

Laser bidezko hozketa eta lurrun kuantiko ultrahotzen eratzea

Ibon Santiago Gonzalez

Center for Ultracold Atoms. Department of Physics.
Massachusetts Institute of Technology

Laburpena: Lan honetan atomo ultrahotzei buruzko oinarrizko kontzeptuak azaltzen dira. Lehenbizi, tenperatura baxuko ikerketa egiteko arrazoiak aurkezten dira, materiak dentsitate baxu eta tenperatura hotzetan dituen ezaugarri kuantikoak aipatuz. Argi-indarren jatorria eta erabilera laburbiltzen dira jarraian, tranpa magneto-optikoa eta lurrun kuantiko ultrahotzak sortzeko bestelako teknika garrantzitsuekin batera. ^{41}K Bose-Einstein Kondentsatua eta honekin sorturiko nahasdura kuantikoak aurkezten dira. Azkenik, Feshbach erresonantziak eta sare optikoekin partikulen arteko elkarrekintzak kontrola daitezke; erreminta hauekin atomo ultrahotzek aukera eskaintzen dute materia kondentsatuaren sistematik fisika atomikoaren zehaztasunarekin modelatzeko.

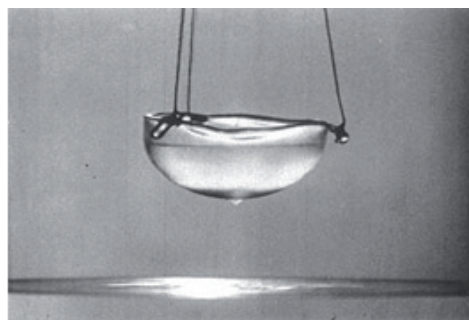
Abstract: This work introduces fundamental concepts in the field of ultracold atoms. First, a motivation for pursuing low-temperature research is presented, as well as a discussion on the quantum properties of matter that emerge at temperatures a million times colder than interstellar space, and at densities a million times thinner than air. A survey of light-forces and trapping techniques follows with a description of a quantum mixture experiment that uses ^{41}K as a coolant. Optical lattices and Feshbach resonances are explained as relevant tools to control interactions between atoms and provide the means to model condensed matter systems with the precision of atomic physics.

1. SARRERA: ZERO ABSOLUTUAREN BILA

Demagun gure planetan, klima aldaketa dela-medio, ez dugula inoiz zerotik beherako tenperaturarik neurtu. Ura edaten dugu eta badakigu bera berotzean lurrun bilakatzen dela. Behin, zientzialari talde batek hozkailu bat asmatu eta baso bat ur sartzen dute zer gertatzen den aztertzeko. Hozkailua ireki eta hara non materiaren egoera berri bat agertzen den: Izotza. Imajinazioa are gehiago zorrotzuz, eguzkiaren azalean biziko bagina, ez genuke ez solidoez, ez isurkariez hitz egingo eta hozkailurik gabe, naturak sortzen dituen materiaren hainbat egoera ez genuke sekulan ikusiko.

Antzerako motibazioarekin, xx. mende hasieratik, zientzialariek naturak materia antolatzeke dituen era desberdinak aztertu eta azaldu nahi izan dute. Tenperatura baxuak lortzeko lehia Herbeheretan hasi zen 1911. urtean Leideneko Kamerlingh Onnes fisikariak zero absolutura hurbilduz, helioa isurkari bihurtu zuenean eta honen ezaugarri harrigarriak mundura helarazi zituen. Une batez, Leiden munduko tokirik hotzena bihurtu zen, 4.2 K hain zuzen. Bere ikasleekin batera, helio isurkaria erabili zuen merkurioaren *supereroankortasuna* aurkitzeko, hots, elektrizitatea erresistentziarik gabe garraiatzen duen materiala aurkitzeko [1]. Berandua, Kapitsak, Allen eta Misenerrek helio isurkaria 2.2 K-ra hoztu eta *superjariakortasuna* aurkitu zuten, hau da, marruskadurarik gabe higitzen den isurkaria. 1. irudian mekanika kuantikoaren adierazpen makroskopiko diren bi fenomeno hauek azaltzen dira, alde batetik supereroaletan gertatzen den Meissner efektua eta bestetik, helio superjariakina edukinontzitik likatasunik gabe ateratzen da. Hainbat hamarkada iragan ziren azalpen teoriko zuzena aurkitu arte. Materiaren egitura bitxi hauek ulertzeko, ezinbestekoa dugu xx. mendean iraultzailea izan zen mekanika kuantikoa.

Inguratzen gaituen mundu mikroskopikoaren deskribapen fisikoa mekanika kuantikoan oinarritzen da. Materiaren egitura, atomoak, molekulak, argia eta haien ezaugarriak ulertezinak lirateke teoria kuantikorik gabe. Era berean, inoiz izandako aurrerapen teknologikoa gauzatu duen erreminta da: elektronika, laserra, transistorea, erloju atomikoa eta nanozientziaren sorrera bultzatu ditu, besteak beste. Arrakasta handia izan arren, oraindik ondo menperatzen ez ditugun arau bitxiz betetako xake joko bat bezalakoa da mekanika kuantikoa. Partikula bat uhin bat izan daiteke edo alderantziz, neurketaren arabera; partikula bat bi egoera desberdinetan egon daiteke aldi berean eta ziurgabetasun-printzipioak neurketa bat zehatz-mehatz aurrerako gaitasuna debekatzen digu. Posible ote gure eguneroko bizitzan horrelako fenomeno kuantikoak behatzea?



1. irudia. Mekanika kuantikoaren bi adierazpen makroskopiko: ezkerrean, iman bat supereroale hotz baten gainean lebitatzen. Supereroaleak kanporatzen ditu imanak sortzen dituen eremu magnetikoak. Eskuinean, helio isurkariak, likatasunik gabeko superjariakina, kapilaritatez edukinontzitik atera eta tanta bat osatzen du kanpoan.

