

# Claude Cohen-Tannoudji profesorea Zientzia eta Teknologia Fakultatean

*Ion Lizuain, Jacinto Iturbe, Gonzalo Muga*

Kimika Fisikoa Saila (UPV/EHU)

**Laburpena:** 1936. urtean sortu eta handik hilabete gutxira Gerra Zibilagatik itxi zen lehenbiziko euskal unibertsitate publikoa: Euzko Irakastola Nagusia zuen izena, eta unibertsitate hartako medikuntzako euskara (*sendakintz-euzkera*) irakasten zuen Jose Zinkunegi medikuaz, haren obraz eta haren euskaraz dihardu lan honek. Gaur egungo Euskal Herriko Unibertsitatea eta Euskara Teknikoa irakasgaia 1936ko unibertsitate haren eta irakasgai haren oinordeko dira, hurrenez hurren, eta haiei eta Iñaki Ugarteburu Gastañares zenari egin nahi diegun omenaldi gisa ulertu behar da hitzaldi hau.

**Abstract:** The first public Basque university (*Euzko Irakastola Nagusia*) was founded in 1936 and closed a few months later due to the outbreak of the Spanish Civil War. This talk focuses on the writings and language of M.D. Jose Zinkunegi, who taught Basque for medical purposes (*sendakintz-euzkera*) at this first Basque university. The current academic subject of Technical Basque and the University of the Basque Country of today both descend from those pre-war origins, and hence this talk would also want to pay homage to our predecessors and to Iñaki Ugarteburu Gastañares.

## SARRERA

2011ko urtarrilaren 13an eta 14an Claude Cohen-Tannoudji Irakasleak hitzaldi sorta bat eman zuen Euskal Herriko Unibertsitatearen Zientzia eta Teknologia Fakultatean.

Hona hemen berriz Cohen-Tannoudji Irakaslearen profila, Kimika Fisikoa Saileko Gonzalo Muga Katedradunak eman zuen aurkezpenean.

Ez da izan hau Cohen-Tannoudji jaunak gure artera egindako lehen bisitaldia, eta horrek emandako konfiantzaz baliatuta, baimena eskatu genion entzulego zabal baterako egindako hitzaldia hona ekartzeko, eta berak eskuzabal onartu zigun.

Horrekin batera, elkarrizketa labur bat egin genion, eta hori ere hona ekarri dugu. Galderak Jacinto Iturbek egin bazituen ere, transkripzioa Ion Lizuainena izan da.

\* \* \*

## AURKEZPENA

Datorren ikasturtean abian jarriko da Zientzia eta Teknologia izeneko Master berri bat eta, horren kariaz, gure taldea hasi da jarduera-plangintza bat garatzen, eta era berean, hitzaldi batzuk ematen mundu kuantikoaren inguruan.

Master honen programaren jarduerari hasiera emateko ez dago modu hoberik Claude Cohen-Tannoudji profesorearekin baino. Claude Cohen-Tannoudji irakaslea funtsezko ikertzailea da Mekanika Kuantiko modernoaren eta Fisika Atomikoaren arloan. École Normal delakoan eginiko doktoratze-tesirako lanetik abiatuta, berak moldatu eta eraldatu du argiaren eta materiaren arteko elkarrekintzaren inguruan 1962 aurretik genuen eza-gumendua. Izan ere, ponpatze optikoaren inguruan aritu zen bere lan goiztiar horretan, eta argi ezerrosantez argiztaturiko atomoen mailen aldaketak aurkitu eta neurtu zituen; argi-desplazamendu deritzenak. Jean Brossel eta Alfred Kastler izan ziren tesi lanaren zuzendariak; Kastlerrek 1966ko Fisikako Nobel Saria jaso zuen.

Bere Doktorego gradua lortu ondoren, lanean jarraitu zuen zientzia-ikertzaile moduan INSan, eta,aldi berean, Pariseko Unibertsitatean irakasle gisan aritu zen, 1964-1973 tartean, eta Collège de France delakoan 1973tik aurrera.

Egitan, irakaskuntza izan da, era batean edo bestean, bere karreraren funtsezko pizgarria eta indar bultzatzailea. Ez du inoiz azaleko eza-gumendua ase, eta etengabeko ahaleginetan aritu da oinarrizko fenomenoak sakonean ulertzeko. Itaunei erantzun bat eman beharrak ideia berrietara eramandu Kastler, eta urtero Collège de Francen emandako ikastaroetan zerbait berri eskaintzeko ahaleginetik atera da bere ikerkuntzaren emaitzen zatirik handiena.

Hona hemen Pariseko Unibertsitatean egindako bere irakaskuntzaren emaitza bat: *Mekanika Kuantikoaz* egindako liburua (*Mécanique quantique*), Bernard Diurekin eta Franck Laloë-rekin eginda, mundu osoko ikasleentzat eta ikerlariarentzat funtsezko erreferentzia dena.

Bere ibilibidean are garrantzitsugoa den beste osagai bat nabari da: doktoregaiak eta laguntzaileak motibatze eta beraiekin elkarrekintzan aritzeko trebetasuna. Hainbat liburu idatzi ditu haiekin, eta bereziki aipatu nahi nuke bere azken lana: *Advances on Atomic Physics. An Overview*, David Guery-Olelinekin eginda, eta hemendik gutxira argitaratuko dena. Orainsura arte pentsatzen zen Fisika Atomikoa itxitako gai borobila zela, baina azken bolada honetan Fisikaren arlo aktiboenetariko eta kitzikagarrienetariko bat bilakatu da. Berez, liburu berri honetan aukera izango duzue arloko aurkikuntza eta aplikazio hunkigarrien berri hartzeko.



Gonzalo Muga, Ion Lizuain, Cohen-Tannoudji, Jacinto Iturbe

Cohen-Tannoudji Irakaslea Profesorea nazioartean goraiatua eta txalotua da, eta beste sari ohregarri askoren artean, 1997ko Nobel Saria partekatu zuen Stefen Churekin eta William Phillipsekin, atomoak hozteko eta harrapatze metodoetan egindako aurrerapenengatik.

Bere lanak itzel eragin dio oinarrizko ikerkuntzari, eta jadanik, hobekuntzak lortu dira erloju atomikoen doikuntzan, inferferometroetan eta neurgailuetan. Esan beharrekoa da Cohen-Tannoudji irakasleak bere gizaki xalo eta hurbila izate horretan jarraitzen duela beti ere, hainbeste aurrerapen eta ezagumendu lortu baditu ere. Berak irmoki sinesten du praktikara eraman duen ideia honetan: oinarrizko zientziak laguntzen du gure munduaren ikusmoldea hobetzen, baina horretaz gain, gure gizartearen arazo nagusiak konpontzeko edo behintzat arintzeko erabili behar da.

Besterik gabe, Cohen-Tannoudji Profesorearen hitzaldia.

*Gonzalo Muga*

Kimika Fiskoa Saila EHU

\* \* \*

## ATOMO ULTRA-HOTZAK ETA ERLOJU ATOMIKOAK

### 1. Sarrera

Denboraren neurketa, oinarrizko fisika eta fisika aplikatuaren erdi-bidean dagoen gai baten adibide oso ona dugu. Atomo hotzetan oinarriturik dauden erloju atomikoen garapenak, izugarriko aurrerapenak ekarri ditu azken hamarkadetan. Gai honen ikuspegi orokor bat eskaintzea gustatuko litzaidake gaur.

Denboraren neurketak,  $\nu$  frekuentzia (edo  $T = 1/\nu$  periodoa) duten fenomeno periodikoen behaketan du oinarria. Fenomeno periodiko desberdinak erabili dira historian zehar denbora neurtzeko: Lurraren biraketa eguzkiaren inguruan edo bere ardatzaren inguruan, penduluak, sakela-erlojuek dauden kuartzo osziladoreak, etab. Gaur egun, atomo baten bi egoera kuantiko (a eta b egoerak) lotzen dituen trantsizio atomikoak erabiliz lorzen dira denboraren neurketa zehatzenak. Bohren formularen arabera, bi egoera kuantiko horien arteko energia-diferentzia  $E_b - E_a = h\nu_A$  izango da,  $h$  Plancken konstantea izanik, eta  $\nu_A$  trantsizio atomikoa definitzen duen frekuentzia.

