

Mecanica reală a entanglementului cuantic

Despre realism și localitate

Laurențiu Mihăescu, 12 iunie 2024

Revizia 1.0

Putem oare să înțelegem natura la scară cuantică în termenii mecanicii clasice și să explicăm fenomenele specifice acesteia prin prisma realismului local?

Cuprins

1. Paradigma granulară
2. Modelul spinului mediat
3. Entanglementul electronilor
 - 3.1. Spinul electronilor
 - 3.2. Electroni corelați
4. Entanglementul fotonilor
 - 4.1. Spinul fotonilor
 - 4.2. Fotoni corelați
5. Concluzii
6. Referințe
7. Acronime și convenții

1. Paradigma granulară

Pentru a putea înțelege și explica ce se întâmplă în lumea cuantică, pentru a putea justifica legile și fenomenele ei specifice, un demers perfect rațional ar fi să coborâm pe scara dimensională până găsim cele mai mici lucruri posibile, acele „piese” primordiale ce ar putea compune toate structurile cuantice cunoscute și care ar trebui să interacționeze în modul cel mai simplu. Urmând această cale firească am reușit să conturez un model minimal [1, Cap. 3.2] și pentru mediul lor elementar absolut, cumulând funcționalitatea acestora într-un set de norme de bază: *postulatele și legile granulare* [1, Cap. 3.1 și 4]. Universul cuantic este descris acum în mod coerent ca fiind o reflexie și o rezultată a unei mecanici minimale ce se situează la o scară extrem de mică (subcuantică), acolo unde se atinge rezoluția dimensională minimă din natură. Nivelul granular, căci despre el este vorba în acest model, are o serie de proprietăți speciale [1, Cap. 3] date de un *fluid perfect* care umple tot spațiul tridimensional. Acest fluid perfect este format dintr-un număr practic infinit de componente infinitesimale identice, *granulele*, și astfel poate fi considerat *omogen și izotrop* de la o anumită dimensiune în sus. În fluidul granular se află sursa tuturor regulilor care guvernează mișcarea, interacțiunea și transformarea obiectelor cuantice, dar și suportul pentru propagarea tuturor câmpurilor cunoscute. Cum orice structură cuantică (atât particule cât și câmpuri) este compusă din granule spațiale, apare imediat întrebarea dacă în zonele cu mari concentrări de materie obișnuită nu este afectată perfectă omogenitate a fluidului spațial și dacă nu se schimbă unii parametri ai acestuia. Răspunsul a fost formulat în [2, Cap. 11.4], acolo unde am prezentat modul în care mediul granular se reconfigurează [2, Cap. 11.5] în prezența materiei dense (corpuri cerești de exemplu) și cum se modifică una din proprietățile lui importante - *absolutul local* – odată cu variația intensității fluxurilor granulare locale. Ambele zone dimensionale, atât cea cuantică cât și cea macroscopică, sunt afectate în mod implicit de fluctuațiile și neuniformitatea acestor fluxuri granulare gravitaționale [2, Cap. 2.4.1]; astfel, variația acestor fluxuri generează un nivel intermediar de granularitate în fluidul spațial local. Situat între dimensiunea granulară și cea cuantică, acest nivel supra-granular va determina de fapt toate particularitățile mecanicii din zona respectivă.

Fluidul granular asigură transferul continuu de impuls mecanic (atât prin fluxurile lui cât și prin câmpurile propagate) spre toate obiectele cuantice, asigurându-le acestora deplina stabilitate în timp. Din cauza acestui mecanism de transfer continuu al momentului elementar, toate obiectele cuantice *compacte* capătă o mișcare intrinsecă permanentă de tip rotațional care se suprapune peste cea

variabilă de tip translațional [1, Cap. 6.1]; privite la scara cuantică, aceste mișcări determină o caracteristică comportamentală specială ce este specifică tuturor particulelor (atât elementare cât și compuse), și anume *dualismul undă-corpusul*. Odată ce am stabilit aceste trăsături majore ale lumii cuantice, apare imediat problema dificilă a modului în care putem să interacționăm cu aceasta, a modului în care putem să o observăm și în final să-i măsurăm acele caracteristici stranii menționate mai sus. La nivel de principii, toți fizicienii sunt conștienți de faptul că sondarea și măsurarea universului microscopic se poate face tot cu ajutorul unor sisteme bazate pe obiecte și câmpuri cuantice, chiar dacă acestea sunt înglobate în dispozitive sau aparate de măsură macroscopice. În consecință, dincolo de aspectele de ordin tehnic, două tipuri de limitări vor apărea în cadrul acestui demers:

1. Dacă luăm în considerare dimensiunile nenule ale tuturor particulelor și mișcările lor ondulatorii intrinseci, putem estima că rezultatele unor măsurători de poziție asupra acestora vor avea în mod implicit o precizie limitată. Mai mult, dacă am restrânge poziția unei particule la un domeniu mai îngust de valori, incertitudinea asupra unei mărimi pereche – momentul – va crește în același raport. Acest balans de *incertitudine* care există pentru unele mărimi fizice pereche (Principiul lui Heisenberg) este o consecință directă a dualității undă-corpusul din domeniul cuantic și determină în final un tip de limitare a gradului nostru de cunoaștere pentru fenomenele de la această scară.
2. Orice măsurătoare s-ar efectua, chiar dacă va avea un rezultat afectat de omniprezenta probabilitate, aceasta necesită o *interacțiune* cu obiectul sau sistemul cuantic măsurat. Rezultatul va fi o reflectare cât se poate de fidelă a stării probabile pe care obiectul o avea înaintea momentului măsurătorii, dar starea respectivă va fi perturbată, se va schimba în urma acestui eveniment.

Remarcă. Dualitatea particulelor este o caracteristică permanentă; tipul exact de proprietate aleasă pentru măsurare - și implicit configurația concretă a aparatului de măsură folosit - va determina însă ce latură a acestei dualități va fi relevată după interacțiune.

Atât timp cât mișcările intrinseci ale particulelor de orice fel sunt dictate la nivel granular, vitezele de rotație internă și externă pot avea valori luminale sau superluminale – dar rămân totuși sub limita maximă C . Pentru orice tip de

măsurătoare, adică pentru o interacțiune cu o astfel de particulă, este necesar să treacă o anumită perioadă de timp; de exemplu, un schimb de energie efectuat pentru măsurătoare nu este instantaneu. Chiar și în cazul unor mărimi fizice cu valori cuantizate, rezultatele oricăror măsurători nu pot fi decât niște medii temporale ale unor parametri ce au variat continuu, în mod 'analogic', niște integrări ale valorilor lor instantanee avute pe toată durata interacțiunii. Să luăm drept exemplu spinul unei particule, momentul cinetic intrinsec pentru care paradigma granulară [1, Cap. 3] presupune o mișcare de rotație cât se poate de *reală*, specifică respectivului tip de structură cuantică. Nu vom putea afla niciodată care este poziția *curentă* a particulei pe orbita proprie sau care este orientarea *instantanee* a planului acestei orbite; totuși, dacă particula are sarcină electrică, un anumit tip de interacțiune ne va putea indica o direcție pentru viteza unghiulară, o valoare globală pentru mișcarea ei de rotație intrinsecă. Dacă o precesie suplimentară s-ar suprapune peste mișcarea proprie a particulei, aceasta nu va adăuga la incertitudinea măsurătorii spinului datorită medierii temporale despre care am vorbit. Transferul permanent de moment mecanic granular stabilește toate constantele fizice fundamentale de la nivel cuantic [2, Cap. 9]; așa se conturează *proprietățile*, stranii uneori, ce definesc obiectele cuantice și așa apare chiar *cuantizarea* unor mărimi fizice ce caracterizează procesele din acest microunivers. O întrebare nouă se poate pune acum, și anume dacă am putea îmbunătăți cunoașterea tărâmului cuantic printr-o remodelare a parametrilor afectați de probabilitate, pe o integrare a lor într-o construcție mediată, pseudo-deterministă, ce să corespundă tuturor măsurătorilor fizice - dar care să permită o interpretare diferită, poate bazată pe realism, a mai multor rezultate experimentale.

2. Modelul spinului mediat

Văzută la nivel granular, o particulă elementară poate avea, pe lângă mișcarea proprie de rotație, și o precesie suplimentară ce este cauzată de interacțiunea cu câmpurile din jur sau de zgomotul cuantic [1, Cap. 6] și care posedă un moment unghiular (similar cu cel de tip orbital) propriu. Având în vedere această mișcare mecanică duală, de tip *clasic*, se poate formula oare un model simplificat pentru spin care să treacă peste aspectul ondulatoriu propriu obiectelor cuantice și să ajungă mai aproape de o caracteristică intrinsecă ce se reflectă direct în interacțiunile acestora? Adică, odată ce am *integra* mișcările de precesie primară și secundară într-un parametru de tip spin clasic, nu ne-am putea oare apropia de o oarecare predictibilitate în mișcarea particulelor, care să aducă într-un final

realism și localitate [11] în universul cuantic? Și nu am putea îngloba unele variabile ascunse în valoarea medie a unor astfel de proprietăți și astfel să fim ajutați în mai buna interpretare și înțelegere a fenomene cuantice, încercând totuși să nu negăm principiile MC? Și, mai mult, nu am putea să mutăm tot conceptul de *superpoziție* din descrierea discretă a stărilor cuantice mai aproape de unul gen *distribuție* cu valori continue, în care echivalentul colapsului funcției de undă petrecut în urma interacțiunii să nu mai fie alegerea unei anumite stări cuantice, ci relevarea acesteia ca un *prag* ce a fost depășit de o anumită valoare medie?

În acest scop voi încerca acum să construiesc un model simplu pentru un nou vector spin – \vec{S} , *spinul mediat*, adică un spin căruia i s-ar observa și media direcția pe o anumită durată de timp. Se vor lua în considerare atât atributele reale ale mișcării granulare caracteristice particulelor, cât și cuantizarea lor specifică. Și încep prin analiza a două cazuri particulare reprezentative: rotația unui fermion – *electronul* - și a unui boson - *fotonul*, iar apoi voi explica entanglementul acestor particule din perspectivă mecanicistă, granulară.