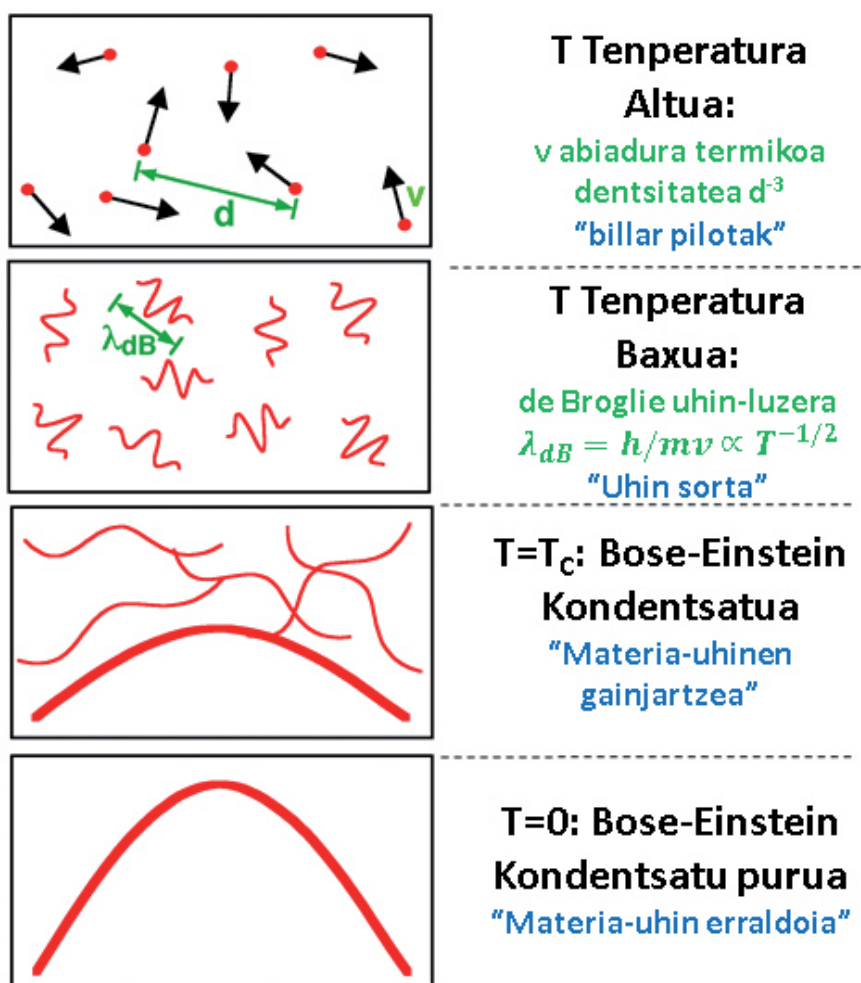
Maila makroskopikoan, ezaugarri kuantikoak guztiz ezkutatzen dira. Mekanika klasikoarekin aski dugu pilota baten higidura parabolikoa edo ilargiaren orbita azaltzeko. Badira, ordea, mekanika kuantikoaren adierazpen makroskopikoak, hala nola, arestian aipaturiko supereroankortasuna eta superjariakortasuna. Hauek behatzeko tenperatura txikiak behar dira, horrelakoetan uhina da sistema osatzen duten partikulen izaera nagusia. Ideia hau mekanika kuantikoaren ardatza da, hots, materiaren uhin izaera eta atxiki dakioken *de Broglie uhin-luzera* λ_{dB} handitzen doa partikulen abiadura eta masaren alderantzizko proportzioan, Loius de Broglie 1923. urtean lehenik azaldu bezala, $\lambda_{dB} = \frac{h}{mv}$, non h Planck-en konstantea den. Beraz, tenperatura partikulen batez besteko abiaduraren neurri bat denez, gero eta tenperatura hotzagoak, orduan eta uhin-luzera handiagoak. Adibidez, giro tenperaturan aire molekulen *de Broglie uhin luzera*, hauen tamaina baino askoz txikiagoa da (metroa baino hamar mila miloi aldiz txikiagoa) eta beraz, haien higidura, bilar-piloten antzera deskriba daiteke, mekanika klasikoarekin. Zenbait kelvineko tenperatura hotzetan, ordea, higidura motela da, eta uhin-luzerak makroskopikoak; ondorioz, efektu kuantikoak argi azaltzen dira.

Materiaren partikula ala uhin izaeraz ikasteaz gain, teoria kuantikoak bigarren osagai bat sartzen du deskribapenean; partikulen bereizgarritasuna, alegia. Unibertsoa materia guztia bi partikula motatan sailka daiteke: *bosoiak* eta *fermioiak*; sailkapen honi *estatistika kuantikoa* deritzo. Bosoiak partikula taldekoiak dira eta egoera kuantiko bera izan dezakete (fotoiak adibidez, bosoiak dira); bestalde, fermioiak (elektroiak adibidez) partikula bakartiak dira, bi fermioi ezin izan daitezke energia-egoera berberean. Sailkapen honen funtsa parametro bakar baten menpe dago: partikulen haien baitan biratzeko duten gaitasuna, *spin*, alegia. Horrela, spin 1/2ko partikula kopuru bikoitia duten atomoak bosoiak dira eta kopuru bakoitia dutenak, fermioiak¹.

Tenperatura baxuetan gertatzen diren fenomenoak honelako bidez azal ditzakegu. 2. irudian ikus dezakegunez, gero eta batez besteko abiadura txikiagoak, gero eta λ_{dB} *de Broglie* uhin luzera handiagoa. λ_{dB} uhin-luzerak partikularen posizioaren ziurgabetasunaren neurri bat ematen digu, behin uhin-luzera partikularterko distantziaren antzekoa denean $\lambda_{dB} \approx d$, orduan bereiztezinak diren partikulek «zopa kuantikoa» osatzen dute. Tenperatura baxuko lurrin diluituek ezaugarri hauek betetzen dituzte eta horregatik

¹ Taula periodikoko lehen zutabeko elementuek (alkalinoak), kanpo geruzan elektro bakararra dute; beraz elektro kopuru osoa bakoitia da. Atomoa neutroa denez, protoi kopuru osoa bakoitia da ere eta ondorioz neutroi kopuruaren arabera asma dezakegu zein estatistika kuantiko dagokion atomo jakin bati. Adibidez, 40K fermioia da neutroi kopuru bakoitia duelako, baina ⁴¹K aldiz, bosoi da. Neutroi bakar batek guztiz alda dezake portaera kuantikoa.

tik dira hain erabilgarriak oinarrizko fisikaren hainbat galdera erantzuteko. Bosoi guztiak energia baxueneko egoeran pilatuta, materiaren fase berri bat sortzen da; XX. mende hasieran Bose eta Einsteinek auresan zuten hori, eta materiaren fase berria, Bose-Einstein Kondentsatua (BEK) da. BEK bat ez da ez solidoa, ez likidoa, ez gasa, koherentea den materia uhin erraldoia baizik. MIT eta Coloradoko JILA laborategietan eratu zen 1995. urtean [2] lehen aldiz. Materiaren fase berri hau nanokelvin inguruko temperaturetan gertatzen da. Zer nolako teknikek ahalbidetzen dute horrelako temperatura baxuak lortzea? Jarraian azalduko dugunez, erantzuna argi-indarretan aurkituko dugu eta zehazkiago, laser bidezko hozketan.