Denboraren nazioarteko unitatea, segundoa alegia, Cs atomo baten oinarrizko egoerari dagokion bi azpiegoera desberdin lotzen dituen trantsizio jakin baten oszilazio kopuru jakin bat bezala definitzen da. Zehazki, segundo bat, Cs atomoaren  $F = 3$  eta  $F = 4$  energia maila hiperfinen arteko 9 192 631 770 oszilazioek irauten duten denbora besterik ez da. Atomoak sistema unibertsalak izatea da trantsizio atomikoetan oinarriturik dagoen definizioaren abantailarik nabarmena. Cs atomoak berdinak dira edonon, Bilbon, New Yorken edo Parisen. Baina, nola eraiki dezakegu atomo-trantsizio maiztasun jakin batekin oszilaten duen aparatua?

Erloju atomiko baten oinarrizko funtzionamendua 1 irudian erakusten da. Har dezagun  $\omega_0$  frekuentzia duen osziladore bat, kuartzo-osziladore bat esate baterako. Hainbat faktoreren eraginez (tenperaturaren eraginez adibidez), osziladore horren frekuentzia ez da beti berdina izango. Frekuentzia hau aldatuz, trantsizio atomikoaren frekuentziaren inguruan eskanea dezakegu. Era honetara, gure osziladorearen frekuentzia eta trantsizio atomikoaren frekuentzia konpara ditzakegu, erresonantzia-kurban oinarriz. Ziklo ugariaren ondoren, osziladorearen frekuentzia zuzentzen da, atomo-trantsizioaren frekuentzia berberetara izan arte, denboran zehar konstante mantenduz. Beste era batean esanda, kuartzo-osziladorearen frekuentzia, atomo-erresonantzia erdian blokeatu dugu. Horixe da erloju atomiko bat: atomo-trantsizio batek zehaztutako frekuentzia duen osziladore bat.

Baina noski, fisikan edozein erresonantziak  $\Delta\omega$  zabalera du. Argi dago orduan, zenbat eta erresonantzia-lerroak estuagoak izan, orduan erlojuak

zehatzagoak izango direla, zeren erresonantziaren zentroan egindako blokeoa hobea izango baita. Hemen, denbora-energia ziurgabetasunaren printzipio kuantikoa dugu aurrez aurre: erresonantziaren  $\Delta\omega$  zabalera, behaketa-denborarekiko alderantziz proportzionala izango da. Sistema kuantikoa zenbat eta denbora luzeagoan behatu, orduan eta erresonantzia-lerro estuagoak lortuko ditugu.

Erlojuen zehaztasuna hobetu nahi badugu beraz, komenigarria izango da elkarrekintza-denbora luzatzea, erresonantzia-lerroa estutuko baita. Horregatik, atomo hotzak erabiltzen ditugu erloju atomikoak egiteko: inguruko tenperaturaren dauden atomoen abiadurarekin erkatuz ( $\sim 1$  km/h) oso abiadura baxuak dituzte atomo hotzek ( $\sim 1$  mm/h). Atomo motel hauek, denbora gehiago egongo dira behaketa-eremuaren barnean erresonantzia-lerroa estutuz eta, azken finean, erlojuaren zehaztasuna handituz.

## 2. Erloju atomiko arruntak

Erloju atomiko arruntenak duela 50 urte inguru asmatu ziren, eta gaur egun oraindik erabiltzen dira mundu osoko laborategi metrologikoetan. Haien funtzionamendua oso bakuna da: Cs atomo sorta bat bero dagoen labe batetik ateratzen dira eta bere bidean  $\omega_0$  frekuentzia duen mikrouhin-kabitate bat zeharkatzen dute. Atomoen abiadura  $v$ , eta kabitatearen luzera  $l$  direla suposatzen badugu, atomoen eta mikrouhinaren arteko elkarrekintza-denbora  $\tau = l/v$  izango da. Egoera hautatzen duen (Stern-Gerlach) aparatu baten bidez,  $F = 3$  egoera duten atomoak hautatzen ditugu kabitateara sartu baino lehen, eta irteeran  $F = 4$  egoeran amaitzeko duten probabilitatea  $\omega_0$ -ren funtzioz neurtzen dugu.

Atomoek, kabitatean dauden bitartean,  $\omega_0$  duen eremu elektromagnetikoa ikusiko dute. Hasierako  $F = 3$  egoeratik  $F = 4$  egoeran amaitzeko probabilitatea, erraz kalkula daiteke perturbazio aldakorren teoria erabiliz. Trantsizio-probabilitate hau,  $\omega_0$ -ren funtzioz irudikatzen badugu, frekuentzia atomikoan zentratutako dagoen kurba bat lortuko dugu, kurbaren zabalera, atomoak kabitatearen barnean egon diren denborarekiko alderantziz proportzionala izango delarik. Hau, lehenago aipaturiko denbora-energia ziurgabetasun-erlazioa besterik ez da.

Mikrouhinaren kabitateek zentimetro gutxi batzuetako luzera izaten dute normalean. Labetik ateratzen diren atomoen abiadura 300 m/s-koa baldin bada, elkarrekintza denbora  $10^{-4}$  s ingurukoa izango dugu. Denbora hau luzatzeko, gero eta kabitate erresonante luzeagoak egitea pentsa dezakegu, baina hau teknikoki oso gauza zaila da. Norman Ramsey fisikariak, kabitate bakar bat erabili beharrean,  $l$  luzera bereko bi kabitate erabiltzea proposatu zuen, kabitateen arteko distantzia  $L$  izanik ( $L \gg l$ ) Lehen egin dugun bezala,  $a$  egoera batetik  $b$  egoera desberdin batera joateko trantsi-

zio-probabilitatea kalkulatzeko baldin badugu, (bi elkarrekintzak koherenteak direla suposatuz), kurbaren egitura interferentzia-zerrenda batzuk agertuko dira, Ramsey zerrendak hain zuzen ere. Interferentzia-zerrenda hauen zabalera oraingoan  $T$ -rekiko alderantziz proportzionala izango da ( $T = L/v$ , bi barrunbeen arteko hegaldi-denbora izanik) eta ez  $\tau = l/v$ -arekiko aurreko kasuan bezala. Era honetan, zabalera txikiago duen kurba bat lortu dugu, bi kabitaten arteko distantzia, kabitate bakoitzaren luzera baino askoz handiagoa baita:  $L \gg l$ . Bi kabitate erabiliz, beraz, erlojuaren zehaztasuna  $T/\tau$  aldiz hobetu dugu. Ramsey zerrenden agerpena, optika arruntarekin duen parekotasuna aztertuz erraz uler dezakegu. Zirrikitu bakar bat erabiliz difrakzio-esperimentu bat egiten badugu, difrakzio-profilaren zabalera, zirrikituaren zabalerearekiko alderantziz proportzionala izango dela ikusiko dugu. Baina bi zirrikitu erabiltzen baditugu, difrakzio-profilean Young difrakzio-zerrendak agertuko dira, beraien zabalera bi zirrikituen arteko distantziarekiko alderantziz proportzionala izanik. Parekotasun hau, Fourier transformatuaren ezaugarri bat besterik ez da: optikan, espazioarekiko Fourier transformatua egin dugun bitartean, gure problemaren, denborarekiko Fourier transformatua egin dugu, baina, azken finean, fenomeno berbera da.

Bi kabitateak  $L = 1$  m-ko distantziara badaude eta kabitate bakoitzaren luzera  $l = 3$  cm-koa bada, erlojuaren zehaztasuna  $L/l$  faktoreaz hobetu dugu, bi magnitude-ordena inguruko hobekuntza alegia.

Hobekuntza nabarmen hau oso ona da, baina erlojuaren zehaztasuna are gehiago hobetzeko,  $T = L/v$  faktorea handitzea gustatuko litzaiguke. Horretarako, praktikoak ez diren erloju gero eta handiagoak egin beharrean ( $L$  handituz), atomo motelagoak (hotzagoak) erabiliko ditugu ( $v$  txikituz).