3. Entanglementul electronilor

3.1. Spinul electronilor

Am văzut [1] că acest tip de particulă discoidală efectuează în mod real o mișcare de rotație orbitală, așa ca în Figura 1a, în afară de cea în jurul axei proprii ($\vec{\omega}$). Sunt necesare două rotații complete (720°) pentru ca electronul să ajungă la orientarea inițială, de unde și spinul semiîntreg, sau $\hbar/2$, atribuit de MC. Simetria spațială face ca această mică mișcare orbitală să poată fi descrisă prin momentul unghiular al unei *singure* rotații, vectorul \vec{S} . Într-o abordare simplistă observăm că proiecția spinului pe direcția momentului \vec{p} (așa-zisa helicitate) va putea avea doar două direcții – și asta pentru că particula se poate roti numai *în același sens* sau *în sens invers* acelor unui ceas față de direcția ei de înaintare. Rezultă de aici că are perfect sens să cuantizăm proiecțiile acestui vector pe axele unui sistem de referință, cu valorile de $+1/2$ și respectiv $-1/2$. Dar spinul instantaneu, ca vector perpendicular pe planul descris de mișcarea proprie de revoluție a particulei, are o direcție variabilă în timp; dacă îi atribuim o magnitudine *constantă*, vârful acestuia poate astfel ocupa *aproape* toate punctele de pe suprafața unei sfere cu centrul situat pe traiectoria axială. Planul orbital este prin urmare variabil orientat în timpul revoluției particulei, fiind parcurs în sensul acelor ceasului sau în sens invers; chiar dacă particula mai capătă o mișcare de precesie secundară (sau un

wobble *suplimentar*), sensul rotației ei globale nu se va schimba. Și dacă asociem toată această rotație complexă – o spirală dublă ca traiectorie - cu spinul instantaneu, vectorul cu care îl vom reprezenta se va înscrie *cel mult* într-o zonă spațială *semisferică*. Aceasta este rațiunea introducerii unui spin ce să fie extins pe durata mai multor revoluții primare, spinul mediat \tilde{S} . Direcția medie a acestuia pe durata respectivă va avea astfel o orientare practic constantă, ce nu va depinde de variațiile mișcării de rotație a particulei (pe care o putem compara destul de bine cu evoluția unui titirez ce se învâрте și capătă și o mișcare de precesie când este supus unui mic cuplu de forțe externe – unei torsiuni). Vectorul spin mediat al electronului are deci:

- o orientare dată de medierea geometrică a *distribuției spațiale* pe care o au vectorii moment unghiular instantaneu într-o zonă semisferică (în interiorul unghiului solid la centru de valoare $\Omega = 2\pi$ sr)
- originea în centrul sferei de rază $r = s$ și vârfurile pe suprafața acesteia
- o magnitudine de valoare constantă, $s = +1/2$, adimensională
- proiecții cu valori continue pe axele unui sistem de referință

Paranteza 1. Datorită rotației intrinseci a particulei și a oscilațiilor ei suplimentare, parametrii ce-i caracterizează mișcarea au valori instantanee variabile; pe durata nenulă a unei interacțiuni, totuși, numai valoarea lor medie va conta – și acest lucru validează de fapt modelul spinului mediat.

Paranteza 2. Electronul poate fi privit chiar și de mai „sus”, ignorând mișcărilor lui intrinseci și atribuind proprietăți fizice unei așa-zise entități punctiforme – așa cum face MC. Dar este necesar să stabilim totuși care este sursa acestor proprietăți și să folosim descrieri potrivite pentru acestea, astfel încât lumea cuantică să capete sens și să fie abordată în mod uniform.

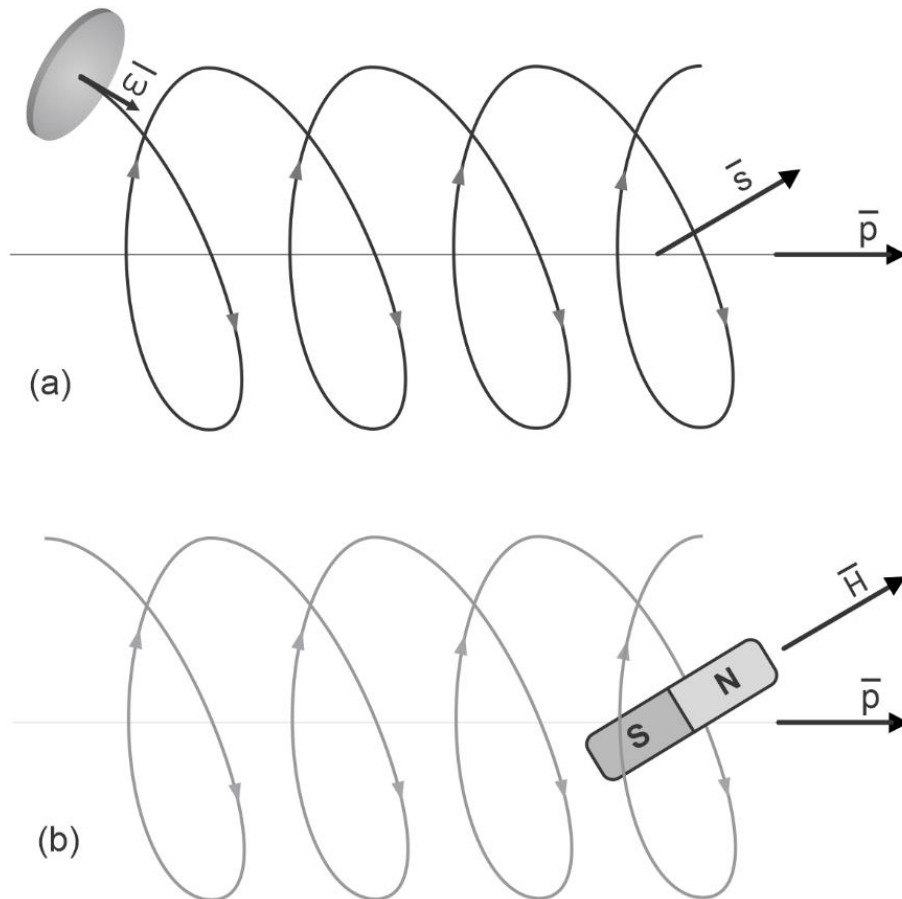


Figura 1

3.2. Electroni corelați

Interpretarea granulară pentru sarcina electrică [1, Cap. 6.3] ne permite să afirmăm că momentul magnetic propriu al unui electron este datorat rotației intrinseci a acestuia – fenomen similar cu generarea unui câmp magnetic de către curentul electric ce trece printr-o spirală a unei bobine (electrofotonii emiși din poziții distincte ale acestei orbite proprii au o influență asupra altor particule încărcate, curbându-le traiectoria în același mod ca și particula în mișcare relativă globală). Așa cum putem avea doar două sensuri posibile de rotație față de direcția globală de deplasare, momentul magnetic va avea și el două valori discrete (Figura 1b). Variațiile de câmp magnetic ce se produc din cauza rotațiilor intrinseci vor avea, la rândul lor, o direcție mediată în timp - pe care o putem considera aproape identică cu direcția medie a spinului de mai înainte (există un cuplaj între ele). Acesta este și motivul pentru care putem 'măsura' direcția spinului unui electron prin plasarea acestuia într-un câmp magnetic neomogen,

ca în experimentul Stern-Gerlach [6]. Acest experiment demonstrează doar că momentului unghiular al electronului este *cuantizat*; interacțiunea particulei cu câmpul magnetic neomogen pe o anumită direcție spațială nu este o măsurare propriu-zisă a direcției spinului, ci este doar un proces care ne indică faptul că spinul există și că magnitudinea lui este discretă, având doar una din două valori posibile (*up* și *down* de exemplu) pe orice direcție am alege. Spinul, cu toate că are o direcție bine definită la orice moment am alege, nu poate fi măsurat în acest mod pe niciuna din axele unui sistem de referință.

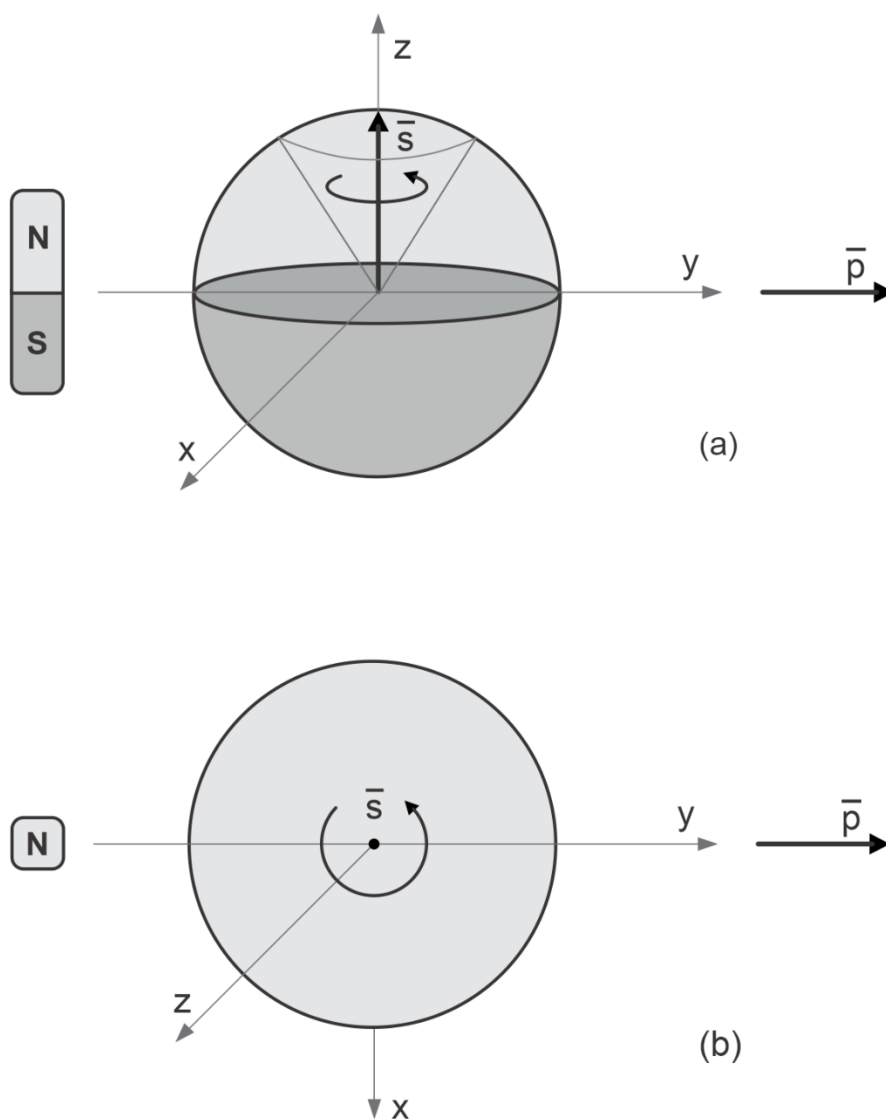


Figura 2

Considerând toate aceste lucruri de mai sus și menținându-ne în perspectivă granulară, vom putea rezuma acum cele mai importante aspecte ce rezultă din proprietățile intrinseci ale electronilor:

- electronii au un moment magnetic propriu, cu două valori discrete, a cărui orientare mediată în timp este fixă.
- spinul lor mecanic are aceeași direcție cu momentul magnetic, și astfel poate fi oarecum 'identificat' prin măsurători de tipul SG.
- odată ce a fost măsurat pe o direcție, spinul particulei *s-a schimbat*
- spin 1/2 înseamnă că este necesară o rotație de 720 grade pentru a aduce electronul la orientarea lui inițială.

Ce se întâmplă mai exact în timpul măsurării spinului prin acest procedeu? De la început trebuie precizat că interacțiunea dintre un electron și un câmp magnetic diferă de un echivalent macroscopic, clasic, cu care ne-am obișnuit.

Dacă plasăm un mic magnet într-un câmp magnetic exterior, acesta se va alinia pe direcția liniilor de câmp – în mod similar cu un ac de busolă ce se orientează singur în câmpul magnetic terestru.

La nivel cuantic, însă, un electron aflat într-un *câmp magnetic uniform* va suferi o interacțiune dublă cu câmpul extern. Global, traiectoria lui se va curba sub forța Lorentz; local însă, cum spinul lui magnetic nu se poate modifica ca valoare, electronul va răspunde cu o mișcare de precesie secundară. Practic, acesta va avea un nou spin a cărui direcție *medie* se va alinia în mod paralel sau antiparalel cu liniile de câmp. Figurile 2 și 3 prezintă doi electroni ideali, arătați din "față" și de "sus", al căror vector spin \bar{s} este vertical și, respectiv, de o anumită înclinație α . Spinul magnetic al celor doi electroni are aceeași orientare cu \bar{s} , iar zonele magnetice "Nord" și "Sud" sunt colorate cu gri deschis, respectiv închis. Electronii se deplasează pe direcția Y și au momentul liniar \bar{p} .

Un electron aflat într-un *câmp magnetic neuniform* va suferi o interacțiune asemănătoare, dar apare și un cuplu de torsiune ce va tinde să-i alinieze spinul cu gradientul câmpului magnetic extern. O forță de valoare mică F_z (componenta pe axa Z a forței Lorentz) va acționa asupra particulei, așa ca în Figura 4a și 4b. Astfel, traiectoria urmată de electron se va curba puțin sub acțiunea acestei forțe, în sus (up) sau în jos (down), iar separarea este dictată doar de orientarea inițială a spinului particulei. Abaterea de poziție la ieșire este fixă pentru că forțele F_z sunt constante – nu depind de gradul de înclinare inițial al spinului.

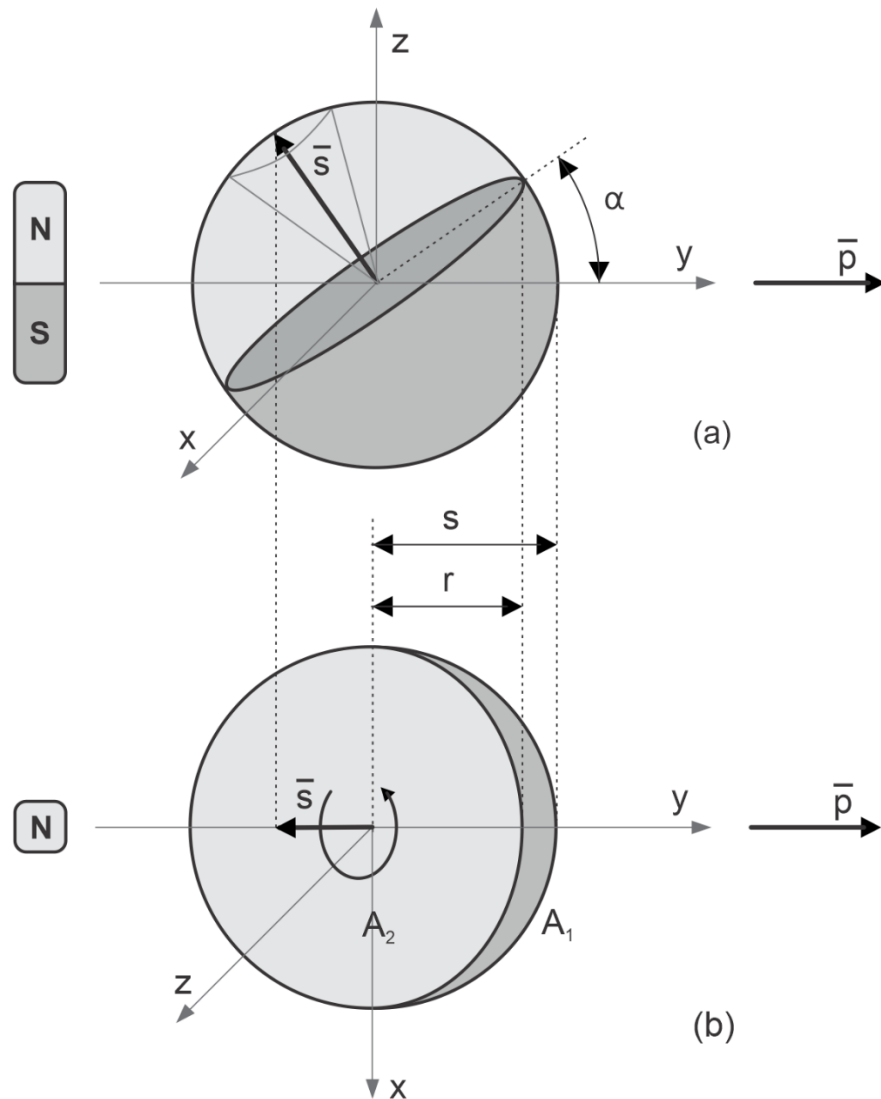


Figura 3

Presupunerea noastră este că înainte de începerea măsurătorii, atât spinul instantaneu cât și cel mediat au orientări bine definite, iar pe durata interacțiunii cu câmpurile magnetice este decisivă doar o orientare mediată. Decizia binară de a încadra starea de spin a particulei în categoria up sau down este determinată astfel de proiecția vectorului spin mediat pe planul dat de liniile de câmp extern. În timp ce precesia se ajustează după intensitatea câmpul extern, spinul mediat se aliniază cu liniile de câmp verticale; pozițiile instantanee ale noului vector spin (componentele lui de pe axele X și Y) vor rămâne cu o incertitudine primordială, specifică unui obiect cuantic ondulatoriu. Cu toate acestea, rotația continuă a spinului instantaneu după măsurătoare va fi limitată geometric la toate orientările posibile din interiorul unei *semisfere*, cea superioară pentru spin up și respectiv inferioară pentru spin down.

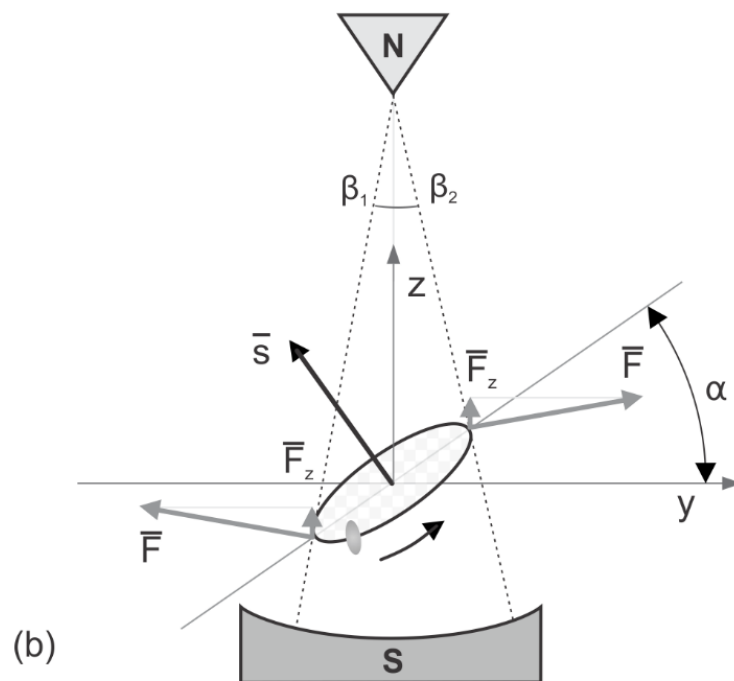
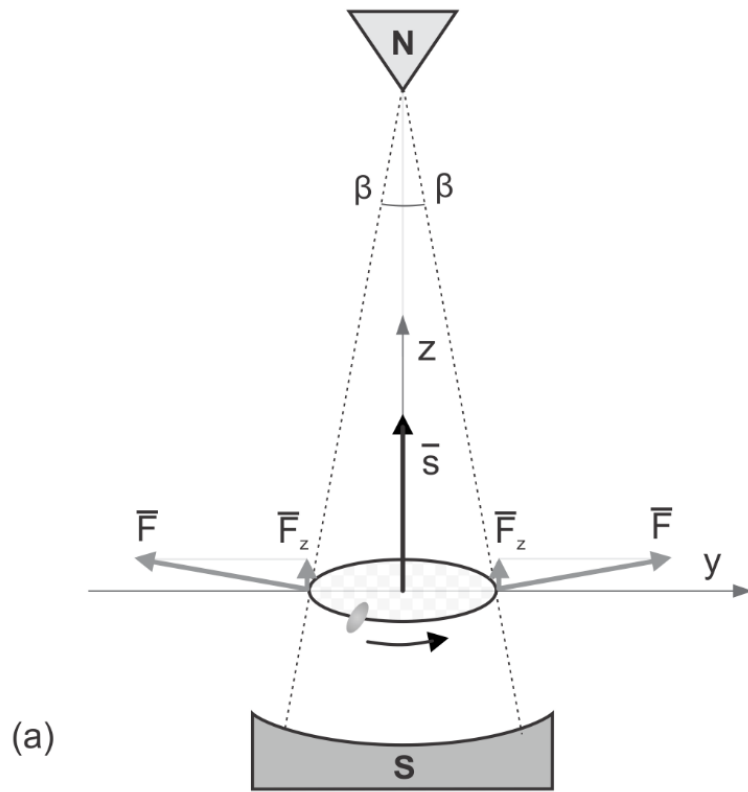