2. irudia. Partikulen higiduraren deskribapen klasikoa goi temperaturetan. Hoztu ahala, partikulak objektu kuantiko bihurtzen dira eta haien uhin izaera handitzen doa, de Broglie uhin-luzerarekin batera. $\lambda_{dB} \approx d$ denean, uhinak gainjartzen dira. Bereiztezinak diren partikula bosonikoez ari bagara, gainjartze maximoa gertatzen denean Bose-Einstein Kondentsatua (BEK) sortzen da, eta partikula guztiak oinarrizko egoera kuantikoan daude.

2. ARGINDARRAK ETA LASER BIDEZKO HOZKETA

Erraz suma dezakegu argiak energia garraiatzen duela, eguzkipean luzaroan aritzean azala erretzen zaigunean. Horrezaz gain, argiak momentua ere badarama, hots, objektuen gainean indar mekanikoa gauzatzeko gaitasuna du. Ideia honen jatorria ez da berria, eta zientzian askotan gertatzen den bezala, zerura jo behar dugu lehenbizi azalpen bila. Jada Johannes Kepler astronomoak 1619. urtean ohartu zen kometen isatsek beti eguzkiaren kontrara egiten zutela; horrela, argiak eragiten duen erradiazio-presioaren existentzia auresan zuen [3]. 250 urte beranduago J.C. Maxwell fisikariaren elektromagnetismoaren legeekin, posible egin zen argiaren erradiazio indarra kuantifikatzea. Gutxi gorabehera, eguzkiak lurrean presio atmosferikoa baino bilioi bat ahulagoa den erradiazio presioa eragiten du; nahikoa da ordea, kometen hauts partikulak higitzeko eta eguzkiaren norabide erradialean isatsa sortzeko. Laser argiak erradiazio presio askoz handiagoa eragiten du eta ikusiko dugun bezala, argi-indar honetaz baliatu gaitezke atomoak hoztu, harrapatu eta manipulatzeko. Mekanika kuantikoa izango dugu lagun argi eta materia arteko elkarrekintza ulertzeko. Irakurleak erreferentzia anitzetan aurki ditzake atal honetan garatuko ez ditugun kontzeptu fisikoak; William Phillips-en Nobel sariko hitzaldia da gomendagarriena [4].

Laser hitza entzutean, beroaren ideia datorkigu burura, soldatze prozesua, laser-ezpatak eta bestelako ahalmen suntsitzaileak dituzten aplikazioak. Pentsa daiteke atomoak laser bidez hoztea kontraesana dela, suarekin ura izoztea bezain paradoxikoa, alegia. Bonbila baten argiak gure eskuak berotzen ditu, xurgatzen den energia guztia bero bihurtzen delako. Atomoak laser bidez hozteko trikimailua prozesu honen aurkakoa da, hots, igorritako energiak, xurgaturikoa baino handiagoa izan behar du. Ikusiko dugun bezala, laserraren erabilera trebarekin posible da energia galera hori gauzatea. 1997. urtean William Phillips, Cohen-Tannoudji eta Chu zientzialariek Nobel saria irabazi zuten, laser bidezko hozketa eta harrapaketa asmatzeagatik. Geroztik munduan ehun bat laborategietan argiaren botere mekanikoa erabiltzen da, atomoen batez besteko abiadura segundoko zentimetro gutxi batzuetara geldiarazteko. Gero eta atomo geldoagoak, orduan eta tenperatura baxuagoak eta printzipioz nahi bezain baxuak izan daitezke tenperatura hauek. Zein da muga? Naturak ahalbidetzen duen tenperaturarik baxuena: zero absolutua, alegia.

Haien aurkikuntzaren edertasuna, emandako azalpen garbian datza. Fisikari modernoek atomoak ez ezik, eremu elektromagnetikoak ere kuantizatu behar izan dituzte, *bigarren kuantizazioa* deritzon ariketan [5]. Behin argiaren eremu elektromagnetikoa kuantizaturik eta atomoaren energia maila kuantikoak kontutan hartuz; argi/atomo elkarrekintza dipolo elektriko baten eta uhin elektromagnetiko klasiko baten arteko elkarrekintzaren antzekoa dela ondorioztatu daiteke. Jakina, hau hurbilketa bat besterik ez da, baina ikusgarri diren uhin-luzeretakako hurbilketa bikaina da eta ez dago kalkulu konplexurik egiteko beharrik. Hitz gutxitan, argi-indarrak bi motakoak

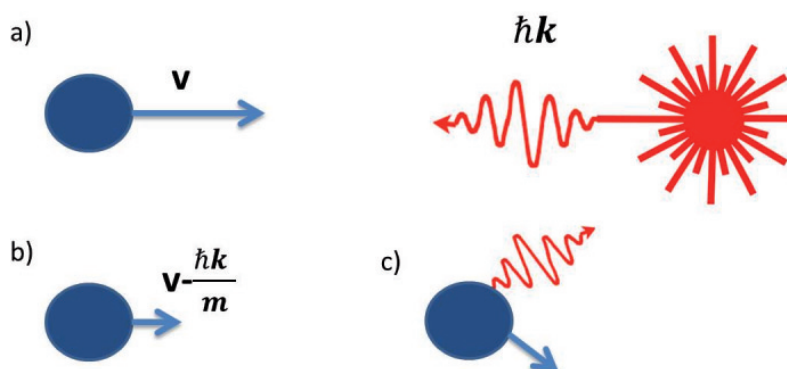
dira: kontserbakorrak (indar dipolarra) ala ezkontserbakorrak (erradiazio indarrak). Kontserbakorrak diren indarrek eremu elektrikoarekin batera oszilatzen dute; bestalde, eremuaren kontrako fasean oszilatzen duten indarraren osagaiak, ezkontserbakorrak dira, hau da, energia galtzen dute.

Indar Dipolarra eta Matxarda Optikoa

Indar dipolarra oso erabilgarria da, tranpa optikoen oinarritzko printzipioa baita. Laser bidezko harrapaketa lehenbizi tranpa dipolar optiko batekin egin zen Bell laborategietan [6]. Laser izpia mikrometroko puntu batera ardaztuz, atomoa, zein molekula, zein partikula harrapa daiteke, eta bai nahi den tokian lokalizatu ere. Laser izpiaren kolorearen arabera partikulak erakarri ala aldentuko dira izpiaren intentsitate maximotik. Egun, biofisikako laborategietan indar dipolarrez baliatzen diren matxarda optikoak erreminta estandar bihurtu dira, besteak beste zelulak harrapatzeko eta motore molekularren indarrak neurtzeko. Horrezaz gain, atomo ultrahotzen laborategietan tranpa magnetikoen ordezkoa den tranpa optikoa erabiltzen da, hoztutako atomoak luzaroan manipulatu eta aztertzeko [7].

