

MĂSURĂRI FĂRĂ INTERACȚIUNE

Andrei PETCO, Ștefan MELENTI, Vitalie CHISTOL

Universitatea Tehnică a Moldovei

Abstract: În timpul măsurărilor fizice instrumentul de măsură poate să interacționeze prin contact direct cu obiectele măsurate sau fără contact direct (la distanță), prin intermediul câmpului electromagnetic. În lucrare se analizează posibilitatea efectuării măsurărilor fără ca instrumentul de măsură să interacționeze, nici într-un mod, cu obiectele măsurate.

Cuvinte – cheie: măsurări, interacțiune, efect cuantic Zenon.

1. Introducere

În general, procesul de măsurare presupune determinarea unei mărimi fizice pe cale experimentală. Însă, în dependență de scopul pe care îl avem, noțiunea de măsurare poate fi extinsă și la determinarea stării în care se află un obiect. Din acest punct de vedere, măsurarea poate avea drept scop doar determinarea prezenței unui obiect.

După modul de interacțiune a instrumentului de măsură cu obiectul măsurat, măsurările pot fi: prin contact direct și fără contact (la distanță).

În metoda de măsurare prin contact direct, elementul sensibil al instrumentului de măsură interacționează în mod direct cu obiectul măsurat. Exemple: măsurarea dimensiunilor unui obiect cu ajutorul sublerului, măsurarea temperaturii unui corp cu ajutorul termometrului etc.

În metoda de măsurare fără contact, elementul sensibil al instrumentului de măsură nu interacționează direct cu obiectul măsurat. Exemple: măsurarea dimensiunilor unui obiect prin radiolocație, măsurarea temperaturii unui corp cu ajutorul pirometrului etc.

Și într-un caz și în altul instrumentul de măsură interacționează cu obiectul măsurat cel puțin prin intermediul undelor electromagnetice. Dar este oare posibil de a efectua o măsurare fără ca aparatul de măsură să interacționeze nici într-un mod cu obiectul măsurat?

2. Efectuarea măsurărilor fără interacțiune

Pentru prima dată această întrebare au pus-o fizicienii din Israel A. Elitzur și L. Vaidman formulând următoarea problemă [1].

Fie că avem niște lăzi. O parte din ele sunt goale, în altele se află câte o bombă. Fiecare bombă este înzestrată cu o celulă fotoelectrică astfel încât bomba explodează dacă pe ea cade măcar un singur foton. Cum am putea prin metode optice să selectăm lăzile care conțin bombe și cele care nu conțin?

Limitându-ne doar la fizica clasică, problema devine foarte dificilă. Deschizând cutia într-o odaie absolut întunecată, nu vom obține nici o informație despre prezența bombei. Pentru a obține informație avem nevoie de lumină. Însă, prezența măcar a unui foton face ca bomba să explodeze. De aceea, iluminând lăzile, noi putem să determinăm doar în care din ele au fost bombe. Deci problema constă în determinarea prezenței unui obiect fără a interacționa cu el.

Tot Elitzur și Vaidman au propus o variantă de rezolvare a problemei utilizând interferometrul Mach-Zehnder (fig. 1). Acest interferometru este alcătuit din două oglinzi absolut reflectatoare (2 și 3) și două – semitransparente (1 și 4). Oglinda semitransparentă 1 împarte raza de lumină în două fascicule. În urma suprapunerii acestor fascicule, detectoarele D-light și D-dark vor înregistra tabloul de interferență a luminii. Lungimile brațelor de sus și de jos ale interferometrului pot fi alese astfel, încât pentru detectorul D-light să obținem condiția de maxim al interferenței, iar pentru detectorul D-dark – condiția de minim. Deci, detectorul D-light va înregistra prezența luminii, iar detectorul D-dark – nu. Cu alte cuvinte, probabilitatea ca un foton să ajungă la detectorul D-light este egală cu unitatea, iar probabilitatea să ajungă la detectorul D-dark este nulă.

Acum să presupunem că în brațul de sus al interferometrului se introduce una din lăzi (fig. 2).

