izan duten. Hemen U.E.Un, artistarik ere falta ez den honetan, azpimarra dezagun Erlatibitatearen Teoria Orokorra askoren ustez izadiaren artelanik bikainena dela. 1916. an, Einsteinek irradiazioaren auziari ekin zion berriz. Böhr-en materiaren egitura kuantikoari buruzko teoria lanabes izanik, modu berri eta berezi batez atera zuen Planck-en banaketa-legea. Kasu horretan erradiazioaren sortzeari eta zurgatzeari buruzko eritzi estatistikoak

ditu oinarri. Idazlan honetan igorpen estimulatua-ren idea sartu zuen batzuren ustez, hori da LASERaren lehen oinarria. Einstein-en beraren ustez, erradiazioaren norabide definitua egiaztatua izatea da idazlan horrek eskaintzen duen aurrerabiderik garrantzitsuena. Horren saiketen bidezko egiaztapena handik urte batzutura, 1923an hain zuzen, heldu zen, Compton efektua-ren elektroi asketan eginiko talka barreiatuen (edo scattering-aren) bidez X izpien uhin-luzeraren gehitzea ikus terakoan.

1924ean, erradiazioa gas kuantiko gisa zerabilen Bose-ren idazlan bat eskuratu zuen. Horretazko ahaleginak ere eginak ziren, baina gasa ohiko modu estatistikoez aztertuz gero, Wien-en banaketa-legea aurkitzen zen, Planck-enaren ordean. Egoerak zenbatzeko modu estatistikoak aldatuz gero, Planck-en legea aurkitzen da. Bose-Einstein-en gasa deritzo orain gas horri.

Garai hartan, Einstein-ek berehala antzeman zion de Broglie-ren ideak daukan garrantziari: hots, Einstein-ek berak erradiazioari atxekitako uhin-partikula bikoiztasun hura materiara ere hedatzea. 1927. ean, Davisson eta Germer-ek nikeluzko gainazal baten elektroiak isladatuz egindako saio batean garbi azaltzen du elektroiaren uhin-

-izakera. Aldi berean G.P. Thomson eta A. Read-ek elektroiak metalezko xafla batean zehar igaroerazteko sai^oak egin zituzten, eta sa^o io horiek uhineⁱ dagozkien difrakziozko irudiak eta espek^troak ematen zituzten. Lan horien kausaz, Davisson eta Thomson-i Nobel Saria eman zieten erdibana, 1937. ean.

Kuantu-teoria mamitzen hainbeste eskuhartu zuen arren, Kop^enhave-ko interpretazioa edo adierazpidea deritzon teoria kuantikoaren azken bildumari uko egin zion Einstein-ek. Erraldoi arteko eztabaida sonatu batean, 1927an izandeko Solvay batzarretan, Mekanika kuantikoaren barne-logikaren desegokitasuna erakusten saⁱatu zen. Bohr-ek bere arrazoiak hankaz gora bota zituen, Einstein-en berberaren teoriez baliatuz. 1935ean kuantu-teoriaren beste alderdi bati eraso zion, fisikaren errealitatearen edo berezko tasunaren alderdi batzu ez zituela hartzen eta teoriaren oso tasun-ezaren salakuntza eginez. B^ohr-ek berezko tasunari heltzen zion bere erantzunean. Atsegin litzaidake B^ohr-en arrazoiak eta beste aldetik Einstein, Polodsky eta Rosen-en paradoxa daramatenak aztertzea. Astirik ez eta, batez ere ezagutzarik ezak eragozten didate hori egitea. Bego, beraz, gure filosofoen-

tzat sakontzeko aztergaitzat. Filosofoak lan horri berehala ekin dakioten, Kop^enhave-ko adierazpideko zati batzurekin bukatuko dut hitzaldi hau. 1927eko Solvay bilkuran B^ohr-ek eta Heisenberg-ek honako hau aldarrikatzen dute.

"Mekanika kuantikoak gertaeren batezbesteko berri zehatzak ematen dizkigu, baina gertaera bakoitzarekiko ez digu inolako berriarik eskaintzen. Gaur arte zientzia zehatzen oinarritzat jo izan den determinismoa itxi egin behar da" eta erronka honekin bukatzen dute.

"Mekanika kuantikoa teoria oso bat dela eta bere oinarri fisikoak eta matematikoak ukaezinak dira, diogu goraki".

Are gehiago, horientzat determinismoa ez da azken irizpiderik onena. Bohr-ek 1945. ean Nobel Saria onartzean egindako hitzaldian, hori bera errepikatzen du:

"Fisika klasikoaren determinismoa kuantu logiko-matematikoen gaineritzez sortutako ameskeria da. Jainkoizun bat da, ez naturazien azken-helburu; eta ezin da beraz ezinbestean indeterminista den Mekanika kuantikoaren estatistikazko ikuspegiaren kontraketat hartu".

Horien parean laburki adieraz ditzakegu Einstein-en gogoetak:

"Mekanika kuantikoari begirunea zor zaio... baina barne-muinetik abots batek osoko erantzuna ez dela diost. Joinkoa ez da izadiarekin zozketan ari".

Aurtengo Einstein saria Hawking-i emana izan zaio zulo beltzekiko erlatibitatearen teoria orokorrari buruzko bere lanengatik. Zertxobait paradoxazkoa badirudi ere, Hawking-ek "zulo beltzen kuantu-mekanika" lanean honako hau adierazten du.

"Dirudienez, beraz, birritan hutsegin zuen Einsteinek Jainkoak tortolosean jolasten ez duela esaterakoan". Zulo beltzetatik jalgiazarazitako zatikiei buruzko iker

ketek honako uste honetara garamatza: Jainkoak tortolosean jokatuz ezezik, zenbaitetan, gainera, tortolosak inork ikus ez ditzakeen tokira botatzen dituela.

Bukatzeko, honako hau esan dezakegu. Einstein-ek erlatibitatearen teoria gauzatu eta zabaltsun orokorria emateko egin zituen lanek gainerako guztiak ilundu badituzte ere, haren lan osoa eza gutzen duen edozein eta espero dut zuek ere orain horien artean zaudetela, bat etorriko litzateke Max Böhr-ek esandako honekin:

"Nere ustez, inoiz izan den fisika karrikan handienetakoa izango litzateke Einstein, erlatibitateari buruz ezertxi idatzi izan ez balu ere".

(1) Pedro Etxenikek, VII. Udako Euskal Unibertsitatean Einstein-en mende urren zela eta, emandako hitzaldiaren transkripzioa da idazlan hau