Figura 4

În cazul unui fascicul de electroni generați termic (ce au orientări aleatoare ale momentului unghiular), stările spinului "măsurat" prin procedeul SG vor tinde spre valorile de 50% up și 50% down; probabilitatea fiecărei orientări posibile este, așa după cum ne așteptam încă de la noua definiție a spinului în contextul MG, de 50 de procente. Dar să analizăm și alte câteva configurații în care sunt folosite filtrele SG (vezi Figura 5) și să interpretăm apoi statistica electronilor "măsurați" prin acest procedeu. Țin să precizez din start că analiza va fi de tip clasic, specifică mecanicii granulare, și astfel voi considera că electronii ce ies din tun au spinul distribuit în mod aleator - dar acesta va fi *bine definit ca direcție*. Mai mult, toate experiențele au fost făcute cu un număr foarte mare de electroni, astfel încât statistica lor să fie semnificativă; în figură s-a preferat însă folosirea unor numere mici, pornind de la 100, pentru a se calcula cu ușurință procentele ce rezultă la trecerea prin filtre.

a) Putem deduce că cei 50 de electroni rămân cu spinul "up" după prima măsurătoare, pentru că ei toți trec și de al doilea filtru pe aceeași direcție. S-a schimbat ceva totuși după acest șir de măsurători?

1. Electronii ce au trecut de primul filtru au avut spinul mediat (presupus fix) orientat undeva în sus, deci inclus în semisfera superioară.

2. După trecerea de primul filtru, acești 50 de electroni au căpătat o mișcare de precesie secundară în jurul direcției de măsurare. Spinul lor instantaneu se va roti continuu, dar poziția lui se va încadra tot timpul în semisfera superioară și înclinarea lui medie față de verticală se va păstra. Acest lucru înseamnă că *spinul lor mediat* va avea acum o orientare nouă, și anume chiar direcția de măsurare.

3. Toți cei 50 de electroni vor trece și de al doilea filtru pentru că spinul lor mediat este orientat vertical, în sus.

b) Cu al doilea filtru rotit la 180° avem o confirmare suplimentară că niciun electron din cei 50 găsiți cu spin "up" nu a suferit o inversare ulterioară a spinului.

c) Rezultă că din cei 50 electroni cu spin "up", 25 au spinul "up" și după un filtru montat la 90° . Adică, din cei 50 electroni cu spinul orientat vertical în sus, jumătate - lucru normal ca statistică - au efectuat mai multe rotații din precesia lor în semisfera din dreapta (decât în cea din stânga) pe durata măsurării și astfel au putut fi atrași pe această direcție.

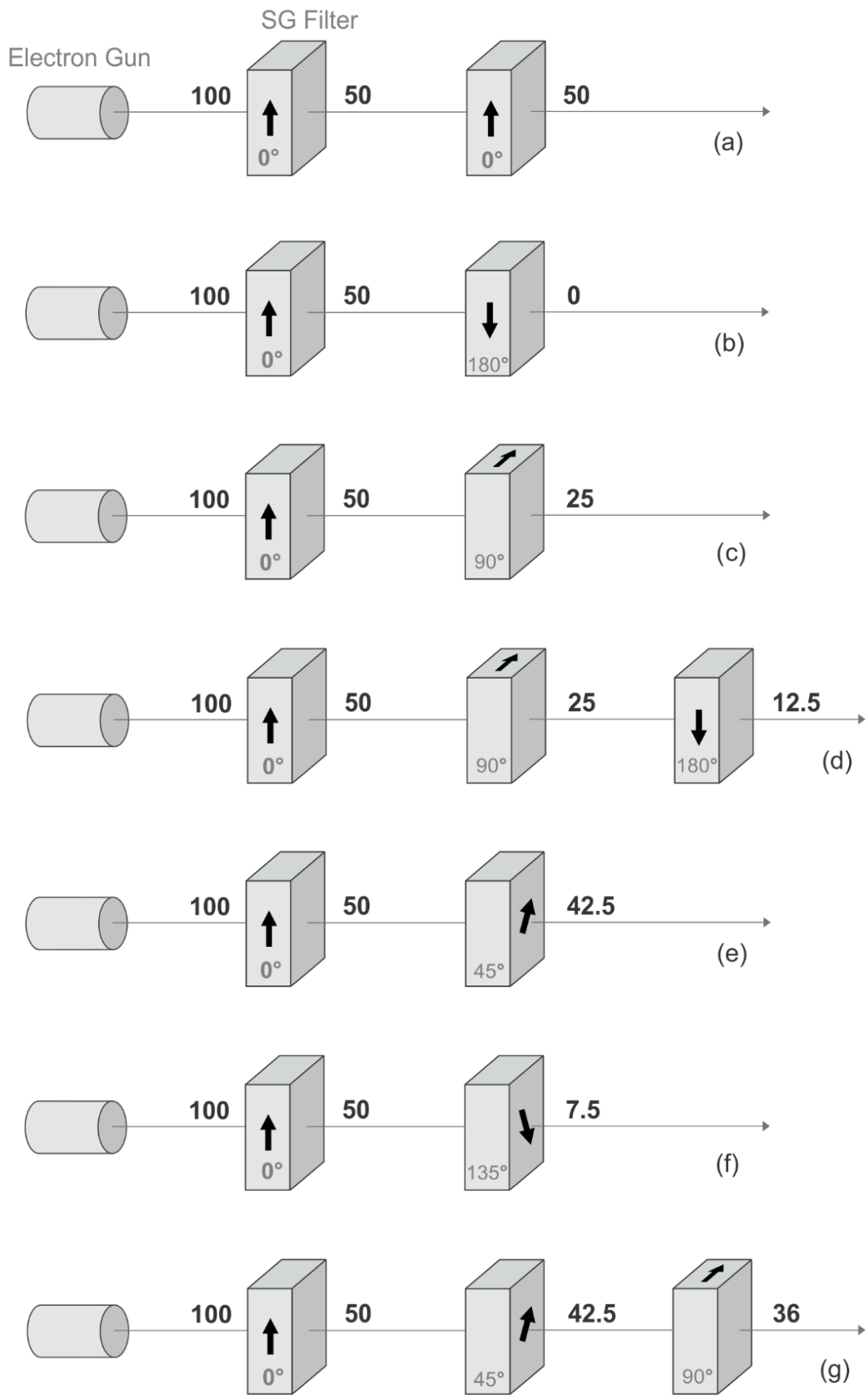


Figura 5

d) Dacă se compară cu situația din cazul b), observăm că intercalarea unui filtru la 90° afectează distribuția spinului instantaneu pentru toți electronii ce trec de el, adică spinul celor 25 are acum o precesie numai în semisfera dreaptă; din cei 25, un număr de 12.5 vor trece și de al treilea filtru (statistică normală) și asta confirmă presupunerea de mai sus.

e) Dacă se compară cu situația din cazul c), ne-am fi așteptat ca măsurarea cu un filtru montat la 45° să indice jumătatea dintre 25 și 50, adică 37.5, fiind presupusă o distribuție liniară a orientărilor. Dar rezultatul este diferit, 42.5, și această abatere semnificativă de la liniaritate necesită o explicație separată!

f) În mod similar cu cazul e), după filtrul montat la 135° ne-am fi așteptat la 12 procente, dar am măsurat 7.5 - deci o nouă abatere semnificativă!

g) Măsurătoarea cu un filtru la 45° va distribui spinul instantaneu pentru 42.5 electroni în interiorul semisferei din dreapta-sus, astfel încât un alt filtru montat înclinat la 90° va lăsa să treacă acum mai mulți electroni decât cei 25 observați la cazul c). Raportul $50/42.5$ de la cazul e) este identic cu $42.5/36$ de la cazul g), ceea ce înseamnă și măsurătorile la un anumit unghi cauzează distribuții similare ale spinilor în spațiu.

Concluzii posibile:

- Măsurătoarea SG pe orice direcție modifică spinul electronilor implicați și le imprimă o mișcare de precesie față de acea direcție. Noul vector *spin mediat* va fi aliniat prin urmare pe acea direcție a măsurătorii.
- Vectorul *spin instantaneu* al electronilor va fi distribuit astfel uniform în interiorul semisferei asociate respectivei direcții de măsurare, iar precesia lui va avea o frecvență constantă ce depinde de intensitatea câmpului magnetic.
- Precesia aceasta secundară, indiferent de intensitatea câmpului magnetic neomogen al filtrului SG, nu poate scoate spinul instantaneu din granițele geometrice ale unei semisfere.
- Filtrul SG nu măsoară practic o orientare a spinului, ci arată doar dacă proiecția momentană a acestui vector pe axa de măsurare este pozitivă sau negativă. După măsurătoare, putem spune că spinul magnetic mediat va fi "polarizat" pe acea nouă direcție.