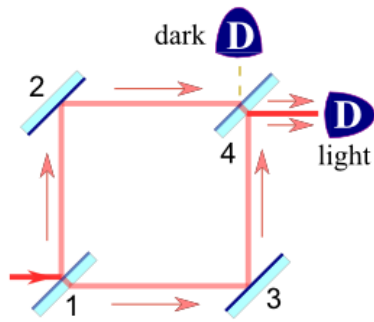


Fig. 1

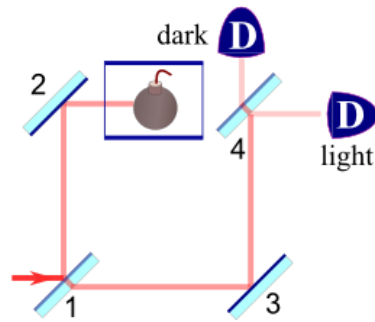


Fig. 2

Dacă lada este goală, lumina trece liber prin ea și tabloul nu se modifică. Ce se întâmplă dacă în calea luminii se va afla lada cu bombă? Vom judeca din punct de vedere a teoriei corpusculare a luminii. Cu probabilitatea de 0,5 fotonul poate să meargă prin brațul de sus a interferometrului și bomba va exploda. Cu aceeași probabilitate el poate să meargă prin brațul de jos. Ajungând la oglinda semitransparentă 4, fotonul cu probabilitatea 0,25 va ajunge la detectorul D-light (în acest caz nu vom obține nici o informație despre prezența bombei) și cu aceeași probabilitate – la detectorul D-dark, înregistrând în acest mod prezența bombei.

În cazul unui singur foton, ultimul nu poate ajunge la detectorul D-dark în lipsa bombei, iar în prezența bombei el poate ajunge la acest detector numai dacă nu interacționează cu bomba (în caz contrar bomba explodează). Deci, prezența bombei poate fi înregistrată fără ca fotonul să interacționeze cu ea.

Toate cele expuse au loc datorită dualismului undă – corpuscul a luminii. În lipsa obiectului din brațele interferometrului fotonul se comportă ca o undă și obținem fenomenul de interferență. În prezența obiectului fotonul se comportă ca o particulă și cu probabilitatea de 0,25 poate ajunge la detectorul D-dark.

Deci, noi vom putea selecta doar 25% din toate lăzile cu bombe (celelalte ori vor exploda, dacă fotonul va merge prin brațul de sus al interferometrului, ori nu vom cunoaște nimic despre conținutul lăzii, dacă fotonul va merge prin brațul de jos al interferometrului și va ajunge la D-light). Modificând indicele de reflexie al oglinzilor semitransparente, se poate obține o eficiență egală cu 50%. Dar nici aceasta nu este limita.

Probabilitatea explodării unei bombe poate fi redusă practic la zero utilizând așa – numitul efect cuantic Zenon descoperit în anul 1977 de fizicienii americani B. Misra, și G. Sudarshan [2]. Conform acestui efect, dacă vom observa dezintegrarea unei particule radioactive, atunci procesul de dezintegrare se va încetini. Cu cât mai des vom face observațiile, cu atât mai mult se va încetini procesul. Dacă particula va fi observată permanent, atunci dezintegrarea ei va deveni imposibilă.

Pentru a înțelege natura efectului cuantic Zenon vom recurge la o explicație a efectului, referindu-ne la una din aplicațiile lui în optică [3].

Fie că o rază de lumină polarizată orizontal trece printr-o serie de medii optic active (fig. 3) și în rezultat lumina polarizată orizontal devine polarizată vertical (amintim că mediul optic activ rotește planul de polarizare a luminii). Deci planul de polarizare a luminii se rotește cu unghiul $\alpha_0 = 90^\circ$. Să presupunem că în total avem $N=6$ medii optic active și fiecare din ele rotește planul de polarizare a luminii cu $\alpha = 90^\circ / N = 15^\circ$. În rezultat, probabilitatea trecerii unui foton printr-un polarizator orizontal va fi nulă și detectorul nu va înregistra lumină.

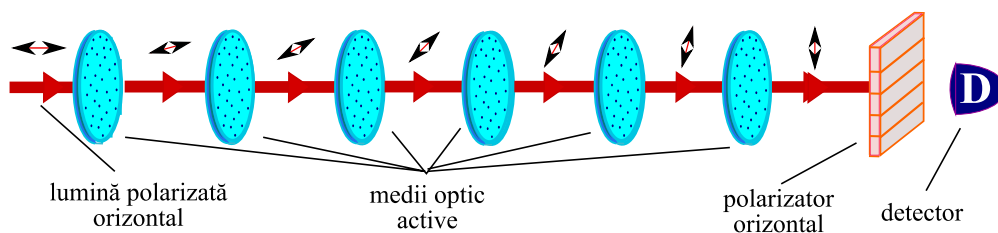


Fig. 3

Acum să presupunem că după fiecare mediu optic activ se plasează câte un polarizator orizontal (fig. 4). Trecând prin primul mediu optic activ, planul de polarizare a luminii se rotește cu unghiul $\alpha = 15^\circ$.