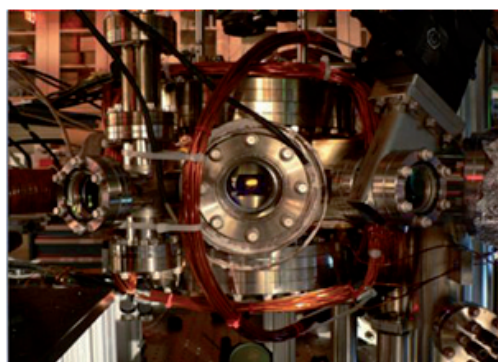
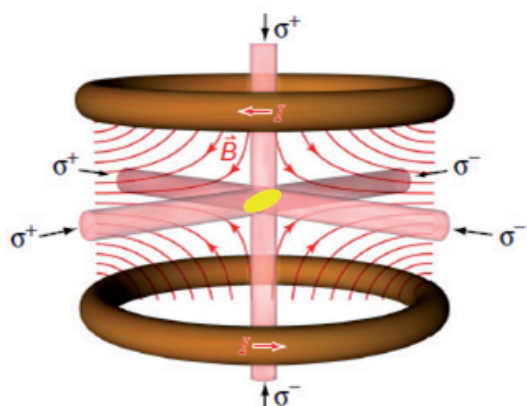
Erradiazio indarra eta Doppler Hozketa

Laser bidezko hozketa, ordea, argi-indar ezkontserbakorretan oinarritzen da, hauen bidez energia disipatzen delako. Erradiazio indarra ulertzeko har dezagun adibide gisa laser bidez hoztu zen lehen elementu atomikoa: Na sodioa. Alkalino guztiek bezala, sodioak ere azken geruzan elektroi bakarra du eta beraz, lehen hurbilketa batean, nukleo handiagoa duen hidrogeno atomoa bailitza irudika dezakegu. Fisika kuantikoan askotan agertzen den bi mailako atomoa izango da gure erudia, non soilik oinarritzko maila eta maila kitzikatua hartuko diren kontuan.



3. irudia. Doppler hozketaren oinarriak. a) v abiadurako atomo batek $\hbar k$ balioko momentua duen fotoi bat xurgatzen du. b) fotoia xurgatu ondoren abiadura $\hbar k/m$ txikitzen da c) igortze espontaneoan, ausazko norabidean gertatu ondoren, atomoaren abiadura txikitu egin da batez beste.

Izan bedi sodio atomoa v abiaduraz laser izpiaren aurkako norantzan higitzen. 3. irudian azaltzen dira laser bidezko hozketaren hiru pausuak. Argia, bestalde, energia eta momentua daramatzaten fotoiez osaturik dago. Hain zuzen ere, laser izpia, monokromatikoa izanik, kolore bereko fotoiez osaturik dago. Fotoi baten energia, bere maiztasunaren (kolorea) menpekkoa da soilik. Atomoak fotoi bat xurgatu eta oinarrizko mailatik, maila kitzikatura igarotzen da. Momentuaren kontserbazio legearen ondorioz, xurgaturiko fotoiak atomoari bulkada emango dio fotoiaren norantzan, baloi bat harrapatzean jasotzen den bulkadaren antzera. Fotoiak mailen arteko energia izatea beharrezkoa da kitzikapena gerta dadin, hots, fotoiaren kolorea (maiztasuna) guztiz zehatza izan behar da. Atomoa, belarri fin batekin konparatuz, maiztasun jakin batzuk entzuteko gai da, hala nola do edo re, baina tarteko sostenituak eta bemolak ezin ditzake entzun. Zorionez, egun posible da laserren maiztasuna prezisio handiz kontrolatzea. Adibidez, sodioa kitzikatzeko 589 nm-ko uhin-luzerako laser horia erabiltzen da. Noizbait sukaldeko gatza sutan jarri baldin baduzu, ikus dezakezu sugarraren kolorea horia dela. Era berean, laser horiarekin sodio atomoa maila kitzikatura bidal dezakegu eta *igorpen espontaneo*a dela medio, atomoa oinarrizko egoerara itzuli eta fotoi bat igorriko du. Ikusgarri diren uhin-luzeretan nanosegunduetan gertatzen da prozesu hau. Atomoak bulkada jasotzen du bai fotoia xurgatzean, bai fotoia igortzean; lehen bulkada higiduraren norantzaren kontrakoa da, baina igortze prozesua edozein norabidetan gertatzen da. Beraz, batez beste, igorritako fotoiek sortutako bulkada zero da. Xurgatze/



4. irudia. Ezkerrean, tranpa magneto-optikoaren (MOT) printzipioa: atomoetan eragiten duten σ^+ eta σ^- polarizazio zirkularreko bi izpiren arteko gainjartzea 3 dimentsioetan (6 izpi guztira). Aurkako zentzuzko korrontea daramaten kobrezko hariak (Anti-Helmholtz konfigurazioan), eremu magnetikoaren gradiente bat sortzen dute. Honek tokian tokiko indar magnetikoa sortzen duenez, atomoen hozketa ere tokian tokikoa izango da eta tranparen zentrorantz bultzatuko ditu partikulak. Eskuinean, ^{41}K potasiozko MOT 10^{-12} Torr-ko hutsezko ganbara batean. Esperimentu honetan 100 Amperek 220 G/cm-ko gradiente bertikala sortzen dute.

igortze espontaneo ziklo honen ondorioz, grabitatea baino 10^4 handiagoa den balaztatze-indarra jasotzen dute atomoek, zenbait cm/s-ko abiaduretara murriztuz. Azalpen hau guztiz zehatza izan dadin, Doppler efektua aipatu behar da, hots, atomoek ez dute maiztasun bereko laserra xurgatzen, abiadura aldatzen doazelako. Badaude *Zeeman moteltzailea* bezalako teknika trebeak, Doppler efektua eremu magnetikoekin konpentsatzeko.