Dar să trecem acum la analiza perechilor de particule generate în urma unor procese cuantice în care se conservă momentul liniar și cel unghiular; aceste perechi corelate - entangled particles - au prin urmare spinul total nul și o

coerență maximă a stărilor de spin. Ceea ce putem spune în mod teoretic înainte de o măsurătoare este că spinii a doi electroni corelați perfect vor fi aliniați pe direcții *opuse*, adică la un unghi de 180° . Să vedem și în mod practic dacă vom obține aceste rezultate și dacă acestea sunt compatibile cu:

- ideea existenței unei *orientări fixe, reale* a spinilor înainte de a avea loc orice interacțiune cu particulele corelate.
- ideea unei *independențe totale* a măsurătorilor pentru fiecare particulă în parte, a faptului că rezultatul uneia dintre ele nu depinde de celălalt rezultat și nici de ordinea evenimentelor.
- Incertitudinea mărimilor pereche (Heisenberg) [9]. Odată ce am măsurat o particulă pe direcția Z, adică avem o oarecare certitudine a orientării spinului instantaneu, componentele acestuia de pe axele X și Y au un maxim de incertitudine – iar acest lucru mi-a permis să introduc de fapt conceptul de spin mediat. Cum măsurătoarea încearcă să restrângă "libertatea" de rotație a particulei pe axa Z, va crește automat "libertatea" ei pe axele X și Y, conducând la extinderea *distribuției* vectorului în toată semisfera asociată.

1. Folosind un filtru SG, pentru primul electron dintr-o pereche vom măsura în jumătate din cazuri starea de spin "up".
2. Acum vom folosi un alt filtru SG rotit la 180° pentru a putea avea rezultate în aceeași direcție, mai ușor de comparat. Pentru al doilea electron din perechile respective vom măsura tot spin "up", ceea ce corespunde perfect cu previziunile teoretice.
3. Acum să înclinăm al doilea filtru la diferite unghiuri și să facem o statistică a cazurilor în care vom avea rezultatul spin "up". Graficul cu procente măsurate în funcție de unghi este prezentat în Figura 6, curba desenată cu negru. Cu gri deschis este desenată linia ce reprezintă o statistică normală, așteptată pentru un fenomen clasic.

Exact ca în cazurile descrise mai sus (vezi Figura 5), procente pentru unghiurile filtrului SG de 0° , 90° și 180° sunt cele așteptate, respectiv 100%, 50% și 0%. Restul valorilor nu coincid însă cu statistica normală și acest lucru ar trebui explicat acum tot în contextul unei abordări clasice. De exemplu, pentru rotirea la 45° se aștepta un procent de 75%, dar s-a obținut 85%!

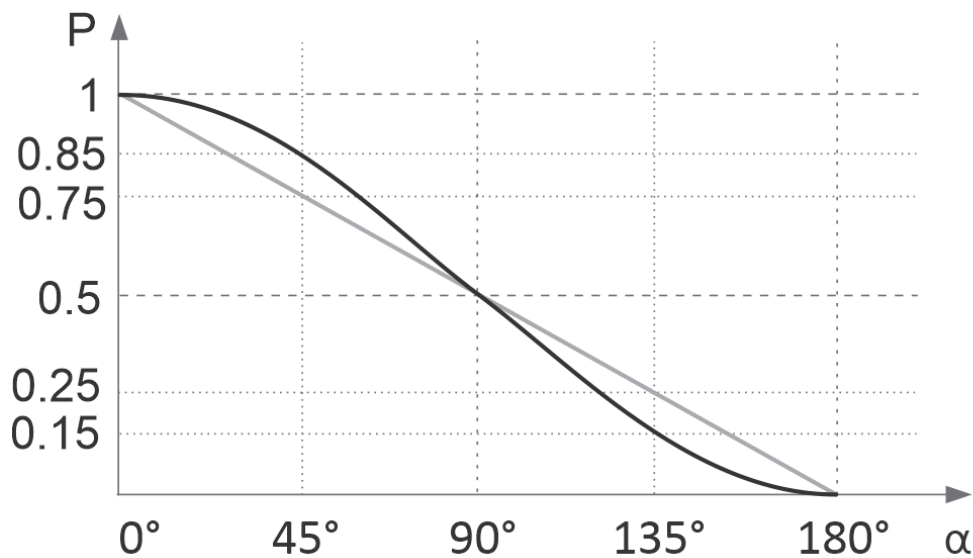


Figura 6

Până acum am stabilit că rezultatele măsurării pe rând a spinului perechilor de electroni corelați sunt identice cu rezultatele măsurării spinului unor electroni ce trec succesiv prin două filtre SG. Pentru a înțelege statistica lor ciudată vom analiza mai în detaliu ce se întâmplă la separarea up-down într-un filtru SG. Să presupunem că în Figura 2 este reprezentat spinul mediat al unui electron ce tocmai a ieșit dintr-un filtru SG, spin ce s-a aliniat pe direcția N-S a acestui dispozitiv; după cum am afirmat și mai sus, spinul lui instantaneu poate avea acum vârful oriunde pe suprafața semisferei superioare, cea gri deschis, din cauza mișcării de precesie ce a căpătat-o în câmpul magnetic al SG. Mai departe vom folosi un alt filtru SG, rotit cu unghiul α față de primul. Figura 3 prezintă același electron, înainte de a intra în aparat, putând-se observa înclinarea α a spinului lui mediat față de direcția filtrului SG și zona gri deschis în care poate oscila spinul lui instantaneu.

Este clar că un spin instantaneu ce este detectat de aparat mai mult timp în semisfera superioară va conduce la o deflexie a electronului în sus, adică va fi detectat cu starea de spin "up", iar unul din semisfera inferioară va însemna "down". Din punct de vedere geometric, Figura 3b ne permite să observăm că vârful spinului instantaneu din semisfera gri înseamnă spin up - dacă se află în semisfera superioară - și spin down - dacă se află în semisfera inferioară. În zona

superioară vom identifica A2 ca arie plană pentru spin up și respectiv A1 (considerată doar ca mărime) pentru spin down. Acest lucru ne indică astfel care este probabilitatea să detectăm spin up în funcție de cele două arii:

$$P_{up} = A2 / (A1+A2)$$

unde A1+A2 reprezintă aria cercului cu rază s și A2 este formată din aria semicercului cu rază s și aria semielipsei cu axa mică r. Expresia devine:

$$P_{up} = (\pi s^2/2 + (\pi s^2 \cos \alpha)/2) / \pi s^2 = (1 + \cos \alpha)/2 = \cos^2 (\alpha/2)$$

adică o funcție care are exact graficul reprezentat cu negru din Figura 6.

Această formulă confirmă astfel justetea explicațiilor și ipotezelor emise până acum. Electronul este o particulă specială; toate rotațiile lui particulare, reflectate prin evoluția unui vector spin în spațiul tridimensional, se pot evalua probabilistic prin proiecțiile acestuia într-un plan orientat pe o anumită direcție. Entanglementul a doi electroni le dă acestora momente unghiulare opuse, dar direcția exactă pe care sunt aliniată nu se poate afla. Putem "măsura" însă statistic dacă una din direcțiile lor se înscrie într-o emisferă de orientare dată; odată măsurarea efectuată, electronul capătă o mișcare de precesie ce-i dă un spin variabil orientat – dar limitat totuși la emisfera asociată cu direcția aleasă. Reținem, în consecință, că *nu măsurarea alege o stare de spin* dintr-un mix de stări; starea de spin s-a stabilit încă de la crearea perechii de electroni, iar așa-zisa măsurătoare nu ne poate da această informație exactă – ea ne arată doar dacă vectorul spin preexistent se încadrează într-o emisferă din jurul direcției aleasă pentru măsurare. În plus, după măsurare, spinul mediat s-a aliniat pe această nouă direcție Z și spinul instantaneu este distribuit acum peste tot în emisfera asociată; o nouă măsurătoare pe altă direcție nu mai poate oferi decât o probabilitate pentru orientarea spinului în cadrul noii emisfere.

Lucrurile acestea atipice sunt o consecință a particularităților lumii cuantice, a mecanicii sale speciale, dar toate respectă principiile și legile fundamentale ale fizicii. Mai mult, noile interpretări extind realismul și la nivelul acestei lumi, la fel și principiul localității. Nu trebuie neapărat să ne folosim de o superpoziție dintre up și down pentru spinul particulelor corelate, și nici de ipoteza așa-zisei 'alegeri' a spinului în momentul măsurătorii, chiar dacă ne conduc la rezultate matematice corecte. Faptul că în "optica" fizicii actuale sunt permise modelări în care

cauzalitatea este mult distorsionată și localitatea este încălcată sistematic mi se pare inacceptabil.

Einstein avea parțial dreptate în formularea paradoxului EPR [10] și a acelei analogii cu mănușile pereche pentru a ilustra ce se întâmplă în cazul entanglementului cuantic. Povestea trebuia însă să contureze mai bine realitatea, și, dacă îmi este permis, aș propune aici o nouă versiune pentru analogia respectivă:

În fiecare cutie se află câte o pereche de mănuși, iar cele două mănuși ale fiecărei perechi sunt așezate una peste alta în ordine diferită în câte o cutie. Mai mult, cutiile se pot deschide pe mai multe laturi. Am convenit pe care latură vom deschide cutiile și apoi le separăm la mare distanță una de alta. Deschizând oricare dintre cutii, un observator va afla care dintre mănuși (cea dreaptă sau cea stângă) este deasupra și, în același moment, va ști și că în cealaltă cutie mănușa opusă este deasupra.

