

Neurketa kuantikoa

Joseba Tobar-Arbulu

Euskal Herriko Unibertsitatea,
644 P.K., 48080 Bilbao.

Abstract

This paper claims that the superposition principle is a principle of nature which applies to single individuals. The principle is responsible for the peculiar interference phenomena that lead to quantum correlations quite different from classical ones.

Sarrera

Idea kuantikoek ezjarraitasuna sortzen dute. Ezjarraitasun honi unitate bat dagokio, Planck-en konstantea halako neurri bat delarik. Kantiare fisiko zenbaitek, zirkunstantzia berezietan balio batzuk bakarrik har ditzake. Kantiare horiek kuantizatuak direla esaten da; kuantoz agertzen baitira. Atomo bateko elektroi baten energia adibidez, kuantoz, dator. Planck-ek, 1900.ean, bere formula famatua proposatu zuen; alegia, $E = h \cdot \lambda$, non h Planck-en konstantea eta λ uhin-luzera baitira. Harez gero, $\hbar = h/2\pi$ agertzen da, bai Heisenberg-en ezberdintasunean eta bai Schrödinger-en ekuazioan. Beraz, \hbar hori gutxienezko mugatzat edo agertzen dela esan daiteke. Jarriatsunari naturak berak jartzen dion muga.

Gainezarmen-printzipioa: Multzo baten edozein egoera beste multzo bateko egoeren gainezarmen bidez errepresenta daiteke. α egoera bat β egoeren gainezarmenez honela errepresentatzen da:

$$\langle \alpha | = \sum_{\beta} \phi_{\alpha\beta} \langle \beta | \quad [1]$$

non $\phi_{\alpha\beta}$ hedakuntz koefizienteak baitira. $\phi_{\alpha\beta}$ honakoa da: alegia, $\langle \alpha |$ egoeran dagoen sistema $\langle \beta |$ egoeran aurkitzeko probabilitatearen anplitudea. Anplitude hori $\langle \alpha | \beta \rangle$ idazten bada, [1] ekuazioa honela agertzen da:

$$\langle \alpha | = \sum_{\beta} \langle \alpha | \beta \rangle \langle \beta | \quad [2]$$

$\langle \alpha | \beta \rangle$ beste era batera interpreta daiteke; alegia, $\langle \alpha |$ egoeran orain dagoen sistema $\langle \beta |$ egoerara ailegatzeko probabilitate-anplitude gisa. [2] ekuazioak honakoa dio: sistema bat egoera batean baldin badago, non α -multzoaren kantitateak neurgarri baitira, β -multzoaren kantitateak $|\langle \alpha | \beta \rangle|^2$ probabilitateaz auresan daitezke.

Demagun $\langle \alpha |$ egoeran dagoen sistema bat dugula. Gainezarmen-printzipioa dela bidez, $\langle \alpha |$ egoera oinarritzko edozein egoeratan heda daiteke. Esate baterako $\langle \beta_1 |$ etan:

$$\langle \alpha | = \sum_i \langle \alpha | \beta_i \rangle \langle \beta_i | \quad [3]$$

$\langle \alpha | \beta_i \rangle$ zenbakiak $\langle \beta_i |$ egoeren probabilitate-anplitudeak dira, zeintzuen bidez $\langle \beta_i |$ oina-

rrizko egoerak $\langle \alpha |$ egoeretan errepresentaturik baitaude.

Egoeren gainezarmen konkretu bat sistemak ingurunearekin daukan elkarrekintzaren bidez sortzen da. Ingurunea gorputz makroskopiko bat izan daiteke (hala nola artifizialki jarritako neurketarako aparatu bat) edo eta berezko kanpoko inguru naturala. Gorputz makroskopiko horri analizatzailea deitzen zaio. Beraz, [3] ekuazioa honela interpreta daiteke: $\langle \alpha |$ egoeran dagoen sistemak analizatzaile batekin topo egin ondoren (β -analizatzailearekin, kasu honetan),

$$\sum_i \langle \alpha | \beta_i \rangle \langle \beta_i |$$

gainezarmen-egoera pasatzen da.

Sistema kuantikoa nolabait $\langle \beta_i |$ egoera guztietan bilakatzen da, $|\langle \alpha | \beta \rangle|^2$, azkenean $\langle \beta_i |$ egoeran sistema aurkitzeko probabilitatea delarik.

Izan bedi $\langle x |$, \underline{x} koordinatuan kokaturik dagoen sistema baten egoera. Izan bedi $\langle s | x \rangle$, $\langle s |$ egoeran dagoen sistema batek \underline{x} koordinatua edukitzeko probabilitate-anplitudea. x , $x+dx$ tartean sistema egoteko probabilitatea hau da: $dW_s = |\langle s | x \rangle|^2 dx$.