### **3. Atomo hotzetan oinarrituriko erloju atomikoak**

Atomo sorta horizontal bat laserren bidez gelditzen saiatzen bagara, atomoak, grabitatearen eraginez, beren ibilbide horizontaletik aldentuko dira. Horregatik, atomo hotzekin erloju atomikoak egiteko, sorta horizontalak erabili beharrean, sorta bertikalak erabiltzen dira. Argi-pultsu baten bidez, goranzko bultzada bat ematen zaie alde aurretik hozturiko atomoei. Era honetan, lerro zuzen berberean gorantz eta beherantz egiten duten atomoak ditugu. Horixe da «iturri» atomiko bat. Era honetako erlojuetan kabitate bakarra erabiltzen da: atomoak, kabitatea goranzko bidean zeharkatuko dute behin, eta beste behin beheranzko bidean. Iturriaren altuera  $H$  dela jakinik eta erorketa askearen formula erabiliz, erraz kalkula dezakegu bi zeharkaldiren arteko denbora tartea  $T = 2\sqrt{2H/g}$  dela.  $H = 30$  cm eta  $g = 10$  m/s<sup>2</sup> balioak hartuz,  $T = 0,5$  s-ko denbora lortzen da, Ramsey eskeema arruntarekin alderatuz 100eko faktorea irabaziz.

Adibide bezala, Steve Chu Stanfordeko Unibertsitatean eraikitako sodio-iturri atomikoa edo Parisen, Christophe Salomon eta André Claironen laborategian dagoen zesio-iturri atomikoa aipa ditzakegu. Azken honetan, hertz gutxi batzuetako zabalera duten Ramsey interferentzia-zerrendak neurtzen dira,  $10^{-16}$ -ko egonkortasun erlatiboa eta  $3 \times 10^{-16}$ -ko zehaztasun erlatiboa dituen erlojua lortuz. Horrelako erloju batek 300 milioi urtez funtzionatzen egongo balitz, segundo bakar bateko desfasea izango luke.

Zehaztasun maila hauei buruz hitz egiten dugunean, errorerik txikienak ere eragin handia izango du erlojuaren zehaztasunean. Arreta handia jarri beharko diogu beraz edozein errore-iturri posibleri. Efektu kuantiko polit batek eragindakoa errore bati buruz hitz egingo dut orain, Projekzio Kuantikoaren Zarata (QPN, Quantum Projection Noise ingelesez)

Baldin badituzu  $N$  atomo independente tresnaren edo aparatuan zehar igarotzen, estatistikan jakina da batez besteko balioa eta bariantza independenteki gehitzen direla. Batez besteko balioa  $\langle S \rangle = N |\alpha|^2$  da, eta bariantza  $(\Delta S)^2 = N(\Delta S)^2 = N |\alpha|^2(1 - |\alpha|^2)$  da. Ikusten denez, seinale/zarata erlazioa —erlazio hau  $\langle S \rangle / (\Delta S)$  moduan definitzen da—  $N^{1/2}$ -aren portzionala da (diapositiban akats bat dago  $N^{-1/2}$  jartzen duen tokian,  $N^{1/2}$  jarri beharko luke; seinale/zarata erlazioa izango da, noski,  $N^{1/2}$ -aren portzionala).

Beraz, neurketa-prozesuaren izaera diskretuaren kausaz, neurtutako kantitatean zabalkuntza bat, hau da dispertsio bat agertzen da batez besteko balioaren inguruan, eta zabalkuntza hori handiagotu egiten da  $N^{1/2}$ -arekin, eta, bitartean, batez besteko balioa handiagotu egiten da Narekin; ondorioz, seinale/zarata erlazioa  $N^{1/2}$ -arekin handiagotzen da. Zarata hau, funtsezko zarata da, eta ondo bereizi behar da beste edozein zaratatik, hala nola desarra-zaratatik edo beste edozein zarata teknikit. Noski, batzuek iradokitzen dute squeezed states izenekoak izan litezkeela kabitatega gurutzatzen duten  $N$  atomoen egoerak; bertan, fluktuazioak, hots, bariantza, gutxitu egiten dira efektu kuantikoen kausaz. Hau ikerketa-lerro oso interesgarria da, informazio kuantikoarekin eta antzeko gauzekin lotua.

Funtsezko zarata hau Parisen neurtu dute C. Salomon eta A. Clairon-en taldekoek, eta behatu dute nola zarata, hots, QPNa,  $1/N^{1/2}$ -arekin aldatzen den. Beraz, ikusten da nola seinale on bat lortzeko behar-beharrezkoa dela sorta intentsu bat, atomo asko eta askorekin, bestela, baldin eta soilik baldin 1 atomo baduzu, orduan 1 edo 0 lortzen duzu, eta hori ez da ona. Baina atomo asko hartzen badituzu, QPNa gutxitu egiten da noski, baina, bestalde, sortan bertan gertatzen diren talkekiko sentibera izaten hasten zara, eta frekuentziaren desplazamendu kolisionala gertatzen da.

Fenomeno hau, gorago aipatu den talde berak aztertu du. Ziurgabetasuna, atomo kopuruaren funtziopean irudikatuz, diapositiban ikusten

den moduko kurba bat lortzen da. Horrek erakusten du nola lerroaren desplazamendu bat lortzen den atomo-atomo kolisioen kausaz, eta desplazamendu hori atomo kopuruaren proportzionala da. Beraz, erlojuaren frekuentzia neurtu nahi bada, estrapolatu egin behar da intentsitatea zero den punturaino.

Pariseko taldeak, Cs iturriaz gain, Rb iturri bat ere eraiki du, eta izugarri harritu ziren ondokoa ikusi zutenean: baldin eta Cs-aren kolisio-desplazamendua erkatzen bada Rb-aren kolisio-desplazamenduarekin (eta hainbat teoria-lanekin konparatuta), ikusten da, Rb-aren desplazamendua Cs-aren desplazamendua baino ehun bat aldiz txikiagoa dela. Beraz, egun denbora definitzeko atomoen bat aukeratu beharko bagenu, ez genuke Cs-a aukeratu, Rb-a aukeratu genuke, zeren Rb-a sentsibilitate gutxiagokoa da kolisio-desplazamenduarekiko. Honen arrazoia, Rb atomoaren energia mailen egitura da, eta kasu honetan kolisioak garrantzi gutxiagokoak dira Rb-rako Cs-rako baino. Baina Cs-a aukeratu zen zeren haren trantsizio hiperfina Rb-aren trantsizio hirperfina baino bi aldiz handiagoa baita, eta hobe da frekuentzia altua izatea, horrela erresonantziaren Q faktorea handiagoa izateko. Arrazoi horregatik Cs-a aukeratu zuten Rb-aren ordeztu, baina orain agerian geratu da oker bat izan zela Rb-a ez aukeratzea.

#### **4. Erloju atomikoak espazioan**

Orain, badakizue, fisikariak ez daude sekula pozik. Beti nahi dute aurrerago joan, urrutirago. Noski, iturri altuak, gero eta altuagoak, izatea da ideia. 1 m-ko iturria izatea baino, 10 m-ko iturri bat izatea. Baina, orduan, sistema osoa eremu magnetikotik babestu egin beharko duzu 10 m-an zehar, eta horrek ez du zentzurik. Orduan, hurrengo ideia zera da, grabitatea saihestea, grabitatetik askatzea, hots, espaziora joatea.

Horrela, Parisen hainbat kide egon dira lanean mikrograbitatean, grabitatea baztertuta. Tira, beste modu bat egon daiteke, hots, erlojua dorre altu batean jarri, eta erorketa askean utzi, eta erorketa aske horretan denbora neurtu, baina, noski, erlojua hautsi egingo litzateke behea jotzerakoan. Beraz, hobe da mikrograbitate-esperimentuak hegazkinetan egitea. Kontua da hegazkin bat edo jet bat hartu, esate baterako Airbus bat; bertan 10 eta 20 talde inguru dituzu. Pilotuak hegazkina goranzko fase batean jartzen du, eta denbora une batean, motorrak amatatu egiten ditu, eta hegazkinak jarraitu egiten du erorketa libre batean, parabola bat deskribatuz; noski, lurrraren kontra kolpatu baino lehen, motorrak berriro martxan jartzen ditu. Gero, bigarren parabola bat, eta beste bat, eta horrela segitzen da. Parabola bakoitzak 20 bat segundo irauten du. Prozedura honekin grabitatea 100eko faktore batez gutxitzen da. Diapositiban ikusten da nola egiten dituen esperimentuak atomo hotzen taldeak, beste talde batzuekin: biologoak, kimikariak,... Ni ez ninduten onartu zaharregia naizelako. Desatsegina izan



daiteke zorabiatu egiten bazara, zeren hegaldiak 2 ordu irauten baitu, eta 20 bat parabola egiten dira.