3. MOT: TRANPA MAGNETO-OPTIKOA

Laser hozketarekin batera, tranpa magneto-optikoa (MOT) atomo ultrahotzak aztertze funtsezko tresna bilakatu da. Jean Dalibardek proposatu eta 1987an Bell laborategietan asmatu zen, atomoak harrapatu eta hozteko plataforma bikaina eskainiz [8]. MOT batean haril bikote batek kontrako korrante elektrikoak garraiatu eta Anti-Helmholtz konfigurazioan ganbararen zentruan zero eremu magnetikoa sortzen du². Atomoak zentruan pilotzen dira laser bidezko hozketagatik sorturiko 3Dko melaza optikoetan. Elektromagnetismoaren legeek, oreka-puntua debekatzen dute eremu magnetiko hauek; hau ekiditeko trikimailua egin daiteke argiaren polarizazioarekin eta ardatz jakin batekiko aurkako polarizazio zirkularrak aukeratuz (σ^+ eta σ^-), atomoek zentruanzko indarra jasango dute eta aldi berean Doppler hozketarekin, milikelvinetako tenperaturetara jaitsiko dira. Potasiozko MOT bat 4. irudian ikus daiteke, atomoek igortzen duten fluoreszentzia, alegia.

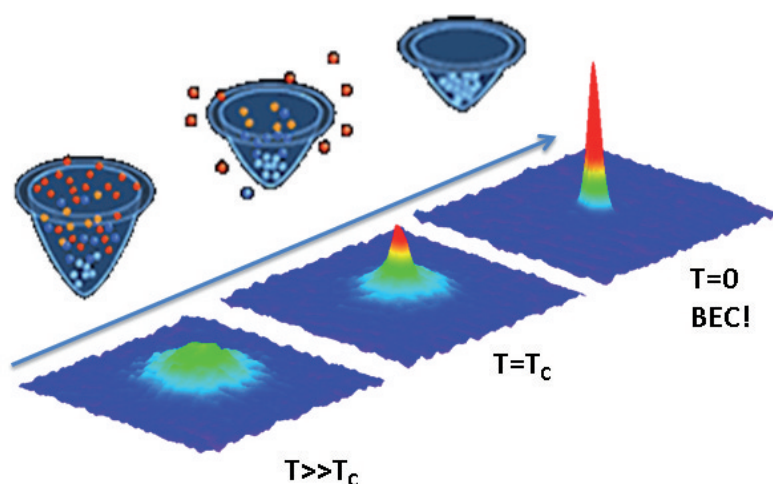
Soilik zeharkako metodo baten bidez neur daiteke hutsezko ganbara batean atomoek duten tenperatura. Hegaldi-denbora neurketa TOF (ingelesez, time-of-flight) da metodorik ezagunena, non tranpa magnetikoa itzali ondoren, harrapatutako atomoak unean duten abiadurarekin aske hedatzen diren. Laser-xurgatze argazkia ateraz, atomo sortaren abiadurabanaketa jakin dezakegu eta hortik tenperatura ondoriozta daiteke. MOT batean lor daitekeen tenperaturarik baxuena, atomo kitzikatua bere oinarriko egoerara igarotzeko behar duen denborak mugatzen du. Beraz, teknika gehigarriak behar dira tenperatura hotzetik, tenperatura ultrahotzetera aldatzeko.

² Anti-Helmholtz konfigurazioan eremu magnetikoaren gradientea maximizatzeko a erradioko haril bikotea a distantziara kokaturik daude eta eremu axiala erradiala baino 2 aldiz handiagoa da $B_z = 2B_\rho$. Eremu magnetikoa barruranzkoa da ardatz bertikalean eta kanporanzkoa ardatz erradialean.

Eremu magnetiko konstantea behar denean, Helmholtz konfigurazioara eramaten dira harilok. Horrela, norantza berberean dabilzan korronteeak eremu magnetiko konstante sortuko dute, eta Zeeman efektua erabiliz, atomoen energia mailak era kontrolatuan alda daitezke.

4. LURRUNTZE HOZKETA, BOSE-EINSTEIN KONDENTSATUAREN GILTZA

Behin atomo sorta MOT batean izanik, laser izpiak itzali egin behar dira eta hoztu diren atomoak tranpa magnetiko batera igarotzen dira; bertan, atomo guztiek barne momentu magnetiko bera dute (spin). Atomo guztiek spin berbera izan dezaten, *punpatze optikoaren* bidez manipulatu da atomoen spina. Fotoiek ere spina dutenez, momentu angeluarraren kontserbazio-legea betetzen da eta spinaren garraioa gertatzen da fotoietatik atomoetara. Tranpa magnetiko mota asko daude, baina gehienek zentruan zero eremu magnetikoa dute. Hau arazo bat da eta zulo horretatik atomoek ihes egin ez dezaten, erresonantzia kanpo dagoen beste laser izpi bat erabiltzen da eta horrela atomoak zuloatik aldentzen dira. Honi tranpa magnetiko estalia deritza [2]. Eremu magnetikoak beste zerbaitetarako behar direnean, indar dipolarrez baliatu eta tranpa dipolar optikoa ere erabil daiteke lurrun endekatuak sortzeko [7].



5. irudia. ^{41}K potasioko hedatze-denbora irudiek Bose Einstein Kondentsatuaren sorrera erakusten dute lurruntze hozketa metodoaren bidez [9]. Radio-frekuentzia uhinek tranpa magnetikoan dauden atomo beroak kanporatzen dituzte, eta tenperatura hozten dute. T_c tenperatura kritikoa momentu bereko atomoen pilatze makroskopikoa gertatzen da, eta BEK fase trantsizioa gauzatzen da.

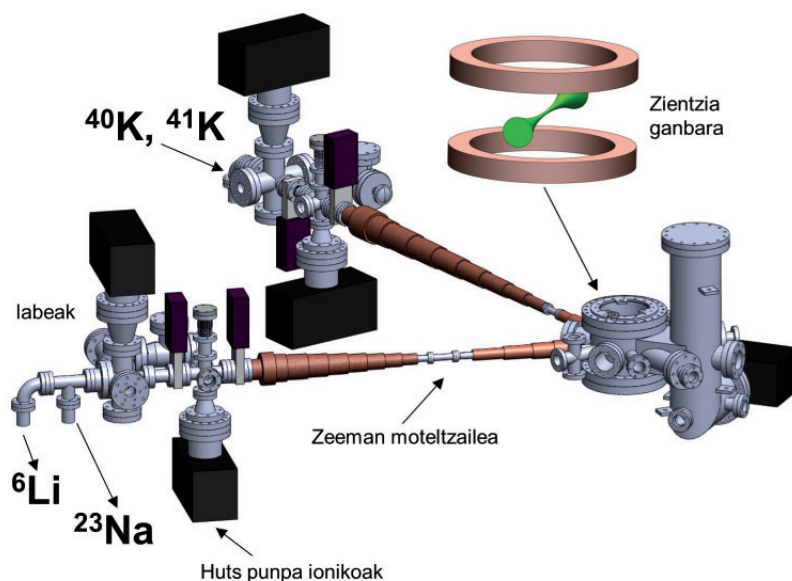
Laser hozketaren mugetatik haratago joateko, eguneroko bizitzan ezauna zaigun lurruntze prozesuak atomoak hoztu ditzake. *Lurruntze hozketa* gorputza hozteko erabiltzen du gure azalak, hau da, bero dauden partikulak izerdiaren bidez kanporatu eta hotz daudenak soilik mantentzen ditu. Kafe-katiluari putz egitean ere, antzeko prozesua gertatzen da eta partikula beroak katilutik kanpo botatzen ditugu. Era berean, tranpa magnetikoan