Realitatea conține o variabilă ascunsă ce indică direcția spinului, dar noi nu avem acces la ea, și acest lucru poate fi considerat echivalent cu faptul că acea informație completă nu există (așa cum susține MC). Avem acces însă la o informație parțială, cuantizată, ce ne arată în mod global dacă particula se rotește în sus sau în jos pe o anumită direcție aleasă de observator; în plus, în același moment știm și ce rezultat ar obține un alt observator despre particula pereche, pentru aceeași direcție (pentru că spinul este inversat). Este evident că direcția de măsurare influențează rezultatele, dar acestea sunt reflexia unei stări bine definite, fixe, reale, ce a existat înainte de orice interacțiune. Rezultatul pentru a doua particulă nu este determinat de prima măsurătoare, nu există nicio legătură fizică între cele două operațiuni. Chiar dacă în urma măsurătorilor constatăm o corelare neliniară între spinii acestor particule, fenomenul este justificat perfect de mecanica rotațiilor și interacțiunilor acestora în spațiul tridimensional. Mecanica clasică trebuie doar să fie bine aplicată, iar modelul granular oferă imaginea perfectă pentru lumea cuantică și asigură o corectă interpretare a acesteia.

Remarcă: Configurația experimentului lui Bell, aceea în care sunt montate câte trei detectoare înclinate la 120° pentru fiecare particulă, ne oferă o statistică ce se poate extrapola în mod simplu din toată analiza de mai sus (vezi Figura 6) și pentru care explicația este absolut similară.

4. Entanglementul fotonilor

4.1. Spinul fotonilor

Având în vedere că *fotonul ideal* este o structură granulară [2, Cap. 13.2] complexă, tridimensională, cu o formă specifică (o replică fidelă a drumului parcurs de electronul accelerat ce l-a generat) și că *fotonul real* este descris pe larg de modelul arbore [2, Cap. 13.3], ne putem pune întrebarea firească dacă nu cumva și aceste particule ar putea să fie caracterizate de un parametru tip spin mediat, exact ca cel asociat electronilor de mai sus. Câteva considerente granulare enunțate pentru un foton *singular* (care prin urmare nu aparține unui fascicul luminos) ne vor ajuta acum să aflăm răspunsul corect:

- spinul acestei particule 'rigide' cu formă fizică de undă are valoarea $s = 1$, adică o ipotetică rotație întreagă (de 360°) ar aduce particula înapoi la orientarea ei inițială.

- putem asimila, în mod ideal, unda care este generată de particula foton cu o *oscilație completă* a masei ei granulare, și astfel anvelopa structurii acesteia se poate aproxima cu o sinusoidă într-o proiecție pe un plan axial; această structură internă se va păstra neschimbată în timp ce particula se deplasează rectiliniu (cu viteza luminii) de-a lungul axei OY (așa cum se vede în Figura 7).

- dintr-un sistem de referință inerțial oarecare, diferit de cel propriu al fotonului (în care structura internă ar fi staționară), se poate observa cum se modifică în timp distribuția lui granulară – așa-zisa oscilație a componentei electrice a undei. Constatăm astfel că vectorul câmp electric \vec{E} oscilează în mod sinusoidal în planul XOZ, perpendicular pe direcția de propagare. Această direcție a oscilației poate să fie fixă pe toată perioada undei sau se poate roti în acest timp - vârful vectorului având un traseu în formă de spirală. Direcția de oscilație, care este astfel fixă sau variabilă pentru un anumit foton, se numește *polarizare*. Tipurile posibile de polarizare sunt: *liniară* (de exemplu orizontală ca în Figura 7b sau verticală ca în Figura 7a) și respectiv *eliptică* (circulară). Considerând gradele de libertate ale fotonului, MC face asocierea dintre polarizarea circulară și spin, permițând două valori discrete pentru proiecțiile acestui vector pe direcția de propagare (+1 și -1). Cele două valori unitare ar corespunde astfel rotației câmpului electric în timp, +1 spre *dreapta* și respectiv -1 spre *stânga* în lungul direcției de propagare. Trebuie să mai menționez aici că polarizarea liniară este tratată matematic de MC ca o superpoziție de unde polarizate circular (stânga și dreapta), cu amplitudini și faze egale.

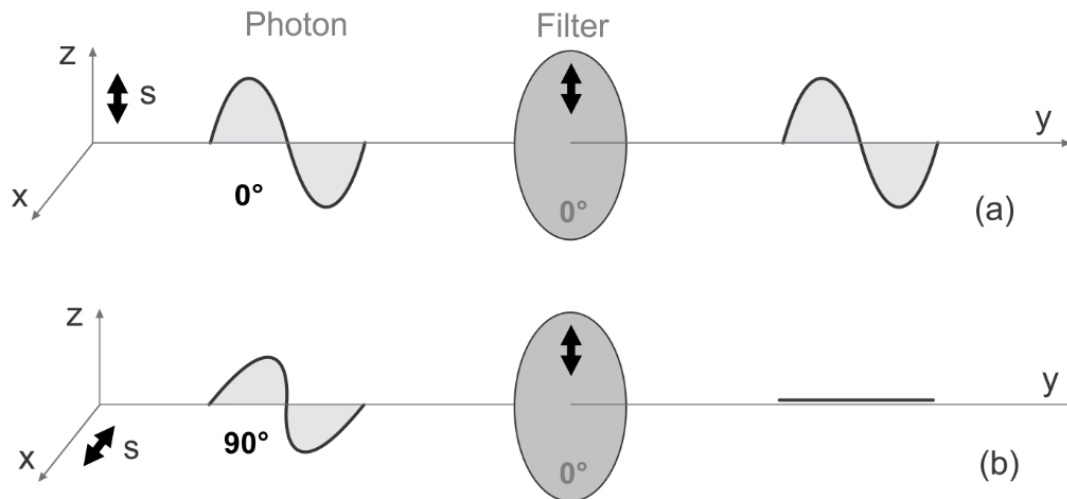


Figura 7

Având în vedere toate considerentele de mai sus, este firesc să asociem această direcție instantanee a oscilației 'electrice' cu un spin instantaneu și astfel să ne apropiem de conceptul de spin mediat pentru fotoni. Așa cum am prezentat anterior în [2, Cap 13.2], fotonul nu este o construcție perfectă, iar oscilațiile componenteii lui electrice pot varia pe toată lungimea structurii. Rotația câmpului electric ar da astfel proiecția spinului pe direcția de propagare (pozitiv ar însemna rotație în sensul acele ceasului) iar variația de amplitudine din primul semiciclu ar da proiecția pe planul XOZ.

Spinul este prin urmare un vector cu amplitudine constantă a cărei direcție de oscilație într-un plan transversal (perpendicular pe vectorul moment liniar) se poate afla folosind filtrele polaroid. În cazul unui foton ce se propagă orizontal, acest spin ar putea indica de exemplu polarizarea pe direcție verticală. Dar variația granulară 'electrică' a acestuia nu se petrece într-un singur plan, ea are întotdeauna și o componentă rotațională (anvelopa lui arată în realitate ca o parte dintr-o spirală – replică fidelă "înghețată" a spiralei secundare descrisă de electronul ce l-a emis). Acest lucru, la care adăugăm și clonele granulare ce însoțesc fotonul după trecerea printr-un material transparent, fac din vectorul lui spin o construcție ceva mai complexă: direcția lui instantanee este variabilă (urmărește de fapt spinul instantaneu al electronului emitent) și proiecția lui verticală pe durata sinusoidei este de fapt o *distribuție plană* de o anumită deschidere unghiulară. Astfel, considerând toată lungimea fotonului, avem de-a face cu un vector spin ce variază ca direcție în tot spațiul tridimensional; fotonul

va păstra așadar sensul rotației, ceea ce înseamnă că proiecția vectorului spin global pe vectorul moment va fi mereu nenulă și va avea același semn cu spinul particulei ce l-a generat.

Spinul mediat este prin urmare un vector perfect asociat cu *rotația reală* a particulelor compacte și cu *rotația virtuală* a fotonilor. Să presupunem acum că un foton ce se "rotește" spre dreapta (+1) întâlnește un electron ce se rotește invers (-1/2). Odată inițiată interacțiunea, imediat va începe transferarea impulsului dinspre foton spre electron; acest proces cuantic se încheie odată cu transferul complet de impuls (și de energie) spre electron, care în final se va roti în sens invers (+1-1/2 = 1/2). Natura cuantică a transferului de spin rezultă tocmai din faptul că acesta este reflexia unei stări binare: orice particulă compactă are cel puțin o rotație intrinsecă, și aceasta poate fi doar spre dreapta sau spre stânga față de momentul ei liniar! Fiind o rezultantă a unei simetrii de rotație, proprietatea denumită spin total este o mărime ce *se conservă* într-un sistem cuantic.

4.2. Fotoni corelați

La trecerea printr-un filtru vertical (Figura 8), fotonul are un comportament bine clarificat în mecanica cuantică: va trece sau nu va trece prin filtru în funcție de direcția componentei spinului acestuia în plan vertical. Fotonii sosiți de la un bec cu incandescență au spinul orientat aleator și prin urmare vor trece de acest filtru în proporție de 50%. Dar care este mecanismul exact ce explică trecerea unui singur foton prin filtru?

Să începem cu patru observații logice și apoi să analizăm experimentele cu diferite configurații de filtre pentru a înțelege mai bine fenomenul polarizării.

1. Dacă un foton este polarizat vertical, atunci acesta va trece cu siguranță.
2. Dacă proiecția spinului mediat al acestuia pe planul transversal formează un unghi cu verticala în domeniul -45° și $+45^\circ$, fotonul are șanse să treacă.
3. Fotonii ce trec de filtru capătă o nouă direcție a spinului mediat (și o nouă distribuție a celui instantaneu), componenta lui din planul vertical se va alinia cu direcția de polarizare a respectivului filtru.
4. Datorită simetriei de 180° a unui filtru, fotonii polarizați pe o direcție (cu componente de spin pozitive sau negative pe acea direcție) vor fi echivalenți.