Esperimentu horrek frogatu zuen nola funtziona dezakeen atomo hotzen erloju batek mikrograbitateko egoera batean. Laserrak egonkor mantentzen dira, eta beraz, blokeoa (locking) ere egin dezakezu. Proiektu hau PHARAO deitu zen, ez faraonikoa zelako baizik eta proiektuaren izena «Project d'Horloge Atomic par Refroidissement d'Atome en Orbite» zela-ko (Erloju atomikoaren proiektua Atomoen hozketaren bidekoa).

Emaitzak eman ditzadan orain. Diapositibaren goiko aldean, Ramsey interferentzia-zerrendak agertzen dira sorta termikoekin ( $v = 100$  m/s), elkarrekintza-denbora  $T = 5$  ms, eta zabalera 100 Hz. Erdian, iturri bat egiten denean, erabiltzen den abiadura 4 m/s-koa da, elkarrekintza-denbora 0,5 s, eta zabalera, 1 Hz. Behean, PHARAO proiektuan, elkarrekintza-denbora 0,5 s-tik 5 s-ra igotzen da, eta zabalera, 0,1 Hz. Ikusten denez, 1000ko faktore bat irabazten da. Ikusi ahal duzue, halaber, nola aurrerakuntza teknologikoei emaitzak hobetu egiten dituzten.

Oraintsu, CNES (Centre National d'études Spatiales) eta ESA (European Space Agency) erakundeek esperimentu bat onartu dute, eta hainbat zailtasun gainditu ondoren (garestia delako, noski), 2013an edo 2014an hegaldutako da, espero dugu, shuttlean, transbordadore espazialean, ISSraino, nazioarteko estazio espazialeraino. Estazio espazialean atomo hotzen erloju bat izango dugu, hidrogeno-maser bat mundu guztian zehar denbora definitzeko, munduko erloju guziak sinkronizatuz. Diapositiban ikusten da tresnaren eskema bat, 50 cm ingurukoa. Bertan ikusten dira selekzio-tresna, prestakuntza-zonaldea, detekzio-zonaldea,...

Hau da estazio espazialaren irudi bat, esperimentu-egileen tamaina agerian uzten duena. Tresnaren pisua 227 kg ingurukoa da, eta 450 W-ko potentzia behar du. Tresna hau oso interesgarria da zeren eta GPS satelite guztien erloju guztiak erloju espazialarekin sinkronizatuko baitira.

## **5. Erloju atomikoen aplikazioak**

Tira, eta zeintzuk dira erloju hauen aplikazio praktikoak? Noski, aplikazio praktiko ugari dituzte. Lehendabizi, badakizue oso garrantzitsua dela abiadura handiko internet izatea eta datuen fluxu osoa sinkronizatzea sarearen zehar, eta horrek denborizazio oso zehatza eskatzen du. Zehaztasuna behar duzuen guztietan, erlojuak beharko dituzue. Beraz, denborizazio oso zehatza beharko duzue seinaleak sarearen adar desberdinen artean bidertzeko. Aplikazioen beste adibide bat da oinarri luzeko interferometria: urrutiko bi galaxiatatik edo bi izarretatik argia hartzen duzu, edo mikrouhinak, edo irratihuinak; interferometria egiteko usu beharko dituzu bi detektore bi kontinente desberdinetan eta interferometria egiten duzu, Hanbury Brown

eta Twiss efektua baliatuz, esaterako; horretarako erloju oso prezisoak beharko dituzu. Eta, noski, GPS aipatu eta honen bidez, edonork dakien moduan, triangulazioz, kokapen zehatza jakin daiteke; eta oso hedatuta dagoena, edozein auto modernok baduela. Beraz, denboraren zehaztasunean hobekuntzak lortzen badituzu, orduan, zehaztasun handiagoa egingo da Lurrazalaren zein puntutan zauden jakiteko unean.

Baina badaude oinarrizko aplikazioak ere, oinarrizko saio edo probak. Hona hemen bat: Einsteinek auresandako desplazamendu grabitazionala (Erlatibitate Orokorren Teoria). Einsteinek auresan zuen ezen baldin eta bi erloju hartzen badira Lurraren eremuan eta haien altueraren diferentzia  $\delta z$  bada, erlojuen frekuentzietan behatuko den bariazio erlatiboa,  $\delta\omega/\omega$ , hau izango zela:  $g\delta z/c^2$ , non  $g$ , grabitatearen azelerazioa baita, eta  $c$ , argiaren abiadura. Baldin eta formula horretan jartzen baduzu  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ;  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$  eta  $\delta z = 1 \text{ m}$ , orduan  $\delta\omega/\omega = 10^{-16}$  izango litzateke. Eta horrek esan nahiko luke, gaur eguneko erlojuaren zehaztasunarekin, erlojuja gai izango litzatekeela altuera berdinean ez dauden bi erloju bereizten, altuera diferentzia 1 m denean. Honek gogora ekartzen dit Poundek eta Rebekak berrogeitamargarrenetan egindako esperimendu ospetsua, Mossbauer efektuan oinarrituta. Igorlea eta hartzailea, Harvardeko dorrean, 25 m aldentuta, Einsteinen desplazamendu gorria behatu zuten. Bestalde, beste ikertzaile batzuek erloju bat bidali zuten kohete batean eragin grabitazionala erloju horretan neurtzeko. Baina orain, atomo hotzen erlojuetan oinarrituta, baldin eta erloju bat Lurrean badago, eta beste bat espazioan, estazio espazialean, lurrazalaren gainean 400 km-ra orbitatzen, orduan  $\delta\omega/\omega = 4 \times 10^{-11}$ , eta espero dugu Einsteinen formula egiaztatzeko gai izatea, aurreko probetan baino 70 aldiz zehatzago. Ez dut astirik eztabaidatzeko zein eskema den onena, interferometroa ala erlojuja. Uste dugu erlojuja hobe dela, baina eztabaidak oraindik bizirik dirau. Espero dugu hegaldian doan atomo hotzen erlojuak aipatutako zehaztasunezko neurketa egitea ahalbidetuko dutela.

Beste aplikazio bat, hasiera batean espero ez zitekeena, zera litzateke, gure planetan, potentzial grabitazionalak balio konstantea duen gainazala finkatzea, 1 metroko zehaztasunarekin. Gainazal hori, potentzial berdineko gainazala, geotide deitzen da. Hori interesgarria litzateke, zeren eta horrekin Lurraren barne egitura gaineko informazioa lortuko baikenuke: Lurraren Zientzietan eragingo luke aplikazio honek.

Hona hemen beste aplikazio oinarrizko bat: egiaztatzea ea oinarrizko konstanteak benetan konstanteak diren ala ez. Hainbat teoria kosmologikoetan aurreikusten da egitura finarena bezalako konstante batzuk aldatu egiten direla. Eta hori egiaztatzeko, hartzen dira bi erloju desberdin, eta jakina denez, erlatibitatearen arabera frogatu daiteke ezen bi trantsizio hiperfinen frekuentzien erlazioak egitura finaren konstantearen menpekoak

direla. Beraz, baldin eta bi erloju hartzen badira, bata Rb-an oinarrituta, eta bestea Cs-an, eta baldin bien frekuentzien arteko erlazioa  $10^{-16}$ -ko zehaztasunarekin neurtzen bada, eta baldin erlazio honek hamarkadetan zehar irauten badu, espero daiteke ikustea ea oinarritzko konstanteak denborarekin aldatzen diren ala ez. Hau funtseko galdera da. Beste proba batzuk ere badaude, esate baterako orain dela milioi bat urte Afrikan, Gabonen gertatu zen erreakzio nuklear naturalaren eraginez, laino atomiko molekularrek absorbatzen duten urrutiko quasarretatik datorren argia behatzea.