Beraz, $\langle s | x \rangle$ ez da probabilitate-anplitudea; baizik eta probabilitate-dentsitatearen anplitudea. Literaturan $\langle s | x \rangle$ uhin-funtzioa da, hau da, $\psi_s(x)$.

$$\psi_s(x) = \langle s | x \rangle$$

$$\text{Beraz, } dW_s = |\psi_s(x)|^2 dx$$

$\psi_s(x)$, s -multzoaren autofuntzio bat da.

$$\psi_\alpha(\beta) = \langle \alpha | \beta \rangle$$

$\psi_\alpha(\beta)$, α -multzoaren kantitateen autofuntzioa (β -errepresentazioan) da.

Einstein eta Borh

Einstein mekanika kuantikoaren lehen etapen (XIX. mendearen azkenetik 1912rarte) buru-belarri sarturik egon zen. Hala ere, teoria kuantikoa osatu zenean (1923tik 1927rarte) kontra egon zen. Einsteinek, dena den, benetako zailtasunak aipatu zituen. Berak hiru kritika-mota egin zizkion teoriari:

(i) objektzio teknikoak, EPR-ren paradoxaren antzekoa edo egoera gerakorrean dagoen objektu batena (e.b. elektroi bat kutxa batean).

(ii) indeterminazio-arazoa: Einsteinek ezin zuen irentsi probabilitateak laburtezin zirela (hau da, azarea objektiboa zela). Einsteinentzat probabilitatea kausarekiko gure ezjakituriaren estalki bat besterik ez zen. Beraz, berak teoria kuantikoa teoria ez-probabilistikoa sakonago batetik ondoriozta zitekeela uste zuen.

(iii) objektibitate-arazoa: Esinsein errealista zen, berak teoriak errealitatea errepresentatzea nahi zuen, eta ez sogile bati agertzen zaizkion egiteak errepresentatzea.

Hiru objektzio horiek Bohr-ekiko eztabaidetan agertu ziren (Einstein et al. 1935; Einstein 1949, 1950, 1953; Bohr 1934, 1949, 1958; Born 1949, 1956, 1971; Heisenberg 1958).

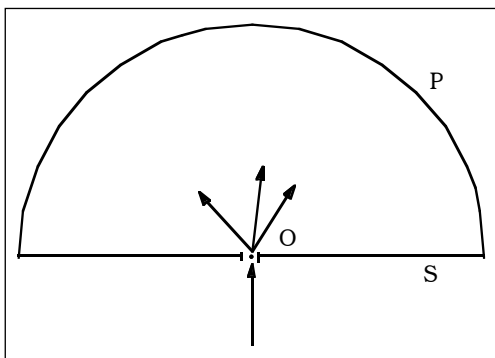
Intelektual-mailan ikusi den eztabaidarik mamitsuen eta sakonenean, ez Bohrrek eta ez Einsteinek, ez zeukaten arrazoi osoa. Gure ustez, Bohr zuzen zebilen teoria kuantikoa probabilistikoa zela zioenean; eta Einstein ere zuzen zebilen teoria fisikoetatik osagai subjektibo guztiak baztertu nahi zituenean. Beraz, teoria kuantikoaren Kopenhage-ko interpretazioari (Bohr, Born, Dirac, Pauli eta Heisenberg-i dagokienari) beste interpretazio bat eman dakiok; interpretazio objektiboa, bere formalismo matematikoa batera aldatu gabe (Tobar-Arbulu 1987).

Mekanika kuantikoa, beraz, nahiz eta probabilistikoa izan, teoria *kausala* da. Teoria

honek kausalitate berri bat sortzen du; kausalitate kuantikoa hain zuzen.

E-P-R-ren paradoxa teoria kuantikoaren alde bihurtu da, Aspect eta bere lankideek egindako esperimentuaren bidez (Aspect et al. 1982). Teoria kuantikoaren arabera, bi objektu denbora batez elkarri eragiten badiote eta gero elkarrengandik aldentzen badira, haue-tariko batean egindako neurketa batek beste-an efektua dauka, nahiz eta elkarrekiko guz-tiz berezirik egon (Parisen egindako esperi-mentuan 12 metrora egon ziren). EPR-ek ukatu egin zuten hau, zeren hori independe-zia fisikoaren kontrako ideia baita. EPR-ren paradoxaren hobenduna von Neumannen proiektzio-postulatua edo uhin-paketearen edo egoera-funtzioaren kolapso-axioma da.

EPR-ren paradoxa baino lehen beste espe-rimentu bat proposatu zuen Einsteinek. Ikus 1. irudia.



1. irudia.