Conform legii lui Malus, probabilitatea că fotonul nu va fi absorbit de către polarizator este $p_1 = \cos^2 \alpha$. Dacă fotonul nu va fi absorbit, atunci el va rămâne polarizat orizontal.

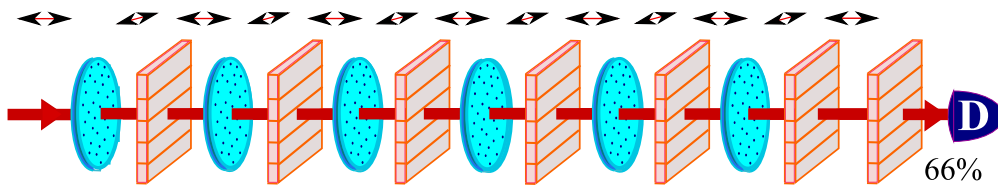


Fig. 4

Trecând prin al doilea mediu optic activ, planul de polarizare a luminii iarăși se rotește cu unghiul $\alpha = 15^\circ$. Probabilitatea că fotonul va trece prin ambele polarizatoare este $p_2 = p_1 \cos^2 \alpha = (\cos^2 \alpha)^2$. Dacă fotonul nu va fi absorbit, atunci el iarăși va fi polarizat orizontal. După N etape, probabilitatea că fotonul va ajunge la detector este

$$p = (\cos^2 \alpha)^N. \quad (1)$$

În cazul nostru, pentru $\alpha = 15^\circ$ obținem: $p = 66\%$. Deci, în lipsa polarizatoarelor lumina la detector nu va ajunge, iar în prezența lor, 66% din lumină va ajunge la detector.

Pentru un număr mare de module substanță optic activă – polarizator, din expresia (1) obținem

$$p = (1 - \sin^2 \alpha)^N \approx (1 - \alpha^2)^N \approx 1 - N\alpha^2, \text{ sau}$$

$$p = 1 - \frac{\alpha_0^2}{N}. \quad (2)$$

Din expresia (2) vedem că pentru un număr foarte mare de module ($N \rightarrow \infty$) fotonul nici odată nu va fi absorbit ($p = 1$). Menționăm că aceasta se va întâmpla numai în prezența polarizatoarelor. În aceasta și constă efectul Zenon. Rolul observatorului în acest caz îl joacă polarizatorul. Cum numai substanța optic activă începe să rotească planul de polarizare a fotonului, polarizatorul îl întoarce la stare inițială.

La fel și în cazul particulei radioactive. Cum numai particula „începe să se dezintegreze”, observarea ei face ca funcția de undă a particulei să sufere un colaps și, dacă intervalul de timp dintre măsurători este suficient de mic, funcția de undă se reduce înapoi la starea inițială. Astfel, măsurătorile frecvente pot încetini evoluția dinamică a unui sistem cuantic și pot împiedica în cele din urmă trecerea sistemului la o stare diferită de cea inițială.

Astfel, observările care au loc în afara sistemului în care se află particula radioactivă și care dau un rezultat negativ (produsele dezintegrării lipsesc) provoacă localizarea particulei în sistemul radioactiv și micșorează viteza de dezintegrare. Deci, dacă produsele dezintegrării lipsesc, rezultă că dezintegrarea n-a avut loc. Menționăm că o interacțiune reală a aparatului de măsură cu produsele dezintegrării **nu are loc** (deoarece aceste produse pur și simplu lipsesc) și rămâne destul de neclar cum procesul de măsurare a putut să influențeze asupra procesului de dezintegrare.

Efectul cuantic Zenon a fost confirmat experimental la sfârșitul anului 1989 de către grupul condus de D. Wineland de la The National Institute of Standards and Technology (Boulder, USA) [4].

Vom analiza una din metodele cu ajutorul căreia, utilizând efectul cuantic Zenon, putem face ca probabilitatea explodării unei bombe să fie oricât de mică [3].