Badirudi erloju atomikoen proba izango dela zehatzena. Horrekin jakin-min handia daukagu oso eszitatuta gaude.

## **6. Erloju atomiko optikoak**

Nire hitzaldi honen azken atalera heldu naiz. Gaur egun interesa letratuz doa mikrouhinetak erlojuetatik, hala nola Cs erlojuetatik, erloju optikoetara, non trantsizio optikoak erabiltzen diren. Zergatik? Jakina da erresonantzia bat dagoenenean, haren ezaugarri oso garrantzitsu bat  $Q$  faktorea dela,  $\nu/\Delta\nu$ , non  $\nu$  osziladorearen frekuentzia baita, eta  $\Delta\nu$ , zabaleara. Kontuan hartuta  $\Delta\nu = 1/T$  dela,  $Q = \nu T$ . Baldin bi osziladore hartzen baditugu, biek  $\Delta\nu$  berdina izanik, orduan  $Q$ , kalitate-faktorea, handiagoa izango da zenbat eta  $\nu$  handiagoa izan. Ondorioz, erloju optikoek, frekuentzia optikoa domeinu optikoan dutenak, askoz erakargarriagoak izango dira Cs erlojuak baino, non  $\nu$  mikrouhinetan baitago. Beraz, ikertzaileak hasi dira erloju optikoak eraikitzen.

Orain arte bi erloju optiko mota aztertu dira. Lehendabizikoak ioi harrapatuak erabiltzen ditu. Eta eragozpen bat dago: tranpan ioi bakarra eduki behar da, zeren eta, baldin ioi asko badituzu harrapatuta, orduan, ioi horien arteko elkarrekintza elektrostatiakoaren kausaz, desplazamenduak gerta daitezke lerro optikoan. Ondorioz, ioi bakarra izan behar duzu. Noski, trantsizioak frekuentzia altukoa izan behar du, baina lerroa detektatzerakoan seinale/zarata erlazioa arazoa izan daiteke.

Bigarren posibilitatea sare optiko (optical lattice) deiturikoa erabiltzea litzateke; hori, putzu potentzialez osaturiko array periodiko bat da, laserrez sortutako uhin estazionarioek sortua. Interferentziak egiten dituzu laser-uhin estazionarioetan, eta potentzial-putzuen array periodiko bat lortzen duzu, non atomoa harrapatuta gera daitekeen. Berdin gertatzen da arrautza-kutxa batean: arrautzak zuloetan antzera kokatzen dira. Orduan, bi atomoren arteko distantzia laserraren uhin-luzeraren ordenakoa izango da (1 mikroi), eta elkarrekintza txikia izango da: atomo asko jarri ahal izango dira eta seinale/zarata erlazioa handiagotu egingo da. Orain ez gaude atomo bakarri erabiltzearen mugarekin. Baina argiak, sarea egiteko erabili behar den argiak, mailak desplazatu egingo ditu, eta hori txarra da, zeren

eta, mailak desplazatu egiten dituzu, eta desplazamendu hori argi-intentsitatearen menpekoa da, hain zuzen, sarea egiteko erabiltzen duzun argiaren intentsitatearen menpekoa.

Beraz, bi proiektuek zailtasunak dituzte. Utz iezadazue adierazten nola gainditu daitezkeen. Badakizue: fisikan istorioa berdina da beti, fisikan lan egiten duzu, zailtasun bat, muga bat topatzen duzu, eta hori gainditzen saiatzen zara, saihesteko bide bat aurkitzen saiatzen zara.

Ikus dezagun azalean zer gertatzen zaion ioi bakar bati tranpa optiko batean: efektu oso eder bat. Zer esanik ez, baldin eta ioi bakar bat baduzu, eta  $\Delta v$  oso-oso txikia duen trantsizio bat eduki nahi baduzu, hala nola goiko diapositiban adierazten den trantsizioa [ $g \rightarrow e_R$ , gorria], trantsizio bat duzu funtsezko egoeratik abiatuta, egoera eszitzatu bateraino, lerro estu batekin, eta horrek esan nahi du bizitza-denbora luzea duela. Baina egoera horretan izanik, trantsizio horren fluoreszentzia tasa oso baxua izango da. Lerroa ia debekatuta badago, ez du argi askorik barreiatuko eta seinale/zarata erlazioa konpondu ezinezkoa izango litzateke. Baldin eta urdinaren moduko trantsizio bat erabiltzen bada, funtsezko egoera eta zabalera handia duen egoera eszitzatua elkarrekin konektatzen dituen, bizitza-denbora oso motzarekin, seinale/zarata erlazioa oso handia izango da, zeren eta fotoi asko izango dituzu barreiatuta denbora unitateko. Orduan  $\Delta v$  handia izango da. Ikusten duzunez, lehia-efektuak dituzu. Orduan Hans Dehmelték ideia oso originala izan zuen, apaleratze-metodoa dei daitezkeen ideia (shelving method): bi trantsizioak, aldi berean eszitzatzea, trantsizio estua eta trantsizio zabala. Orduan lerro zabal urdinak igorritako fotoi asko izango dituzu, baina noizean behin atomoak fotoi gorri bat absorbatuko du, eta atomoa ER-ra joango da, hots, egoera eszitzatura non segundotan iraun baitezake, egoera hori metaestablea izanik. Eta ioia egoera horretan «apaleratuta» dagoen artean ez da funtsezko egoeran egongo, eta ondorioz, fluoreszentzia urdina gertatu egingo da. Beraz, fotoi gorri baten absortzioa detektatu egiten duzu milaka fotoi urdinen gabezia detektatuz. Ikusten duzunez, ideia hau oso ederra da, oso dotorea. Eta funtzionatu egiten du. Eztabaida handia egon zen orain dela 20 bat urte efektu hau behatu egin zenean, zeren hau izan baitzen lehendabiziko aldia, nik uste, non ikerlariék atomo bakar baten gainean, ioi bakar baten gainean, eginiko esperimenduak egiten ari ziren, errealizazio experimental bakar batean. Laburbilduz, laser urdina ioia hozteko eta fluoreszentzia detektatzeko erabiltzen da. Atomoak fotoi gorri bat absorbatzen duenean «apaleratuta» geratzen da, eta fotoi gorri baten absortzioa fluoreszentiaren fotoi urdin askoren gabeziarekin detektatzen da.

Eta, badakizue, denbora hartan esperimendu honek, mekanika kuantikoaren bidez, sistema bakar baten bilakaera errealizazio kuantiko bakar batean deskribatzeko estimulu handia ekarri zuela. Zeren eta Mekanika Kuantikoan ohituta baikaude balio batez bestekoak erabiltzen, dentsita-

tematrizeak, master ekuazioak, Bloch ekuazioak,... Eta jendea ez zegoen ohituta metodo horiek utzi eta errealizazio bakarretara joatera. Halandaze, arazo hau Jean Dalibardekin aztertu nuen, eta sistemak jauzi kuantikoak erakutsiko lukeelako ideia iritsi ginen.

Baldin eta ioi bakar baten fluoreszentzia urdina versus denbora behatzen badugu, ikusiko da seinale bat aleatorioa dena, igorritako fotoi asko dituen; noizean behin seinale hori desagertu egiten da, eta horrek esan nahi du atomoa apaleratu egin dela. Gero, fluoreszentzia berriro agertzen da. Horrela begiekin ikusi ahal duzu sistema bakar baten bilakaera aleatorioa, maila gorriaren eta funtsezko egoeraren artean gora eta behera oszilatzen, eta hori detektatu ahal duzu fluoreszentzia urdinari esker. Eta, noski, estatistikak egin ahal dituzu errealizazio experimental bakar batetik, eta neurketa ere egin dezakezu. Bitxiena zera izan da, esperimentu honek hainbat hurbilketa teoriko estimatu zituela, hala nola uhin-funtzio estokastikoak, Monte Carlo simulazioak —orain oso erabiliak optika kuantikoan—, eta denak hasi ziren esperimentu honetatik. Eta horrela da orokorrean: egoera experimental berri batek estimatu egiten du aurrerakuntza teorikoa, galderak eraginez.