Izan bitez s pantaila bat O zulo txiki bate-kin, eta P filme fotografiko bat esferaardiaren formarekin. Eman dezagun elektroiak O -ra ailegatzen direla eta haue-tariko batzuk O -tik pasatzen direla. O txikia izanik, ψ uhin-fun-tzioa O -n difraktaturik egongo da eta uhin esferiko bat P -rantz hedatuko da.

Teoria kuantikoa indibiduo bati badago-ki, elektroia hasieran uhin-pakete txiki-az deskribaturik bada ere, O -n difraktatu eta gero, uhinak P filme guztia estali behar du.

$|\psi|^2$ -k hau dio; alegia, momentu batean partikula bakar bat leku konkretu batean

dagoela. Beraz, litekeena da partikula batera-ko filmean bi lekuetan edo leku gehiagotan detektatzea. Ondorio honek honakoa adieraz-ten du; alegia, distantziarako ekintza berezi bat dagoela, zeina erlatibitate bereziaren kon-tra baitago.

Argudio hau, hala ere, sasiardugioa da, zeren Einsteinek uhin-paketea nolabait "material" zela uste baitzuen, eta "partikula" nolabait bi lekutan baino gehiagotan egon litekeela. Orain badakigu, jakin, "uhina" ez dela materiala.

Probabilitatea

Einsteinek kontzeptu probabilistikoak erabili zituen higadura browndarra deskribatzeko. Hala eta guztiz ere, berak ez zuen uste azarea objektiboa zenik. (Gogora dezagun bere esae-ra famatua: "Jainkoak ez du datoka jolas-ten".)

Einsteinek probabilitate-interpretazio sub-jektiboari eutsi zion. "Pr (x) = y" antzeko for-mula bat, alegia, "x gertaeraren probabilitatea y da", honela irakurri behar da: "x gertaerare-kiko uste arrazionalaren gradua y da."

Gaur egun, interpretazio subjektibo honez gain beste bi interpretazio ezagutzen dira:

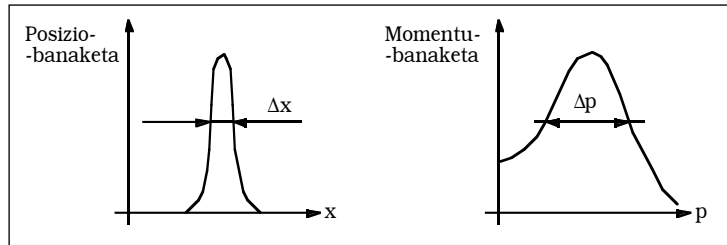
(I) estatistikoa: gertaeren neurrien serie luze-ko maiztasun edo frekuentzia.

(II) propentsio edo joera: gertera baten proba-bilitatea propietate objektiboa dela dioena.

Interpretazio subjektiboaren arabera aza-rea ez da objektiboa: probabilitatea tresna da; ez posibletasun errearen neurria. Interpre-tazio estatistikoa, maiztasuna dugu nagusi, h.d. egindako esperimentuen emaitza. Inter-pretazio honen funtsa positibismoa da. Ikus-puntu errealistatik joeratzat hartu behar da probabilitatea; naturan berez dagoen joera-tzat.

Teoria kuantikoak irauli egin zituen kon-tzeptu klasikoak, probabilitate laburtezinak sortuz. Adibidez, egoerek probabilitate-anpli-tute baten balioak erre-presentatzen dituzte, beren propietate dinamikoek (h.d., momentu linealak, momentu angeluarrak eta spinak)

2. irudia.



probabilitate-banaketak dituztelarik. Gainera, aldagai dinamiko klasikoak berez esanahi bat daukan bitartean, kuantikoak ez. Izan ere, aldagai dinamiko kuantiko bat, \underline{A} , beti egoera-funtzio batekin, ψ -rekin, hartu behar da, $\psi A \psi^*$ dentsitatea eratzeko. Beraz, oro har, \underline{A} -ren erdiko desbidazio estandarra ez da zero izango, h.d., \underline{A} -ren balioak hedatuak izango dira (2. irudia).

Noski, \underline{A} autoegoeran dagoen objektuarekiko, h.d. $\psi \in_{\text{auto}} A$ delarik, A -ren erdiko desbidazio estandarra zero izango da, baina mugapen horri dagokion aldagai konjokatu kanonikoaren hedadura infinitu izango da, Heisenbergen ezberdintasunek diotenez. Beraz, \underline{A} -ren zorrotasunak bere konjokatu kanonikoaren zirriborrotasuna dakar. Indeterminazio hau ez da guztia ez ezagutzearen emaitza, Einsteinek uste zuenez. Alderantziz, ezagutza "osoa" ezinezkoa da, Heisenbergen ezberdintasunek diotenez.