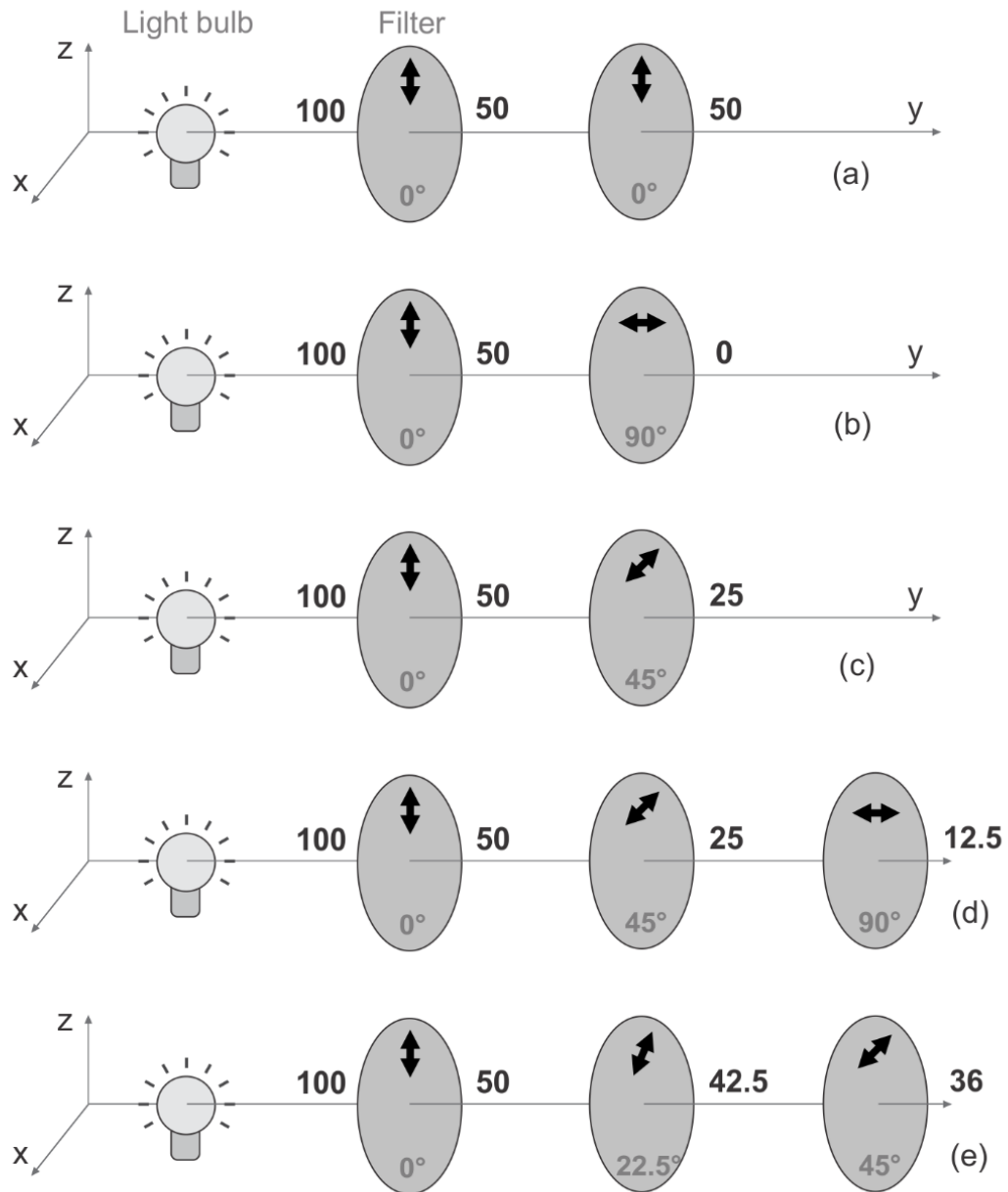


Figura 8

Configurațiile de filtre din Figura 8 și statistica fotonilor ce au reușit să treacă:

- La montarea unui filtru secundar orientat tot pe axa verticală, toți cei 50 de fotoni care au trecut de primul filtru vor trece și de al doilea.
- Dacă filtrul secundar este rotit la 90° , niciun foton din cei 50 nu va mai trece și de acesta.
- Cu filtrul secundar rotit $\pm 45^\circ$, doar jumătate (25) dintre cei 50 fotoni trecuți de primul filtru vor trece și de al doilea.

- d) Configurația aceasta este identică cu cea din cazul b), doar că a fost intercalat un filtru rotit la $\pm 45^\circ$; efectul final al acestuia este trecerea a 12.5 fotoni (ca procent) prin ultimul filtru.
- e) În acest caz avem un filtru rotit la 22.5° urmat de un altul la 45° ; la ieșire se va înregistra un procent final de 36 fotoni.

În cazurile a), b) și c) observăm o statistică normală la ieșire, numărul fotonilor scade proporțional cu unghiul de $0..90^\circ$. Cazul d) confirmă faptul că spinul mediat se schimbă după trecerea printr-un filtru polarizat, iar cazul e) introduce o abatere de la liniaritatea probabilistică așteptată (după al doilea filtru așteptam 37.5 și am măsurat 42.5) – care acum trebuie explicată în context clasic.

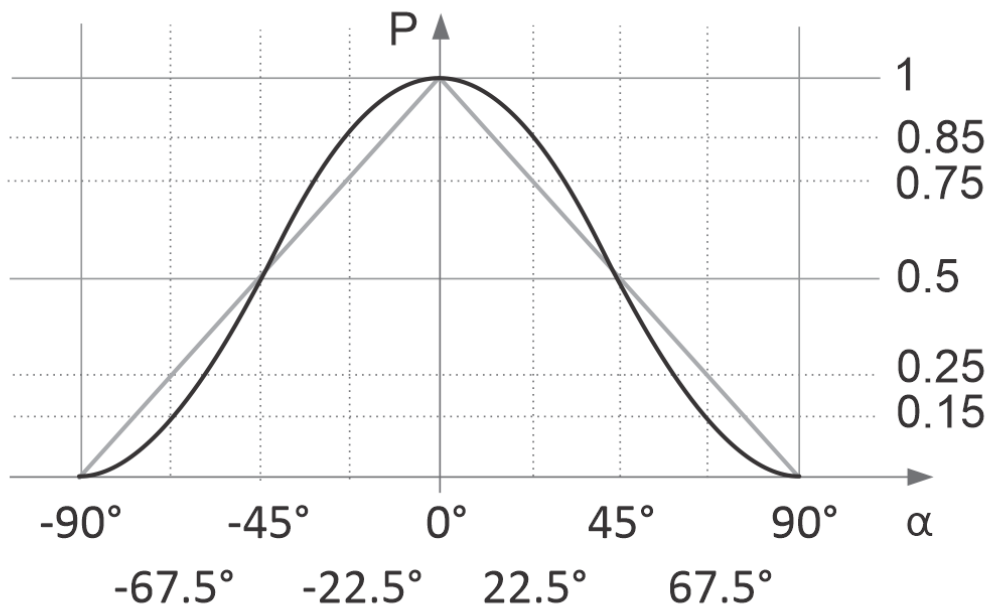


Figura 9

În Figura 9 se poate observa linia gri, care este statistica așteptată, și curba neagră, care este procentajul măsurat de fapt la ieșirea din al doilea filtru. Aceleași valori se obțin și pentru perechi de "entangled photons" (au vectorii spin mediat perpendiculari), în care primul foton trece de un filtru polarizat pe o anumită direcție și al doilea de un filtru rotit la un unghi de $90^\circ + \alpha$.

Prima observație este că fenomenul în sine și forma abaterii statistice sunt lucruri *perfect similare* cu cele înregistrate în cazul electronilor corelați, doar domeniul unghiular de valori s-a schimbat de la 180° pentru electroni la 90° pentru fotoni.

La fel vor fi și explicațiile ce se pot formula pentru aceste comportamente aparent stranii de la nivel cuantic.

Aria plană (vezi Figura 10a) în care se poate afla proiecția spinului mediat al unui foton polarizat vertical – care prin urmare va trece de filtru – are o deschidere de 90° și este de culoare gri deschis.

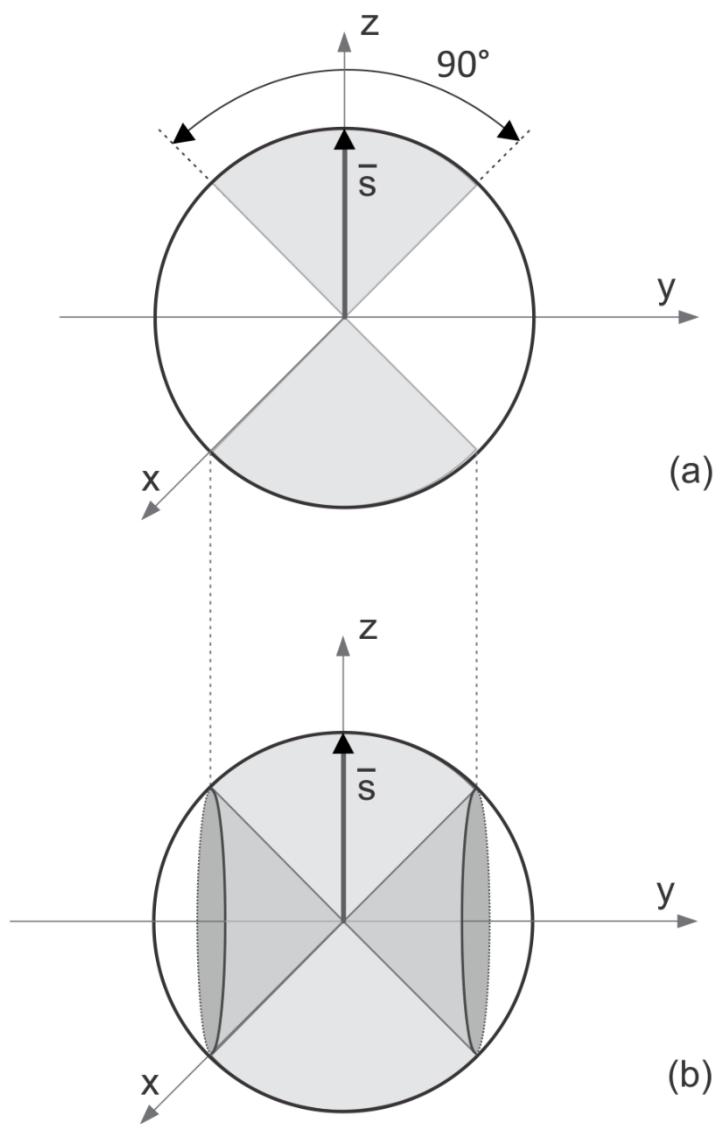


Figura 10

Sectorul sferic ce corespunde rotației (o revoluție) acestei suprafețe în jurul axei Y este reprezentat în Figura 10b; cu volumul egal cu jumătate din cel al sferei de rază s, acesta reprezintă spațiul în care se pot afla vectorii spin mediat ai fotonilor respectivi.