Orain erloju optiko guztiek erabiltzen dute eskema hori: apaleratze metodoa. Zehatz izateko, zilegi bekit aipatzea ezen trantsizio gorria galdekatzen duzunean, lerro urdinik ez duzula jartzen, bestela mailak desplazatu egingo zenituzke. Lerro gorria jartzen da denbora batez, eta gero lerro urdina amatatu egiten da; bestela, mailak desplazatu egiten dira. Baldin eta oraindik argiren bada ikusten bada, horrek esan nahi du atomoa oraindik funtsezko egoeran dagoela, hots,  $g$ -n; argirik ez bada ikusten, atomoa  $R$ -ra eszitzatu egin dela esan nahi du. Gero, eszitzazio urdina eta gorria txandakatzen dira. Eta horrela erresonantzia gorria oso prezisio handiz finkatu ahal da.

Orain Bouldereko NIST taldearen lana erakutsiko dizuet. Bertan Dave Winelandek aurrerakuntza harrigarria egin du arlo honetan, eta orain  $8 \times 10^{-18}$ -ko zehaztasun erlatiboak lortzen ari dira. Imajinatu ahal duzue? Eta erkatu egiten dituzte bi erloju optiko, Hg-arekin eta  $A^+$ -arekin, eta aukera izan dute bi frekuentzien erlazioa neurtzeko zehaztasun horrekin, 17 digitu! Benetan harrigarria. Ez dut astirik, baina Berilio-8arekin neurketak egiteko, logika kuantikoaren kontzeptuak eta informazio kuantikoaren kontzeptuak erabili dituzte. Eta horrela eginik, erlazioa denbora tarte batean neurtuz, topatu dute ezen frekuentziaren desplazamendu erlatiboa,  $\dot{\alpha}/\alpha \approx 10^{-17}$  urte<sup>-1</sup> dela. Oraindik ez da inolako aldakuntzarik ikusten, baina errore-barrak txikiagoak egiten badira, orduan ikusi ahal izango da aldakuntza bat oinarritzko konstanteetan. Eta aipa dezadan, bidenabar, ezen azken esperimentuan, aldakuntza bat nabari izan dutela bi erlojuetariko bat 30 cm mugitu egin dutenean; hots, gorriaren desplazamendua detektatu

egin dute 30 cm-ko desplazamenduaren kasuan. Beraz, oso-oso kontu handia eduki behar da bi erlojuok altuera berdinean jartzeko unean. Honek erakusten du ezen, printzipioz, eta etorkizunean egingo diren esperimenduetan, eta esate baterako Cs-aren erlojutik  $Al^+$  erlojura aldatzen badugu (eta hori gertatuko da hamarkada batean edo bitan) orduan, denbora-unitatea ezingo dela lurrazalean definitu, ezingo delako jakin zehazki non zauden. Beraz, denbora definitzeko modu bakarra espazioa izango da, eta bertan eragin grabitazionalak saihestu ahal izango dira.

Orain bigarren kasuaren gainean arituko naiz, hau da, atomo neutroak sare optikoetan. Orain atomo kopuru handiagoa izango duzu, eta beraz, seinale/zarata erlazio hobea, baina desplazamenduak izango dituzu oraindik. Baina hemen ere badago arazo hori saihesteko modu bat, H. Katori izeneko japoniar oso trebeak aurkitua. Ideia zera da, sarea lortzeko erabiltzen den argiaren frekuentzia aukeratzea halako moldez non trantsizio optikoaren goi eta behe mailan bi desplazamenduak berdinak diren. Desplazamenduak desintonizazioaren menpdekoak direnez, aukeratu egin daiteke desintonizazio egokia halako eran non bi desplazamenduak berdinak diren. Haiek «uhin-luzera magikoa» deitzen diote. Eta funtzionatzen du. Horrela, goi mailaren desplazamendua eta behe mailaren desplazamendua berdinak dira frekuentzia jakin baterako, sarea sortzeko erabiltzen den argiaren frekuentzia jakin baterako. Eta hartzen baldin baduzu argiaren desplazamendua uhin-luzeraren funtzioz, ikusiko duzu desplazamendua desagertu egiten dela frekuentzia horretan. Orain, Parisen, C. Salomonen taldean, esperimenduak egiten ari dira Sr atomoekin (atomo neutroekin) sare optikoekin erlojuak eraikitzeko asmoz.

Hamarkadetan atzerantz begiratuta, eta erlojuen zehaztasun erlatiboa 1950etik hona begiratuta, Cs erlojua ikusiko da, eta gero, Cs atomoa erabiliz, 1965ean egindako segundoaren definizioa. Diapositiban ikusten da erlojuaren zehaztasunaren hobekuntza jarraitua. Eta gorriz ikusiko dira erloju optikoak, frekuentzia-konbinazioekin konbinatuta, John Hall eta Theodor Hänschek asmatutakoak, frekuentzia optikoak prezisio handiz neurtzeko. Ikusten da ~~nota~~ gurutze bat dugula orain, erloju optikoak hobekuntza izanik, eta azkenak dira aipatu ditudan bi kasuak. Orain zaila da: esperimendu handiak dira. Orain, une honetan, zinezkoa da horietako bat espazioan jartzea, oso korapilatsua baita. Baina seguru nago, teknologien garapenarekin, behar bada datozen 10 edo 20 urteetan, posible izango dela erloju optiko konpaktu bat izatea, espazioan erabiltzeko modukoa. Baina argi iruditzen zait denboraren definizioa aldatu egin beharko dela, Cs-aren mikrouhinetik elementuren baten nolabaiteko trantsizio optiko batera pasatuz. Jakin badakizue magnitudeak definitzen dituzten ikertzaileak oso arduratsuak eta zurrak direla, oso kontserbadoreak direla. Hitzarmena aldatu baino lehenago, zurrak izan nahi dute. Baina horrelako kurba ikusterakoan argi dago etorkizuna erloju optikoetan dagoela.

### **Amaierako oharrak**

Amaitzeko ordua heldu da. Uste dut gai hau adibide oso ederra dela ikerkuntza fundamentalaren eta haren aplikazioen artean dagoen konexioarena. Fisika fundamentalean egiten den edozein aurrerakuntzak, edozer gauzaren ulermenaren hobekuntzan, beti, denbora tarte baten ostean, noski, aplikazio garrantzitsuetara eramaten gaitu. Hor dauzkagu, erloju atomikoak, esaterako. Ponpatze optikoak, adibidez, ahalbidetu du ohiko erlojuen eraldaketa: Stern-Gerlach aukeratzeko modua erabili beharrean, orain ponpatze optikoa erabiltzen da, eta horrela erloju konpaktuagoak ahalbidetzen dira. Ez dut astirik zehaztapenik emateko, baina populazioaren harrapatze koherentea eta erresonantzia ilunak ahalbidetzen dute, gaur egun, erloju atomikoak miniaturizatzea, arroz-garau baten tamainakoak izateraino. Zeren, mikrouhinen iturri bat erabili beharrean, bi diodo-laserren sortak erabiltzen dira, haien frekuentzien arteko diferentzia mikrouhineko trantsizioaren frekuentziaren berdina izanik.

Argiaren desplazamenduak eta Sisiphus hozteak ahalbidetzen dute iturri atomikoak egitea. Atrapatutako ioi bakarrak eta apaleratze-metodoak erloju optikoak ahalbidetu dituzte. Sare optikoez gaur egun ahalbidetzen dituzte atomo neutroen erloju optikoak. Politikariek ezin dute hau guztia aurrean: fisika fundamentalean aurrerakuntza bat egiten da, eta gero aplikazio bat duzu, ez berehala, denbora tarte baten ostean baizik. Uste dut orain, espaziora joan baino lehenago, denbora bat behar dugula.

Hau izango litzateke nire ondorioa: oinarrizko zientziaren eta zientzia aplikatuaren artean elkarren arteko eragin bortitz bat dago, eta hori funtsezkoa da teknologia berrien emergentziarako, aurretik aurrean ezin daitezkeen teknoloietarako. Puntu garrantzitsua da zientzia ona egitea, emaitza onekin, eta aplikazio onekin.