Einsteinek ezin zuen onartu egoera hau: berarentzat teoria kuantikoa teoria estatistikoa zen, multzo bati dagokiona, eta ez objektu individual bakar bati dagokiona. Beraz, berak eta Planckek (Planck 1933) teoria determinista batek, zeinetan objektu batek beti posizioa eta momentua edukiko baititu, mekanika kuantikoaren lekua hartuko zuela espero zuten. (Izan ere, bere azken 25 urteetan eremu-teoria bat eraiki nahi zuen, berau teoria kuantikotik kanpo egongo zelarik. Jakina denez, porrot egin zuen.)

Egoera-funtzioa

Born-en postulatua (Born 1955) ψ egoera-funtzioari interpretazio fisiko bat ematen dio.

Guk honela formulatzen dugu postulatu hori: "Dematun ψ_a \underline{a} objektu fisikoarentzako Schrödingerren emaitza bat dela. Beraz, t denboran, \underline{a} objektua x eta $x + \Delta x$ tartean egoteko probabilitatea $|\psi_a(x,t)|^2 \Delta x$ da." Probabilitatea \underline{a} objektuaren propietate bat da eta denboraren menpekoa. Neurketa batere aipatu ez denez gero, guk ez dugu onartzen Kopenhageko eskolakoez diotena, alegia, probabilitatea \underline{a} objektua Δx aurkitzeko probabilitatea dela, \underline{a} neurtzen denean. Guretzat $|\psi_a(x,t)|^2 \Delta x$, \underline{a} objektua $\underline{\Delta x}$ tartean egoteko probabilitatea da, neurtu ala ez. Hala ere, probabilitate hori ez da propietate absolutua; erlazio bat baizik. Bohrrek behin eta berriz aipatu zuenez, sistema kuantikoaren eta ingurunearen artean dagoen erlazio bat da. (Neurketa ingurune berezi bat baino ez da.)

Bornen printzipioaren bertsio objektibo hau onartzen bada, ulertzekoa da objektu kuantikoez posizio zehatz eta zorrotzik ez izatea. Posizio eragileak ezin dio eman objektuari posizio zehatzik. Teoria kuantikoak dioenez, \underline{a} objektuak psiozioaren probabilitate-banaketa bat dauka, zeina zenbait kasutan zorrotz xamarra izan baitaiteke. Era berean, momentuaren probabilitate-banaketa dauka, $|\varphi_a(p,t)|^2 \Delta p$, non φ_a, ψ_a Fourier-en transformazioa baita. Banaketa hori ere zorrotz samarra izan daiteke zenbait kasutan. Baina, Heisenbergen ezberdintasunen arabera: $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$. Hau da, Δx zenbat eta zorrotzagoa izan, Δp hainbat eta hedatuagoa da.

Teoria kuantikoaren arabera, objektuak ez dira puntuaren antzekoak. Ezta uhinaren antzekoak ere, zeren ψ ez baita eremu fisikoa. Fisikoki, ψ probabilitate-anplitude bat da. Beste hitz batez esanda, objektu kuantikoak ez dira ez partikulak eta ez uhina. *Sui generis* dira; "partikuluhin" edo dei ditzakegunak.

Determinismo klasikoa eta indeterminismo kuantikoa

Kopenhageko eskolakoen ustez, mekanika kuantikoa egoera esperimentalei dagokie. Ez da sogilerengandik independente den teoria. Gure ustez, hala ere, teoria hau objektu atomikoei buruzko teoria objektiboa da, edozein sogilerengandik kanpokoa delarik. (Esate baterako, Sirius izarrean bi elektroik, fotoi, nukleo edo atomoren kolisioak adierazten dituen).

Kopenhageko eskolakoen ustez, teoria kuantikoa ez-determinista da. Ez-determinismoa probabilismoarekin parekatzen bada, mekanika kuantikoa ez-determinista da, zeren teorian probabilitateak (hobeki esanda, probabilitate-banaketak) agertzen baitira. Probabilitate horiek, dena dela, funtsezkoak eta laburtezinak dira. Probabilitatea era subjektibostaz (gaizki) interpreta daitekeenez gero, ez-determinismo hark ez du esaten natura bera azarekoa denik. Honi erantzun egoki bat emateko, probabilitateak objektiboki interpretatu behar dira, hau da, joera errealizat, eta determinismo kontzeptua birfindu egin behar da lege probabilistikoak barne eduki ditzan. Determinismoaren definizio berri hau onartzen bada, teoria kuantikoa determinista (nahiz eta ez erabat kausala) da.