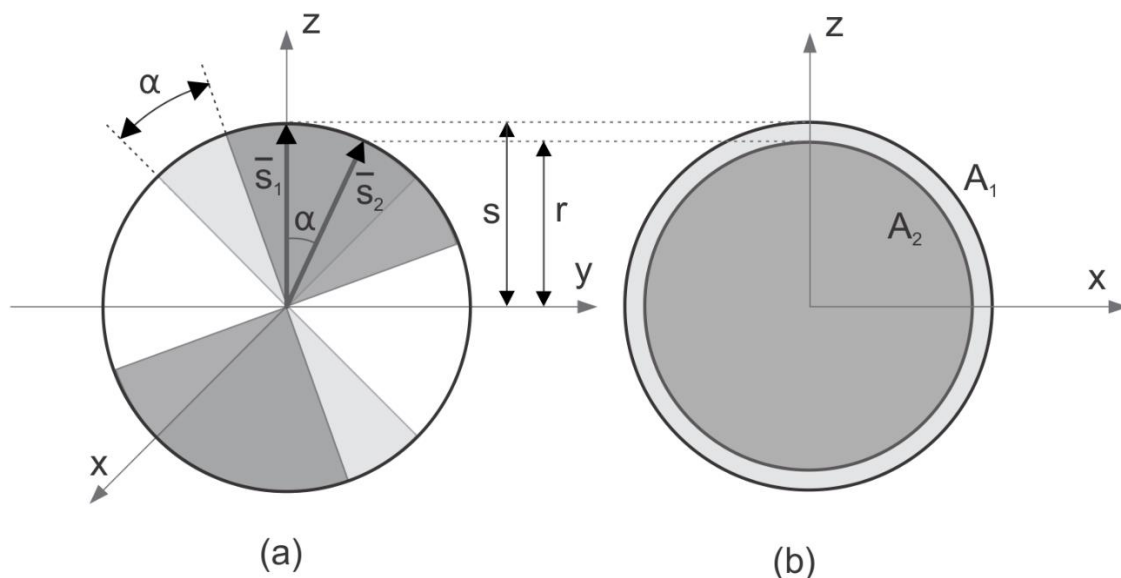


Figura 11

Acum să ne imaginăm că am rotit filtrul cu unghiul α în sensul acelor de ceas, așa cum este desenat în Figura 11a. Zona gri deschis este asociată poziției verticale inițiale și prin ea a trecut fotonul cu spinul s_1 , iar zona gri închis este asociată poziției rotite a filtrului – și prin ea va putea trece cu o anumită probabilitate fotonul cu spinul s_2 . Dacă privim proiecția laterală a acestor zone pe planul XOZ (Figura 11b), vom înțelege că cel de-al doilea foton din perechea corelată va avea o probabilitate mai mică de trecere, iar proporția în care aceasta va scădea va corespunde raportului ariilor proiectate pe acest plan vertical paralel cu direcția de deplasare, A_1 și A_2 .

$$P_2 = A_2 / A_1$$

unde A_1 și A_2 reprezintă ariile cercurilor cu raze s și respectiv r . Rezultă:

$$P_2 = (\pi r^2) / (\pi s^2) = (\pi (s \cos \alpha)^2) / (\pi s^2) = \cos^2 (\alpha)$$

adică o funcție care arată un grad de corelare al polarizării identic cu cel din graficul precedent (curba neagră din Figura 9).

Și de această dată o abordare mecanicistă clasică ne-a condus la rezultate teoretice ce corespund cu cele experimentale; totuși, acest lucru nu înseamnă că toate ipotezele de la care am plecat sunt și ele implicit corecte. Este la latitudinea cititorului ca, după ce va citi și concluziile acestui articol, să aleagă cele mai potrivite premize și interpretări pentru entanglement.

5. Concluzii

Mecanica cuantică pare a descrie corect realitatea prin modelul standard (funcția de undă, superpoziția, probabilități), se obțin rezultate teoretice care se potrivesc perfect datelor experimentale. Dar acest model standard este oare complet și lipsit de contradicții? Sunt oare corecte concluziile de non-localitate și non-realism la care acesta ne conduce în cazul particular al entanglementului, constituie oare acestea un adevăr științific care să fie adăugat la modelul actual al microcosmosului și acesta să rămână în continuare coerent?

Sau lucrurile pot fi diferite, și, așa cum am explicat la începutul acestui articol, unele mărimi fundamentale pot avea și o altă modelare teoretică? Una în care obiectele cuantice au structuri interne și mișcări intrinseci de care trebuie să ținem cont. Și dacă această nouă modelare, care la nivel elementar se bazează doar pe legile simple ale mecanicii clasice, ne permite o interpretare unitară și corectă a realității microscopice - în care localitatea și realismul să poată ocupa locul potrivit alături de principiile relativității?

Lumea cuantică este un univers special la care nu putem ajunge decât cu mijloacele pe care chiar aceasta ni le pune la dispoziție. Cu cât ne apropiem mai mult de obiectele ei, cu atât scade precizia cu care le putem măsura unele proprietăți. Astfel, acest nivel al realității este unul în care întâmplarea joacă un rol fundamental, în care probabilitatea este maximul de informație ce-l putem afla despre unele mărimi sau stări cuantice. Cu toate acestea, modelele noastre teoretice trebuie să maximizeze această informație, astfel încât să putem afla cât mai mult despre realitatea obiectivă și să-i interpretăm cât mai corect mecanismele ei fundamentale de funcționare. Și, mai mult, odată ce am stabilit un set minimal de legi și principii aflate la baza acestor mecanisme, excepțiile nu mai trebuie să existe la niciun nivel dimensional.

În articolul de față sunt descrise două poziții divergente pentru situația în care se află particulele înainte de a li se măsura parametrul cuantic spin: *superpoziția stărilor* din formalismul Mecanicii Cuantice și *stări bine definite* din noul

formalism al Mecanicii Granulare. Ambele ipoteze conduc la rezultate corecte, dar primul caz comportă însă o contradicție principială.

Dupa măsurători, în toate cazurile de mai sus, spinul mediat se aliniază cu direcția pe care s-a efectuat măsurătoarea și orientările celui instantaneu capătă o distribuție ce se extinde pe tot unghiul solid asociat (la electroni este vorba de precesia secundară, la fotoni de clonele adiacente). Acesta este efectul granular-clasic al măsurătorii, un lucru echivalent cu colapsul funcției de undă din MC. Particula este constrânsă prin influența câmpurilor externe să-și limiteze un anumit grad de libertate și prin urmare va raspunde cu o schimbare de stare – în cazul nostru își va modifica distribuția spațială a momentului unghiular; în esență este vorba de un transfer de *incertitudine* de tip Heisenberg: cu cât restrângem mai mult un parametru la nivel cuantic, cu atât mai inexactă devine o altă mărime pereche.

Dar ce este măsurătoarea în contextul celor două formalisme?

1. Cazul MC: este un colaps al funcției de undă prin care este aleasă în mod probabilistic una dintre stările cuantice aflate în superpoziție.
Superpoziție stări -> lipsă realism, lipsă cauzalitate și localitate
2. Cazul MG: este o reliefare probabilistică mediată a unei stări bine definite ce este asociată cu o distribuție spațială specifică.
Stări bine definite -> realism, cauzalitate și localitate

Putem vorbi și despre determinism de la scară cuantică: acesta se bazează pe procese care au loc la scară granulară și dau efecte mediate în timp, deci este practic imposibil de observat și evaluat. Îi vom putea atribui astfel trăsătura de *elementar*, iar reflectarea lui în măsurători nu poate fi decât probabilistică. Din aceleași rațiuni nu vom putea constata nici realismul cuantic, așa că și acesta ar putea fi numit *elementar*. Mai mult, faptul că nu putem măsura o anumită calitate a unui obiect cuantic nu înseamnă că aceasta nu există. De unde rezultă că cele două formalisme descrise aici pot conviețui împreună, produc aceleași rezultate, dar unul dintre ele nu poate genera interpretări realiste și coerente.

6. Referințe

- [1] Laurențiu Mihăescu, 2014. [Teoria Primară](#), Editura Premius
- [2] Laurențiu Mihăescu, 2019. [Gravitația](#), Editura Premius
- [3] Laurențiu Mihăescu, 2020. [Relativ sau Absolut](#), Articol
- [4] A. Einstein, *The Meaning of Relativity*, Princenton University Press, 1988
- [5] Robert Dabin, *De Broglie-Bohm Theory: A Hidden Variables Approach to Quantum Mechanics*, 2009
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Stern-Gerlach_experiment
- [7] https://en.wikipedia.org/wiki/Measurement_in_quantum_mechanics
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_moment
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Uncertainty_principle
- [10] https://en.wikipedia.org/wiki/Bohr-Einstein_debates

7. Acronime și convenții

SG - Stern-Gerlach

MC - Mecanică cuantică

MG - Mecanică granulară

SRA - Sistem de Referință Absolut

SRI - Sistem de Referință Inerțial

SR - Sistem de Referință

TR - Teoria Relativității

TRG - Teoria Relativității Generalizate

TA - Teoria Absolutului

TP - Teoria Primară

'**abc**' - Text cu sens figurat