Eskerrik asko zeuen arretagatik.

*Claude Cohen-Tannoudji*

Zientzia eta Teknologia Fakultatea  
2011ko Urtarrilaren 13a

\* \* \*

## **ELKARRIZKETA CLAUDE COHEN-TANNOUDJI PROFESOREAREKIN**

**Jacinto Iturbe:** Eskerrak eman nahi nizkioke Claude Cohen-Tannoudji Profesoreari bere hitzaldia euskaraz argitaratzeko eman duen baimenagatik, eta elkarrizketa hau egiteagatik. Eta orain, hasteko, nola bilakatzen da gizaki bat fisikari?

**Claude Cohen-Tannoudji:** Uste dut nagusiki irakaslea dela bokazioa bideratzen duena, irakaslea edo maisua, eskolan zauden artean. Baldin eta irakasle ona izatearen zori ona baduzu, fisikarekiko grina besteenganatzeko gauza den irakaslea bazara, gai hori oso ederra dela erakusteko konpetentea bazara, orduan motibatuta zaude; beraz, nagusiki, uste dut, kontaktu pertsonalaren kontu bat dela.

**Ji:** Eta hori eskolan?

**CCT:** Eskolan, Institutuan eta Unibertsitatean. Uste dut Eskola elementala eta institutua oso garrantzitsuak direla, zeren orduan hasten baitzara gauza askorekiko sentikor izaten, eta orduan maisuak badaki nola erakutsi zeinen kitzikagarri den hau guztiau, badaki nola transmititu zientziarekiko jakin-mina, grina, interesa... . Bai, horiek oso garrantzitsuak dira. Nire kasuan horrela izan zen, maisu eta irakasle onak izatea erabakigarria izan zen nire karreran.

**Ji:** Nola aukeratzen du fisikari batek bere ikerkuntza-arloa?

**CCT:** Lehen esan dizudan modu berean, hau da, Unibertsitatean azterketak gainditzen dituzu, eta orduan oso garrantzitsua da topatzea profesore bat, zu erakartzeko nortasun eta karisma nahikoa dituen. Nire kasuan, École Normal izenekoan sartu nintzenean —hau goi-mailako unibertsitate baten parekoa baita—, Matematika ikasi nahi nuen, Matematika gustatzen zitzaidalako, baina aldi berean Fisikaren gaineko hitzaldiak hartzen genituen; Alfred Kastlerrek ematen zituen, fisikari ona zen, gauzak era dotore batean azaltzen zituen. Horrela iritzia aldatu nuen eta Fisikara jo. Zortekontu bat izan daiteke arloa aukeratzera eramaten zaituena. Baldin eta zortea baduzu zeure ibilbidean goi mailako norbait topatzeko, zu erakartzeko eta giza eta zientzia ikuspuntu batetik motibatuzeko.

**Ji:** Mekanika Kuantikoak ia ehun urte bete ditu...

**CCT:** Bai, horrela da.

**Ji:** Zein da Mekanika Kuantikoaren gaurko egoera eta etorkizuna? Nola ikusten duzu Mekanika Kuantikoaren oraina eta nola ikusten duzu haren geroa?



**CCT:** Esaten duzunez, ia ehun urtekoa da, eta, jakina denez, gauza koprurua pentsaezina azaldu du, eta orain, horren gainean pentsatzen duzunean, esan daiteke denbora modernoaren bizimoduko teknologia berriak, hala nola hau edo hau edo hori (grabagailua, foto-makina), edo laserra, fenomeno kuantikoetan oinarritzen dira. Hasiera batean ez zen horrela, noski, baina gaur egun argi dago Mekanika Kuantikoa zientziaren atal oinarritzkoa dela. Ia ehun urte igaro ostean, hor dago prest [azaltzeko...]. Denbora aurrera joan ahala, esperimendu bat egiten duzu, fenomeno bat kausitzen duzu, eta horrek aurrera jotzea eskatzen du, teoria landuagoa, eskatzen du, aurrekoa berraztertzen duena, baina harantzago doana... Zer esanik ez dago, aurrerakuntza handiak egon dira, batez ere esperimenduetan. Hainbat esperimendu daude, Mekanika Kuantikoaren sortzaileek Gedanken kontuan hartzen zituztenak, hau da, ezin gauzatu zitezkeenak; gaur egun baina, Gedanken esperimenduak egin egin dira, atomo bakarraren mailan, elektroien bakarraren mailan, eta maila hori zeharo ezinezkoa zen iraganean, baina [esperimendu horiek] galdera berriak plazaratzen dituzte, arazo berriei atea ireki dizkiete. Baina Mekanika Kuantikoaren oinarria oraindik baliokoa da.

**J1:** Beraz,...

**CCT:** Beraz, pentsatzekoa da etorkizuneko une batean Mekanika Kuantikoa ez dela nahiko izango fenomeno bat edo beste azaltzeko.

**J1:** Baina horrelako fenomenorik ez da oraindik behatu.

**CCT:** Ez oraindik. Aurrerago joan behar da. Eta hona plazaratu daitezkeen erroka garrantzitsuenetarikoa bat: esploratu egin behar da sistema makroskopikoen eta sistema mikroskopikoen arteko eskualdea: Limitea. Argi dago sistema mikroskopikoen kasuan Mekanika Kuantikoa behar dela. Sistema makroskopikoen kasurako, Fisika Klasikoa nahikoa izango da. Baina trantsizio bat dago bi erregimenen artean, eta maila batean, maila makroskopiko batzuetan, Mekanika Kuantikoa ez da baliokoa izango... Irekia da auzia.

**J1:** Beraz, bila zabilta Mekanika Kuantikoa baliagarria ez den eremuak aurkitu nahirik?

**CCT:** Horixe. Horrela bi hurbilketa daude: behetik gorakoa, sistema bakunenetatik abiatzen dena eta sistema gero eta korapilatsuagoa egiten diharduena; eta goitik beherakoa, sistema handietatik hasten dena, miniaturizatzen eta maila mikroskopikoraino iristen dena: horrela tarteko eskualdea esploratzeko.

**J1:** Beste kontu bat. Temperatura oso baxuen gainean. Azken 30 urteetan-edo, temperatura oso baxuak lortu dira, aurretik zeuden markak hainbat magnitude-ordenatan hautsiz. Aurrean zitezkeen eta aurrean ez zitezkeen

fenomenoak ikusi eta aztertu egin dira. Gai honen gainean iruzkinik egin ahal duzu?

**CCT:** Fenomeno fisikoak aztertzerakoan arraroa da bat aurkitzea aurretik auresan egin ez dena. Noski, argiaren bidezko hozte-teknika jauzi handia izan da tenperatura baxuen arloan. Baina, noski, edukia atomo kopuru txikia da. Batzuetan iristen zaizkigu eskutitzak zerbaiten eske: teknika horiek hozkailuak egiteko aplikatu daitezke? Argi dago hozte-teknika hauek ezin direla hozkailuak egiteko aplikatu... Mila milioi atomo hozten ditugu, materia kopuru minimo bat. Metodo hau ez da oraindik egoera solidora zabaldu. Nagusiki, sistema txiki diluituetan erbailtzen da; baina, edonola ere, egunotan materia-egoera berria aurki daiteke, aurretik pentsaezina zen materia. Einsteinek, 1925ean, orain ia ehun urte, auresan zuen hori. Hasieran, ideia guztiz akademikoa zen, zeren egoera hau agertzen deneko tenperatura hain den baxua, ezen substantzia guztiak solidoak edo likidoak diren. Baina gaur posiblea da gasekin egitea, zeren inguru hori diluitua baita, eta solido bat eratzeko beharrezko da hiru atomo aldi berean kolisionatzea, eta hori oso arraroa da gas batean. Laborategian lor daiteke baldin eta denbora oso luzea itxaroten baduzu. Baina urteak itxaron behar dira hiru-gorputzen arteko kolisio kopuru nahikoa izateko eta solido bat sortzeko... eta egoera hori egoera metaegonkorra da.