Demagun edozein autobalio $A_{er} u_k = a_k$ dugula. A balio dinamiko baterako A_{er} eragileak objektu fisiko baten espazioko egoera adierazten du. Pentsa dezagun, gauzak errazteko, a_k autobalioak ez-endekatu direla. Kopenhageko interpretazioaren arabera, a_k A aparatu egoki batekin sogile batekin neurtzen dituen balioetako bat da. Hala ere, goiko formula interpreta daiteke Einsteinen errealismoaren bitartez. Beraz, a_k errealki A -ren balio posible bat dela interpretatzen da, A neurtu izan ala ez. A_{er} -aren U_k autofuntzioak laguntzaile matematikoak dira, ψ egoeran dagoen objektuaren A aldagaiak a_k balioa probabilitatetzat daukala aidaeraziz. (Probabilitate hau konputatzeko, egoera-funtzioa A_{er} autofuntzioetan hedatu behar da. A aldagaiak a_k balioa probabilitatetzat daukala, hedaduraren k -garren koefizientearen karratua da.)

Hasierako gainezarmen-egoera, $\psi = c_1\psi_1 + c_2\psi_2$ neurketan kolapsatzen da ψ_1 egoera $|c_1|^2$ probabilitatearekin, edo ψ_2 egoera $|c_2|^2$ probabilitatearekin. (Probabilitate-anplututeen gainezarmen hau guztiz garrantzitsua da teoria kuantikoan. Gainezarmen-printzipioa, probabilitateak ez eta anplituteak batzen dituen, naturaren lege bat da. Printzipio hau koerlazio kuantikoen erantzulea da.)

Lehenago aipatutako legea, hau da,

$$A_{er} u = a_k u_k,$$

lege-eskema hobeki esanda, estatistikoa da, zeren, estatu-funtzioarekin batera, A aldagai dinamiko bakoitzaren probabilitate-banaketak ematen baititu. Probabilitate banaketa horiek kanpoko ingurunearen menpeko dira. Bohrrek zioenez, propietate kuantikoak erlazioak dira, ez dira propietate absolutuak. Propietateok sistema kuantikoaren ingurunea hartzen dute kontutan. Gainera, objektu kuantikoek batzuetan aldagai dinamiko zorrotzak dituzte, balio bakar bat edukiz.

Objektibotasuna

Bohrrek (1934, 1949, 1958) behin eta berriz esan zuen mekanika kuantikoak iraultza epistemologikoa lortu zuela, hots, sogilearengandik libre den irudi klasikoaren ordez sogilearengan kokatutako ulermen berri bat jarri behar zela. Kopenhageko eskolak subjektu eta objektuaren ohizko bereizketa ukatu zuen bitartean, Einstein, errealista izanik, behin eta berriz aritu zen (Einstein 1949) irudizko esperimentuak asmatzen, teoria kuantikoak zenbait akats zeukala frogatzeko. Bohrrek (Bohr 1949) erantzun egin zien, behin eta berriz, Einsteinek asmatutako probei.

Von Neumann-ek (1932-1955) objektu, sogile eta neurtzeko aparatuaren arteko bereizketak nahierarakoak zirela esan zuen, zeren nolabait esperimentatzailea hartu behar baitzen kontutan. von Neumannen ustez, teoria kuantikoa kontrol esperimentaletik kanpo

dauden objektuei buruzkoa da. Von Neumannentzat, \underline{A} aparatua bidez neurtzeko sistema kuantikoaren egoera-funtzioak ez du betetzen Schrödingerren ekuazioa; baizik eta proiektatu egiten da \underline{A} errepresentatzen duen erabilearen autobalio batera. Proiekzioa sogilearen bitartez gertatzen da.

Von Neumannen formulazioa erabili izan da mekanika kuantikoaren ez-determinismo eta subjektibotasuna argudiatzeko: ez-determinismoaren zeren ezin aurrean baitaiteke proiektzio zehatza; subjektibismoaren zeren proiektzioa gertatzen baita sogilearen nahiaz. (Von Neumannen formulazioa, hala ere, era objektiboz interpreta daiteke. Ikus Tobar-Arbulu (1987). Bide honetan, Einsteinen errealismoa gordetzen da, baina Einsteinek ukatuko zukeen laburtezinezko probabilitateen kontzeptua gordez.)

Gaur egun, Einstein eta Bohrren arteko irudizko esperimenduak erreal bihurtu dira (Aspect et al. 1982). Egun badakigu, jakin, teoria kuantikoan probabilitateak funtsezkoak direla, beren interpretazioa egokia joerazkoa izanik.

Neurketa-prozesua

Neurketa-prozesuan hiru etapa bereiz daitezke:

(i) eratzeko tapa, non sistema egoera konkretu batean antolatzen baita, hasierako egoera berau.