dauden atomo beroak radio-frekuentzia uhinak erabiliz kanporatu daitezke, eta behin lurruna termalizatu ondoren, atomoen tenperaturak behera egingo du. Radio-frekuentzia uhinak atomoen spina era hautakorrean aldatzeko gai dira, eta horrela atomoak tranpa magnetikotik kanporatzen dira³. Metodo hau erabiliz, lurrun kuantikoak zero absolututik graduaren mila milioirena baino tenperatura txikiagoak lor daitezke. 5. irudian azaltzen da MITko Atomo Ultrahotzen laborategian 2009. urtean lurruntze hozketaren bidez sortu zen potasiozko ⁴¹K Bose-Einstein Kondentsatua [9]. Abiadura-banaketak Gaussdarrak izatetik (gas termikoak), behin tenperatura kritikoa T_c iritsita, distribuzioa delta funtzio batera igarotzen da, partikula guztiek abiadura bera duten seinale. Garatutako teknika optikoak eta distribuzio desberdinen tratamendu estatistikoa Ketterle eta Zwierlein-en honako erreferentzian aurki daitezke [10] eta [11] lurrun bosoniko eta fermionikoentzat hurrenez hurren.

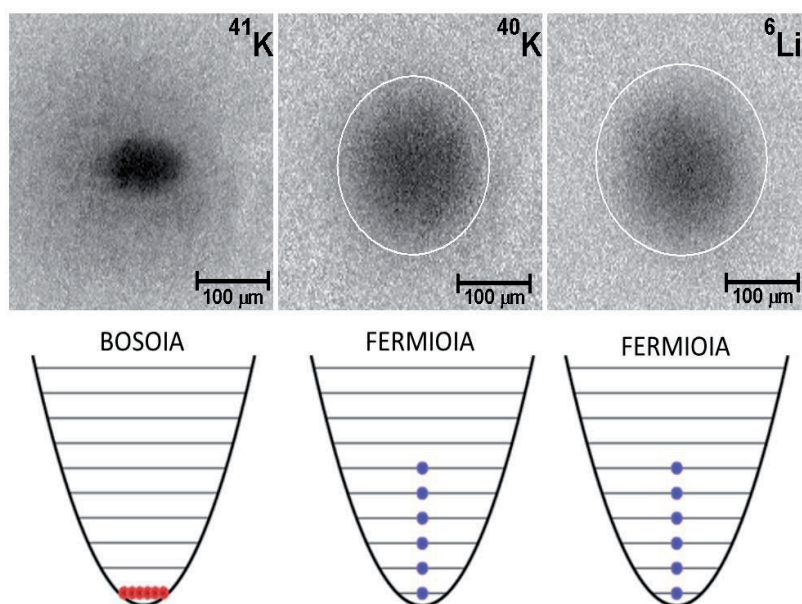
5. LURRUN KUANTIKOEN NAHASDURAK

Helio isurkaria material supereroaleak aurkitzeko erabili zen bezala; ehun urte beranduago Bose-Einstein Kondentsatuak hozgailu gisa erabiltzen dira atomo ultrahotzen nahasdura kuantikoak sortzeko. Pauliren esklusio printzipioa dela eta, fermio-lurrunek ez dute kondentsaturik osatzen, *Fermi itsasoa* baino. Maila horretara heltzeko, bosoiak lurruntze hozketa egiten da, eta fermioiak kontaktu termikoan daudenez, hauek ere hozten dira. Adibidez, 6. irudian nahasduren esperimendu bat azaltzen da. Bi labe eta bi Zeeman moteltze hodi, ganbera nagusian batzen dira, non tranpa magneto-optikotik (MOT) igaro ondoren, lurruntze hozketa egiten den espezie bosonikoan ⁴¹K, beste espezie fermionikoa ⁶Li hozteko. Esperimendu honen abantaila potasioaren ez-ohiko erabilera da: potasioak hiru isotopo desberdin ditu, zehazki ⁴¹K (6.7% ugaritasun) eta ⁴⁰K (0.01%), bosoiak eta fermioiak dira hurrenez hurren. Labe bat ugaritasun naturaleko potasioarako erabiltzen da eta beste labea litioarentzako (fermioiak). Horrela esperimendu honetan hiru espezie desberdin aldi berean hoztea posible izan da, endekapen kuantikoa lortuz, bai espezie bosonikoan (⁴¹K, bai espezie fermionikoetan (⁶Li eta ⁴⁰K) [9]. Hedatze-denbora irudietan (ikus 7. irudia) hiru lurrunen abiadura distribuzioa ikusten da, zeinak tenperatura neurtzeko balio duen. Bosoiak kondentsatua osatzen dute lurrun termiko baten barruan eta fermioiek aldiz, Pauli presioa jasaten dute Fermi itsasoa osatuz.

³ B eremu magnetikoak μ momentu magnetikoan eragiten duen energia $E = -\mu B$ da. Ezinezkoa da eremu magnetikoaren maximoa sortzea baina bai eremu magnetikoaren minimoa sortzea. Ereduaren kontrara lerratuta dauden momentu magnetikodun atomoek, tranparen minimoan harrapatu geratuko dira, haien energia baxuko egoera delako.



6. irudia. MITko Fermi1 deituriko nahasdura kuantikoen esperimentua. Bi labe eta bi moteltzaile ditu espezie desberdinak laser bidez hoztu eta zientzia ganbaran harrapatzeko. ^{41}K lurruntze hozketa eginez, lurrunen endekapen kuantiko hirukoitza lortzen da. Esperimentu honekin sodioa ere hoztu daiteke eta BEK bat sortu. [9] [12].



7. irudia. Hiru lurrunen hedatze-denbora xurgatze irudiak. ^{41}K ren kondentsazioa $T_c = 1.2 \mu\text{K}$ -ko temperaturan gertatzen da. Fermioien kasuan, endekapenaren neurria $T/T_F = 0.16$ eta $T/T_F = 0.51$ dira litioa eta potasioarentzat hurrenez hurren. Espezie bakoitzeko 10^5 atomo inguru daude. Beheko irudietan, bosoiaren eta fermioien arteko desberdintasun estatistikoa azaltzen, hots, BEK eta Fermi itsasoa, hurrenez hurren.