**JJ:** Eta beste arlo batzuk, hala nola konputagailu kuantikoak, eta abar. ...

**CCT:** Mekanika Kuantikoa gero eta hurbilago bilakatzen ari da. Jen-deak arau kuantikoak aplikatzen ditu informazioa transmititzeko, informazioa prozesatzeko. Baina kontu hau zaila da. Jadanik informazioaren transmisioa ezaguna da, kriptografia kuantikoa. Badago konpainia bat trenak saltzen dituen, informazioa transmititzeko eta espioiek ez atzemateko moduan. Horrek funtzionatzen du. Baina konputadore bat egitea, bit-edo qubit-kopuru handi batekin, hori zaila da. Hor dekoherentziaren fenomeno dago. Agian irtenbide bat aurkituko da, baina uste dut ez dela bihar izango. Edozelan ere, gauza hauen guztion gainean pentsatzeak aurrerakuntza ekarriko du, [Mekanika] Kuantikoak aurrerakuntza izango du. Sarri, ideia batekin hasten zara, helburu batera iristen saiatzen zara, eta bidean aldatu beharrean egoten zara. Ikerkuntza egiterakoan ezin da auresanik egin. Batzorderen batean egon naizenean eta hurrengo hamar urteetarako iragarpenak egiten saiatu,... ezinezkoa. Baldin eta badakizu zer izango den interresgarri hurrengo hamar urteetan, orduan egin egiten duzu.

**JJ:** Optika atomikoa. Zaila da ulertzea nola den posible atomo-multzo bat geratzea argia, eta argi hutsa, erabiliz.

**CCT:** Irudi erraz bat emango dizut: baldin eta mugitzen den itu bat baduzu eta horren gainean presio bat eragiten baduzu, itua moteldu egingo da. Antzeko gauza gertatzen da kalean zabilzanean eta ekaitz bortitz bat edo haize gogorra zure kontra badoa: moteldu egiten zaitu. Gauza bera ger-

tatzen da atomoak dituzunean eta fotoi sorta bat haren kontra. Presioak atomoak geratu egiten ditu. Noski, fotoi bakoitzak aldatu egiten du abiadura. Abiaduraren aldaketak oso txikiak dira, baina hasierako abiadura 1 kilometro segundoko bada, abiaduraren aldaketa txikia izan arren, eta prozesua segundoko ehun mila milioi aldiz errepikatzen baduzu, orduan, minutu baten inguruan atomoa geratu ahal duzu. Hori da ideia.

**Jl:** Lehendabizi geratu eta gero geldirik mantendu.

**CCT:** Geldirik mantentzeko, [argi]sortak bi norabidetan jarri eta hoztu.

**Jl:** Eta horrela daukazunean, aztertu eta ikertu.

**CCT:** Bai, noski, harrapatu egin behar da atomoa toki batean mantentzeko.

**Jl:** Ezagutza puruaz gain, gaur egun hainbat tokitan ikus daitezke tenperatura oso baxuen fisikaren aplikazioak daitezke: metrologia, denboraren neurria, estandarrak... Ba al dago eragozpenik patenteekin, sekretuekin, seguritatearekin?

**CCT:** Nire ikerkuntza-arloa ez da sentibera, oinarrizko ikerkuntza da. Ez nau horrelako ezerk inoiz geratu. Baina, noski, gure eremu honetan industria-ekoizpena garrantzitsua izan daiteke. Baina ez naiz ni aditua erantzun argi bat emateko. Ez, nire bizitza zientifikoan ez dut sekula izan era horretako arazorik. Jakina da patenteekin arazo ugari daudela.

**Jl:** Oinarrizko Ikerkuntza da zurea, baina gero oinarrizko ikerkuntza erabili egiten da industrian edo defentsan.

**CCT:** Oinarrizko Ikerkuntzaz baliatuta profitatu daiteke industria edo defentsa; agian, sistemaren akats bat dela pentsa daiteke... Unibertsitateko jendea ez da arazo horretaz oso ondo ohartzen. Ez dugu astirik horrelakoe-tarako. Agian hutsune bat da.

**Jl:** Nola da posible aldi berean zuzentzea ikerkuntza-talde bat —fisi-kari teorikoekin eta esperimentalekin, ingeniariekin...—, irakaskuntza-lana egitea, administrazio-lana egitea, beste ikerkuntza-talde batzuk bisitatzea,...

**CCT:** Gero eta zailagoa da, zeren eta burokrazia haziz eta handituz doa toki guztietan. Nire doktoratzea egin nuenean, ikerketan ari nintzen denbora osoan, kontratu asko barik, proiektu-eskari asko barik... bizitza sinpleagoa zen. Orain nire ikasle gazteenak ikusten ditudanean denbora lu-zeak ematen proiektu-eskariak betetzen, dirua eskatzen, etab. pentsatzen dut bilakaera txarra izan dela. Nire iritzian ikerkuntzan diharduen jendeak kontzentrazioa behar du, denbora behar du irakurtzeko, pentsatzeko, lan egiteko,... Gaur jarduerak oso barreiatuta daude. Ez duzu jarraitutasuna

nahikoa zerbait berria sortzeko. Agian nortasun-kontu bat da. Badaude oso aktiboak diren pertsonak, denbora jarduera desberdinetan nola bana daitekeen jakin dakitenak. Niretzat zaila da. Beti saihestu ditut laborategiko zuzendaritza lanak, lanok ez ditudalako maite. Ez dut horretarako gaitasunik. Hala ere, pentsatzen dut garrantzitsua dela goi karguetan zientzialariak egotea, zeren garrantzitsua baita politika-ildo bat bideratzeko unean. Ezin dut erantzun argi bat eman. Nortasunkontu bat da.

**JJ:** Gaur eguneko fisika gehiago da mundu mailako elkarlan zabalaren ondorioa, lan pertsonalaren edo talde bakar baten lanaren ondorioa baino. Beste alde batetik, gaur eguneko fisika oso lehiakorra da. Ez al dago hor kontraesan bat?

**CCT:** Bai, noski, baina uste dut garrantzitsua dela lagun talde bat izatea elkarrekin lanean: elkar ondo ezagutzen duten ikertzaileak, batak bestearen estimua duena, elkarrekin lan egiten ohituta dagoena, hitz egiteko, eztabaidatzeko,... Baina, bestalde, garrantzitsua da halaber kontaktuak izatea beste pertsona batzuekin, elkarrekin ideiak trukatzeko, nazioarteko bilkuretan elkarrekin egotea... Noski, lehia egon badago, baina lehia hori lehia onuragarria da. Nire kasuan, zorionez, beti izan dut zortea jende artezarekin egiteko, onest dena, ideiak ebasten saiatu ez dena. Bai, zorte onekoa izan naiz kontu hauen gainean.

**JJ:** Ez da hau Euskal Herrira egiten duzun lehen bisitaldia. Nola ikusten duzu Fisikaren ikuspuntutik?

**CCT:** Bilbon egon naiz eta Donostian ere. Herria gustatzen zait. Fisikariarentzat eremu ona da, duda-izpirik gabe. Hala ere harrিতuta nago ikusita nola ez dagoen kolaborazio elkarlan gehiago zeuen herriaren eta Frantziaren artean, bereziki Bordelerekin edo Tolosarekin. Etorkizunean, batasun handiagoarekin, politikoa, ekonomikoa,... Italiarekin, Alemaniarekin,... komunitate bat ikusten dut Estatu Batuekin lehian ahal izango duena.

**JJ:** Bukatzeko, nahi al duzu zerbait gehitu?

**CCT:** Ez, bakarrik zera esan nahi nuke, uste dut gaurko problema nagusia zientzietara jende gazte gehiago erakartzea dela, zeren eta jende zientifikoaren kopurua gutxituz doa mundu osoan, eta jarraitutasunean arazo latzak ditugu. Egoera horri buelta eman behar zaio, eta gazte jendearen zientziarekiko jakin-mina piztu. Hori da helburu nagusietariko bat. Hezkuntza zientifikoa izatea oso garrantzitsua da objektiboa izateko, buru kritiko bat izateko eta fanatismoaren edo intolerantziaren edo beste desbideratzeren kontra egiteko.

**JJ:** Eskerrik asko, Cohen profesore.