(ii) lan egiteko etapa, non sistemak eta analizatzaile konkretu batek elkarri eragiten baitiote, sistema gainezarmen-egoerara pasatuz; eta

(iii) detektatzeko etapa, non sistema gainezarmena eratzten duten oinarritzko estatu batean erregistratzen baita. (Azken etapa honetan sistemak gorputz makroskopiko batekin, hots, detektagailu batekin elkarrekintza bat dauka).

Laburtzeko, eratzeko etapa kontutan hartzen ez badugu, neurketa-prozesuaren eskeema honela errepresenta daiteke:

Demagun sistema $\langle \alpha |$ egoeran dagoela. Gainezarmen-printzipioa dela bide, $\langle \alpha |$ egoera heda daiteke oinarritzko egoeren bidez. Esate baterako, $\{ \langle \beta_i | \}$:

$$\langle \alpha | = \sum_i \langle \alpha | \beta_i \rangle \langle \beta_i |$$

Analizatzaile batekin elkarrekintza bat edukiz gero, $\langle \alpha |$ egoeran dagoen sistema

$$\sum_i \langle \alpha | \beta_i \rangle \langle \beta_i |$$

gainezarmen-egoera bilakatzen da. $|\langle \alpha | \beta_i \rangle|^2$ azkenean $\langle \beta_i |$ egoeran sistema aurkitzeko probabilitatea da.

$$\langle s | \rightarrow \sum_i \langle s | \beta_i \rangle \langle \beta_i | \rightarrow \langle \beta_i |$$

non (1) geziak lan egiteko etapa eta (2) geziak detektatzeko etapa errepresentatzen baitute.

$$\sum_i \langle s | \beta_i \rangle \langle \beta_i | \rightarrow \langle \beta_i | \quad [1]$$

[1] prozesua "uhin-paketearen laburtze" bezala ezagutzen da. Horrela, analizatzaileak egoeren gainezarmen definitua sortzen badu, detektagailuak gainezarmen honen egoera bat proiektatzen du.

Mekanika kuantikoan ezin da baztertu sistema beraren ingurunearekiko elkarrekintza. Detektagailuak sistema dektektatu baino lehen sistema

$$\sum_i \langle s | \beta_i \rangle \langle \beta_i |$$

gainezarmen-egoeran dago, ez edozein $\langle \beta_i |$ egoeratan. Proiekzio hau ezin uler daiteke eredu klasikoaren bitartez.

Egoera bakoitzari potentzialtasun-multzotzat dagokio. Neurketan hauetariko bat gauzatzeko da. Prozesu hau atzeraezina da. Neurketa gertatzen den bezain laster, hasierako

egoera koalitatiboki aldatzen da: egoera berria sortzen da. Neurketan litekeenaren eta gauzatzearen arteko bereiztasunak parte hartzen du. Probabilitate-gainezarmenaren ordez, gauzatutako aukera bat dago. Jauzi honen izaera atzeraezina eta kontrolaezina da. Potentzialtasun horiek probabilistikoak dira. Naturako legeek ezaugarri probabilistiko hau daukate. Mekanika kuantikoaren eta fisika klasikoaren arteko kalitatezko ezberdintasuna honetan datza; alegia, probabilitateen arteko erlazioek nola funtzionatzen dutenean. Mekanika kuantikoan garrantzitsuena ez baita probabilitatea; bere anplitutea baizik, hau da, uhin-funtzioa. Honek probabilitateen interferentziara darama, efektu hau mekanika klasikoan agertzen ez delarik.

Egoera kuantikoak uhin-funtzioek deskribatzen dituzte. Egoera kuantikoa errealitate fisikoa da, nahiz eta bera kontzeptu klasikoez ezin deskriba daitekeen.

Bohrren usten (Bohr 1949) sistema fisiko baten egoera erlazio bat da; ez propietate absolutu bat. Erlazio honek ingurunea hartzen du kontutan; bereziki, aparatu neurketan. Einsteinen kontra (Einstein, Podolski, Rosen 1935), Bohrrek sistema kuantikoen egoera-deskribapen guztiak sistema eta neurtezko aparatuen erlazioak edo propietate erlatiboak zirela mantentzen zuen; beraz, neurgailuen menpekoak. (Cini-k ere (Cini 1893) gauza bera azpimarratu du berriki.)

Proiekzioa gertatzen da (von Neumann 1932-1955). Mikro/makro elkarrekintza dela bide, Schrödingerren ekuazioa bapatean aldatzen da. Uhin-funtzioa ez da aldatzen Schrödingerren ekuazioaren arabera. (3. irudia).