Bosoi-Fermioi nahasdurak oso garrantzitsuak dira material berrien ezaugarriak hobeto ulertzeko, hala nola supereroaletan gauzatzen den elektroiaren (fermioi) eta fonoiaren (bosoi) arteko elkarrekintza, non Cooper bikoteak osatzen diren. Era berean, Fermio-Fermio nahadura kuantikoak erabilgarriak dira fermio desberdineko superjariakinak osatzeko. Gorputz anitzeko problema interesgarria A fermioiaren portaera B fermioi itsaso batean aztertzea da, horrela, *sasipartikulak* deritzenak era garbi eta guztiz kontrolpean dauden esperimenduak burutzuz⁴. Nahasdurak sortzea ez da nahikoa gorputz anitzen problema aztertzeko, horretarako atomo ultrahotzen arteko elkarrekintza kontrolpean izatea beharrezkoa da. Hurrengo atalean azken hamarkadan garatu diren bi metodo iraultzaile aurkeztuko ditugu, partikula arteko elkarrekintzak zehatz-mehatz manipulatzeko.

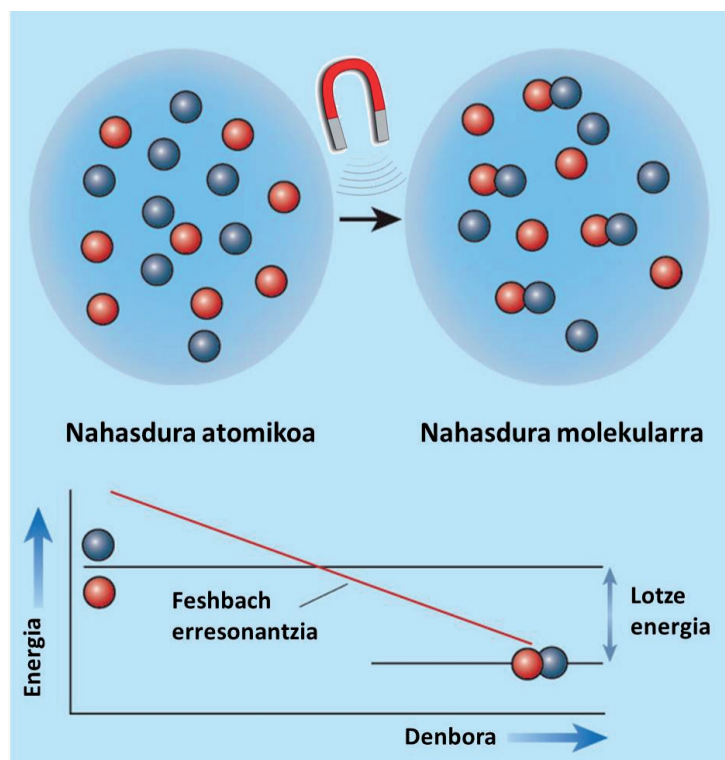
6. ELKARREKINTZEN KONTROLA: FESHBACH ERRESONANTZIAK ETA SARE OPTIKOAK

Lurrun kuantikoen nahasketetan ez dago karga elektrikorik, edo kristal batean aurki daitezkeen deformaziorik; sistema kuantiko purua dela esan daiteke eta beraz, materia kondentsatuaren fisikako modeloak aztertzeko balio dute. Elkarrekintzen kontrola fisika atomikoaren presizioarekin lor daiteke bi metodo desberdinen bidez: alde batekin, *sare optikoekin* kristal baten egitura simulatu daiteke atomoek laser izpiek sortutako potentzial periodikoa ikusten dutenean. Sare optikoaren sakonera, maiztasuna eta dimentsioak guztiz alda daitezke esperimendatzailearen nahietara moldatuz. Horrela, superjariakortasuna, isolatzaileak, supersolidoak eta bestelako materiaren egoera bitxiak sortu dira atomo ultrahotzen laborategietan. Adibiderik ospetsuena Hubbard modeloaren baieztapen esperimentalak da, non lurrun fermioniko bat isolatzaile izatetik, superjariakina izatera igarotzen den fase trantsizio batean [13].

Beste metodoa kanpo eremu magnetikoen erabilera da, eta horrela *Feshbach erresonantziak* sortzen dira. Hitz gutxitan, atomoen energia mailak eta beste partikulekiko elkarrekintzak, kanpo eremu magnetikoarekin alda daitezke, hein batean, atomo alkalinoak spin momentu magnetikodun partikulak dira eta. Eremu magnetiko jakin batean, sistemari dagokion energia molekula bat sortzeko behar den *lotura energiaren* baliokidea denean Feshbach erresonantzia bat lortzen da. Honi, fisika kuantikoan egoera lotua deitzen zaio eta esan ohi da erresonantzia bat gertatzen dela egoera honetatik hurbil. Eremu magnetikoak aldatuz, atomoen arteko talkak ugari-

⁴ Fisikan, sasipartikulak edo kitzikapen kolektiboak deitzen zaie, solidoak bezalako sistema konplexu mikroskopikoetan, asmatuak sasipartikula askeen arteko elkarrekintza ahularekin azal daitezkeenean. Hala nola, fonoiak, plasmoiak, polaroiak etab.

tu daitezke edo alderantziz. 8. irudian azaltzen da Feshbach erresonantziaren oinarriko printzipioa. Feshbach erresonantziekin elkarrekintza indartsua lor daiteke berez elkarrekintza ahula duten fermioi-lurrunetan.



8. irudia. Bi espezie atomikoen nahasketa (gorria eta urdina) energia jakin batean, Feshbach erresonantziarekin parekatu daitezke molekula bat eratzuz. Ereku magnetikoa denborarekin aldatuz sistemaren erresonantzia energia aldatzen du. Erresonantzia-energia atomo bakartien nahasduraren energiaren berdina denean, atomoen arteko talkek molekulak osa ditzakete. Erresonantzia txikituz doan heinean, azkenik molekulak energiaren balio txikienera helduko dira (lotura-energia); hots, molekula bi atomoetan bereizteko behar den adina energia.