În interferometrul Mach-Zehnder oglinzile semitransparente sunt înlocuite cu două polarizatoare (1 și 2) care sunt transparente pentru lumina polarizată orizontal și reflectă lumina polarizată vertical (fig. 5). Raza de lumină, care inițial este polarizată orizontal, intră pe lângă oglinda 3 în interferometru. Substanța optic activă 4 rotește planul de polarizare a luminii cu $90^\circ / N$. Ajungând la polarizatorul 1, raza de lumină se descompune în două componente: una polarizată orizontal, care trece prin brațul de sus al interferometrului și una polarizată vertical, care trece prin brațul de jos. Trecând prin polarizatorul 2, razele de lumină se compun și obținem iarăși o rază de lumină, planul de polarizare al căreia este rotit cu $90^\circ / N$ față de orizontală. Reflectându-se de la oglinzile 5, 6 și 3, raza de lumină ajunge iarăși la substanța optic activă și ciclul se repetă. După N cicluri raza iese din interferometru, trece prin polarizatorul orizontal P și este

înregistrată de detector. Dacă brațele interferometrului sunt egale și în ele nu se află nici un obiect, atunci raza va deveni polarizată vertical și ea nu va putea trece prin polarizator. De aceea detectorul nu va înregistra lumină.

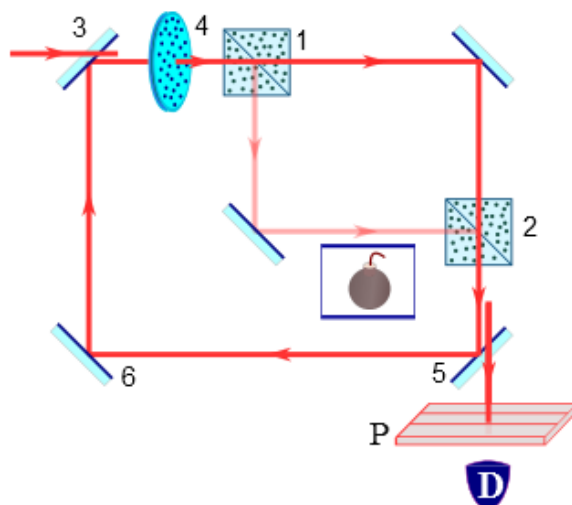


Fig. 5

Acum să presupunem că în brațul de jos al interferometrului se află un obiect (lada cu bombă). Pentru simplitate vom considera iarăși cazul $N=6$. Ajungând la polarizatorul 1, există probabilitatea $p = 1 - \cos^2 15^\circ = 0,067$ că fotonul va trece prin ramura de jos a interferometrului. Dacă aceasta nu se va întâmpla, atunci fotonul va rămâne polarizat orizontal. După N cicluri, cu o probabilitate de 66% fotonul va ieși din interferometru polarizat orizontal și va fi înregistrat de detector. Mărind numărul de cicluri, putem obține o probabilitate oricât de mică că fotonul va fi absorbit vre-o dată de către obiect.

Astfel, măsurând starea de polarizare finală a fotonului, putem stabili prezența bombei în ladă. În aceasta și constă esența metodei de măsurare fără interacțiune.

Concluzii

Posibilitatea efectuării măsurărilor fără interacțiune a fost demonstrată experimental. În anul 2012 lui D. Wineland i se decernează Premiului Nobel în fizică pentru metodele experimentale care au permis efectuarea măsurărilor și manipularea sistemelor cuantice individuale. Experiențele efectuate de D. Wineland se bazează anume pe realizarea măsurărilor fără interacțiune. Probabil este prematur să vorbim la moment despre o aplicare pe larg a măsurărilor fără interacțiune. Dar cine putea să-și imagineze cu 200 ani în urmă ce utilizări ar putea avea curentul electric? Nu este exclus ca în viitorul apropiat măsurările fără interacțiune să devină un lucru la fel de banal ca și măsurarea temperaturii unui obiect cu ajutorul curentului electric.

Bibliografie

1. Elitzur A. C., Vaidman L. (1993). Quantum mechanical interaction-free measurements. *Found. Phys.* **23**, 987-997.
2. Misra B., Sudarshan E.C.G. (1977). The Zeno's paradox in quantum theory. *Journal of Mathematical Physics* **18** (4), p.756-763.
3. Kwiat P. G., Weinfurter H., Zeilinger A. Quantum Seeing in the Dark, *Sci. Am.* November (1996), 74.
4. Itano W.M., Heinzen D.J., Bollinger J.J., Wineland D.J. (1990). Quantum Zeno effect. *Phys. Rev. A* **41** (5): 2295-2300.