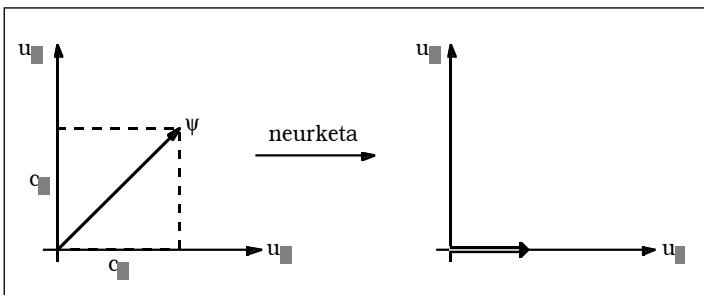
Proiekzio-postulatuak dioenez, hasierako sistemaren ψ egoera autoegoera batera proiektatzen da neurketaren bitartez:

$$\psi = \sum c_k u_k \rightarrow c_i u_i$$

Uhin-paketearen kolapsoa era errealistan interpreta daiteke (Fock 1957). Uhin-funtzioaren bapateko aldaketa ez dator bat edozein ekintzaren abiadura finituarekin. Baina kolapsoa ez dagokio ekintza baten hedakuntzari; probabilitate-problema bateko formulazioaren aldaketari baizik.

Egindako esperimentuan, potentzialki emaitza posible bat, (hasierako uhin-funtzioak barne daukana berau) gauzatzen da. Probabilitate-arazoak birformulatzea, gertatutako emaitza kontutan hartzean datza; datu berriak erabiltzean, alegia. Datu berriei uhin-funtzio berri bat dagokio.

Kontsiderazio hauek mekanika kuantikoa interpretatzen potentzialki posiblea eta gertatua bereiztea zer garrantzitsu den erakusten dute. Erakutsi ere egiten dute uhin-funtzioa ez dela eremu erreal bat eta bere bapateko aldaketa (proiekzioa) ez dela eremu baten aldaketa antzeko prozesu fisiko bat. Prozesu fisiko bat benetan elkaturik dago egindako esperimentuarekin, baina prozesu horrek zeharka baino ez dio uhin-funtzioari eragiten; probabilitate-arazo birformulatza behartuz, alegia (Fock 1957, 655 or.). Bi objektuen elkarrekintzak (mikrosistema eta aparatuarenak, edo eta bi mikrosistemen artekoa izan daitekeenak) kausatzen du probabilitateen aldaketa edo uhin-paketearen laburtzea edo kolapsoa.



3. irudia.

Erlatibitate kuantikoa

Egoera kuantikoak erlaziozko ezaugarri dira; sistema kuantikoaren inguruneari dagozkionak hain zuzen. Hauxe da Fock-ek (Fock 1959) neurketaren bideekiko erlatibitatea izendatu zuena. Gure ustez, hala ere, erlatibitate berri hau inguruko giro fisikoarekiko da. Erlatibitate honek, errealitate fisikoa erreferentzi marko fisiko batean hartu behar dela esan nahi du. Teoria kuantikoa potentzialtasunekin aritzen da. Uhin-funtzioak potentzialtasunak deskribatzen ditu, zeintzuk emandako baldintzetan, hots, marko fisiko konkretuan, sistema fisiko egoki bati jarraitzen baitzaizkio.

Neurketa batean, lehen esan dugunez, hiru etapa bereizten ditugu. (Neurketa batek elkarrekintza bat behar du. Dena den, horrek ez du esan nahi elkarrekintza guztiak neurketa direnik). Lehen etapan sortzen diren potentzialtasunak —sistema egoera batean erazten denean— azken etapan gauzatzen dira; sistema benetan detektatzen denean. Uhin-funtzioak emandako baldintzetako sistemari dagozkion potentzialtasunak deskribatzen ditu. Objektu baten barneko propietateek eta kanpoko ingurugiroaren baldintzek ematen dute objektu horren portaeraren probabilitatea. Probabilitatea, (zeina denboraren menpekota baita) objektu indibidualari dagokio, ez multzo bati, eta bere posibilitate edo ahalbide potentzialak deskribatzen ditu. Probabilitatea objektuaren portaeraren frekuentzian agertzen da, esperimenteren bidez neurtzen denean.

Dirac-en ustez (Dirac 1967), sistema partzialki autobalio bakoitzean dago, ideia klasikoetan imajina ezin daitezkeen bide batez. Dirac-ek (Sovay 1928) zioenez, teoria kuantikoak denboraren menpekota uhin-funtzio baten bitartez, ψ , deskribatzen du egoera bat. ψ funtzioa t_1 denboran heda daiteke ψ_n uhin-funtzioak c_n koefizienteak dituen serie batean. $t > t_1$ denboran uhin-funtzio horiek ez diote elkarri interferentziarik egiten. Gero naturak aukera bat egiten du eta ψ_n aukera-


tzen du, $|c_n|^2$ probabilitatearekin. Aukera honek etorkizuneko egoeraren garapena determinatzen du.