Azkenik, Feshbach erresonantziekin *molekula ultrahotzak* sortzea posible da. Bi atomoen talkak alda daitezke, kanpo eremu magnetiko aldakorra erresonantziatik igaroz. Molekulak osatzeko zenbait Gauseko zabalera-ko Feshbach erresonantzia batean zehar igaroazten da atomoen nahasdura kuantikoa. Lotura energia nahikoa jasotzean molekulen lurrun kuantikoa eratuko da. Oraingoz KRb eta NaK dira gehinbat aztertu diren molekula ultrahotzak. NaK, KRb ez bezala, oinarriko egoeran kimikoki egonkorra da; beraz, oso egokia da materia kondentsatuaren sistemen analogoak sortzeko. NaK-ren Feshbach espektroskopia eta molekulen eratzea posible izan da [12]. Atomo biko molekulek, atomoek ez bezala, urruneko elkarrekintza

tza anisotropoa dute eta beraz erabilgarriak dira sare optikoetan gorputz anitzen problemaren simulazio kuantikoak egiteko, ordenagailu kuantikoaren quantum bita sortzeko eta kimika ultrahotza aztertzeko.

7. KONKLUSIOA: ZIENTZIA ULTRAHOTZA, SIMULAZIO KUANTIKOAREN ARDATZ

Artikulu honetan zientzia ultrahotzaren oinarrizko ideiak aurkeztu dira eta bai azkeneko aurrerapenak ere atomo eta molekulen manipulazioan. Atomoen abiadurak laser bidezko hozketarekin eta lurruntze hozketarekin, nanokelvin ordenako tenperatura baxuetara jaitsi daitezke. Zenbait tranpa magnetiko eta optiko aztertu dira eta azkenik Feshbach erresonantzien bidezko elkarrekintzen kontrol absolutua aurkeztu da.

Fisika atomikoaren aurrerapen hauekin, atomo soilak baino konplexutasun handiagoko sistema makroskopikoak sortu eta iker daitezke; esate baterako, Bose-Einstein Kondentsatuak eta Fermi lurrun endekatuak. Sare optikoekin, naturan aurkitzen diren kristal perfektuak simulatu eta teorikoki aurrean diren fenomeno kuantiko berriak esperimenterki beha daitezke; adibidez, fase-trantsizio kuantikoak, Bloch oszilazioak, Mott/isolatzailer trantsizioa eta abar. Azken batean, Richard Feynmanen *simulazio kuantikoaren* ideia burutzea da: sistema kuantiko sinple bat erabiltzen da konplexuagoak diren beste sistema kuantikoak simulatzeko [14]. Era berean, molekula ultrahotzen eraketak aukera paregabea eskaintzen du erreakzio kimikoak tenperatura baxuetan nolakoak diren aztertzeko eta baita, zergatik ez, kanpo eremu elektrikoekin erreakzio hauek kontrolpean izateko.

Laburbilduz, zientzia ultrahotzak ate berriak irekitzen ditu gorputz-anitzen problema aztertzeko, superjariakortasuna eta supereroaleak eta materialen egoera berriak sortzeko, prozesu kuantikoen aparteko kontrola izateko eta konputazio kuantikoan aurrerapenak egiteko. Atomo ultrahotzen esperimentuak LHC bezalako azeleragailuak baino askoz txikiagoak dira eta hauek mekanika kuantikoa, materia kondentsatua, materialen zientzia, prozesu nuklearrak eta fisika atomikoa uztartzen dira. Aurrerapen itzelak egin dira bai ulermen teorikoan, bai gaitasun tekniko eta esperimentaletan; horrela, datozen hamarkadetan emaitza harrigarriak ugaritu egingo dira, gero eta laborategi gehiago ultrahotzaren misterioetan barneratzen diren heinean.

ERREFERENTZIAK

- [1] HEIKE KAMERLINGH ONNES. 1913. «Investigations into the properties of substances at low temperatures, which have led, amongst other things, to the preparation of liquid helium». *Nobel Lectures*.

- [2] DAVIS K. B., MEWES M. O., ANDREWS M. R., VAN DRUTEN N. J., DURFEE D. S., KURN D. M. eta KETTERLE W. 1995. «Bose-Einstein Condensation in a Gas of Sodium Atoms». *Phys. Rev. Lett.*, **75**, 3969–3973.
- [3] FOOT Chris. 2005. *Atomic Physics*. Oxford University Press.
- [4] PHILLIPS William. 1997. «Laser cooling and trapping of neutral atoms». *Nobel Lectures*.
- [5] COHEN-TANNOUDJI C., DUPONT-ROC J. eta GRYNBERG G. 1992. *Atom-Photon Interactions*. Wiley, New York.
- [6] ASHKIN A. 1970. «Acceleration and trapping of particles by radiation pressure». *Phys. Rev. Lett.*, **24**, 156-159.
- [7] BARRETT M. D., SAUER J. A. eta CHAPMAN M. S. 2001. «All-optical formation of an atomic Bose-Einstein condensate». *Phys. Rev. Lett.*, **87**, 010404-4.
- [8] RAAB E. L., PRENTISS M., CABLE A., CHU S. eta PRITCHARD D. E. 1987. «Trapping of neutral sodium atoms with radiation pressure». *Phys. Rev. Lett.*, **59**, 2631-2634.
- [9] WU Cheng-Hsun eta SANTIAGO Ibon *et al.* 2011. «Strongly interacting isotopic bose-fermi mixture immersed in a fermi sea». *Phys. Rev. A*, **84**, 011601.
- [10] KETTERLE W., DURFEE D.S. eta STAMPER-KURN D.M. 1999. «Making, probing and understanding Bose-Einstein condensates». In M. Inguscio, S. Stringari, and C.E. Wieman, editors, *Bose-Einstein condensation in atomic gases, Proceedings of the International School of Physics Enrico Fermi, Course CXL, Varenna, 7-17 July 1998*, pages 67-176. IOS Press, Amsterdam.
- [11] KETTERLE W. eta ZWIERLEIN M.W. 2008. «Making, probing and understanding ultracold Fermi gases». In M. Inguscio, W. Ketterle, and C. Salomon, editors, *Ultracold Fermi Gases, Proceedings of the International School of Physics «Enrico Fermi», Course CLXIV, Varenna, 20-30 June 2006*. IOS Press, Amsterdam.
- [12] PARK Jee Woo, WU Cheng-Hsun, SANTIAGO Ibon, TIECKE Tobias G., WILL Sebastian, AHMADI Peyman eta ZWIERLEIN Martin W.. 2012. «Quantum degenerate bose-fermi mixture of chemically different atomic species with widely tunable interactions». *Phys. Rev. A*, **85**, 051602.
- [13] GREINER Markus, MANDEL Olaf, ESSLINGER Tilman, HÄNSCH Theodor W. eta BLOCH Immanuel. 2002. «Quantum phase transition from a superfluid to a mott insulator in a gas of ultracold atoms». *Nature*, **415**, 39-44.
- [14] FEYNMAN Richard. 1982. «Simulating physics with computers». *International Journal of Theoretical Physics*, **21(6)**, 467-488.