Schrödingerren ustez (Schrödinger 1978), ψ ψ^* sistemaren konfigurazio-espazioan pisu-funtzio antzeko bat da. Sistemaren uhin-konfigurazioa zinematikoki posible diren puntu mekanikoen konfigurazio guztien gainezarmena da. Horrela, puntu mekanikoen konfigurazio bakoitzak benetako uhin-mekanikoen konfigurazioari laguntzen dio zenbait pisurekin, zeina prezeski ψ ψ^* delakoak ematen baitu. Paradoxak atsegin badira, sistema aldi berean, zinematikoki imajina daitezkeen posizio guztietan existitzen dela esan liteke, baina ez “pisu berean” posizio guzti horietan (Higidura makroskopikoan, pisu-funtzioa praktikan posizioen tarte txiki batean bildurik dago.)

Konfigurazio-espazioa ez da hiru dimentsioko espazio erreala. Uhin-funtzioak sistemaren egoeren joera determinatzen du, hau da, egoera posiblei pisuak ematen dizkie. Joera hau ez dagokio probabilitate-kalkulu klasikoari. Prezeski probabilitate-mota berri hauek dira mekanika kuantikoaren ezaugarri garrantzitsuenetarikoa bat.

Egoeren gainezarmen definitu bat sistemak eta bere inguruak elkarri eragitean sortzen da. Ingurunea objektu makroskopiko bat izan daiteke (zeina artifizialki egina edo kanpoko berezko baldintzen parte bat baita).

Gainezarmen-printzipioa, probabilitateen ordean anplituteak batzearen erantzule dena, naturaren lege bat da. Printzipio hau interferentzi fenomeno berezien erantzule da, zeintzuek koerlazio kuantikoak fisika klasikoan agertzen ez direnak baitakartzate.

Esan bezala, teoria kuantikoan probabilitateak oinarritzkoak eta laburtezinak dira. Indibiduo bakoitza jeneralean autoegoeren gainezarmen batean dago. Gertaera posibleak gauzatzea egoera konkretuaren menpekota da. Beraz, teoria kuantikoa potentzialtasunekin aritzen dela esan daiteke eta potentzialtasun horiek salbuespenez bakarrik gauzatzen dira, hots, neurketaren bitartez. 

Bibliografia

- ASPECT, A. et al. (1982) Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers, Physical Review Letters, 49 bol. 25. zk., 1804-1807. orr.
- BOHM, D. (1951) Quantum Theory. New York: Prentice-Hall.
- BOHR, N. (1934) Atomic Theory and the Description of Nature. Cambridge: Cambridge University Press.
- (1949) Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics. Schilpp argit.
- (1958) Atomic Physics and Human Knowledge. New York: Wiley.
- BORN, M. (1949) Natural Philosophy of Cause and Chance. Oxford: Clarendon.
- (1955) Statistical Interpretation of Quantum Mechanics, Science, 122 bol., 3712. zk., 675-679 orr.
- (1956) Physics in my Generation. Londres: Pergamon.
- (1971) The Born-Einstein Letters. New York: Walter.
- CINI, M. (1983) Quantum theory of measurement without wave packet collapse, Novo Cimento, bol. 73 b, 1. zk.: 27-55. orr.
- DIRAC, P. (1967) Principles of Quantum Mechanics. Oxford: Clarendon.
- EINSTEIN, A. (1949) Autobiography. Schilpp argit.
- (1950) Out of my Later Years. New York: Citadel.
- (1953) Scientific Papers Presented to Max Born delako liburuan. New York: Hafne.
- EINSTEIN, A. et al. (1935) Can quantum-mechanical description of reality be considered complete? Phys. Rev., 47: 770-780. orr.
- FOCK, V.A. (1957) On the interpretation of quantum mechanics, Czechoslovak Journal of Physics, 7: 643-656. orr.
- HEISENBERG, W. (1958) Physics and Philosophy. New York: Harper.
- PLANCK, M. (1933) Where is Science Going? Londres: Allen & Unwin.
- Schilpp, (ed.) (1949) Albert Einstein. Philosopher-Scientist. Illinois: Evanston.
- SCHRÖDINGER, E. (1978) Collected Papers on Wave Mechanics. 2. argit. New York: Chelsea.
- Solvay (1928) Electrons et Photons. Paris: Gauthier-Villars.
- TOBAR-ARBULU, J.F. (1987) Mekanika kuantikoaren bertsio objektibo baterantz, Elhuyar, 13. tomoa, 2. alea, 89-106. orr.
- VON NEUMANN, J. (1932-1955) Mathematical Foundations of Quantum Mechanics. Princeton: Princeton University Press.