

CZU: 530.145

EFECTUL CUANTIC ZENON

Dr. Vitalie CHISTOL, Lect. univ. Ana POPOVICI, Dr. habil. Vasile TRONCIU

Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău

E-mail: vitalie.chistol@astro.utm.md, ana.popovici@utm.md, vasile.tronciu@utm.md

Rezumat. *Efectul cuantic Zenon este unul dintre cele mai frumoase și intrigante efecte descoperite în ultimul timp în mecanica cuantică. Acest efect a primit numele filosofului grec Zenon din Elea (cca 495 - cca 430 î.H.) Lucrarea pune în evidență esența acestui fenomen și unele dintre posibilele sale manifestări macroscopice.*

Cuvinte cheie: *efectul cuantic Zenon, orientarea păsărilor în spațiu, măsurări fără interacțiune, apocalipsa cuantică.*

Abstract. *The quantum Zeno effect is one of the most beautiful and intriguing effects recently discovered in quantum mechanics. This effect was named after the Greek philosopher Zeno of Elea (c.495 - c. 430 BC). The paper highlights the essence of this phenomenon and some of its possible macroscopic manifestations.*

Keywords: *quantum Zeno effect, orientation of birds, non-interaction measurements, quantum apocalypse.*

1. Esența efectului cuantic Zenon

În anii 1898-99, A. Michelson scria [1]: „Deoarece nu putem declara cu fermitate că viitorul fizicii poartă în sine enigme mai interesante decât cele din trecut, pare foarte probabil că majoritatea principiilor de bază ale fizicii au fost deja strict stabilite și dezvoltarea ei de mai departe trebuie căutată în aplicarea acestor principii la toate fenomenele observate. Unul din fizicienii de vază (este vorba de Lordul Kelvin) afirma că în fizică descoperirile viitoare trebuie căutate în cifra a șasea de după virgulă”. Așadar, spre finele secolului al XIX-lea se părea că fizica a devenit aproape perfectă și că toate efectele mai importante din fizică au fost deja descoperite.

Însă la începutul secolului XX, mulțimea de paradoxuri existente și sesizate de cercetători la nivel de micro-lume a condus la modificarea radicală a concepțiilor legate de fundamentele fizicii și la apariția unei noi ramuri a acestei științe – fizica cuantică. Unul dintre cele mai frumoase și intrigante efecte descoperite recent în mecanica cuantică este *efectul cuantic Zenon*. Dar înainte de a scrie despre esența acestui fenomen - câteva cuvinte despre Zenon.

Zenon din Elea (cca. 495 – cca. 430 î.H.) a fost un filozof grec pre-socratic din sudul Italiei, membru al școlii filozofice a eleaților, întemeiată de Parmenides. Considerat de Aristotel fondatorul dialecticii, el este cunoscut mai ales pentru paradoxurile (aporiile) sale. Sunt cunoscute 40 de aporii ale lui Zenon. Cea mai cunoscută este aporia despre Ahile și broasca țestoasă (Ahile este un personaj din mitologia Greciei antice, unul din eroii principali în „Iliada” lui Homer, despre care se spune că era un alergător foarte iute). Să presupunem că Ahile aleargă cu o viteză de zece ori mai mare decât viteza cu care se deplasează o broască țestoasă și se află în urma acesteia la o distanță de 100 m (fig. 1). În intervalul de timp în care Ahile parcurge distanța de 100 m broasca țestoasă parcurge 10 m. În intervalul de timp în care Ahile parcurge distanța de 10 m broasca țestoasă parcurge 1 m. Procesul poate continua la nesfârșit, însă Ahile nu va ajunge niciodată broasca țestoasă.

Mai puțin cunoscută este aporia despre săgeata în zbor: o săgeată care zboară este în repaus, deoarece în *orice* moment de timp se poate considera că ea ocupă o anumită poziție în spațiu, față de care săgeata se află în repaus. Însă odată ce săgeata se află în repaus în orice moment de timp, rezultă că ea este în repaus tot timpul, deci săgeata nu se mișcă.

Anume această aporie i-a inspirat pe fizicienii americani B. Misra și G. Sudarshan, care în anul 1977 au publicat articolul intitulat „Paradoxul lui Zenon în fizica cuantică” [2]. Efectul, care la prima vedere pare straniu și neverosimil, a fost numit *efectul cuantic Zenon*. Conform acestui efect, dacă vom urmări dezintegrarea unei particule radioactive, atunci procesul de dezintegrare se va încetini. Cu cât vom face observațiile mai des, cu atât mai mult se va încetini procesul. Dacă particula va fi

urmărită în permanență, atunci dezintegrarea ei va deveni imposibilă. Spre deosebire de aporia lui Zenon unde săgeata totuși zboară, în efectul cuantic Zenon procesul de dezintegrare încetinește cu adevărat.

Pentru a înțelege natura efectului cuantic Zenon, sunt necesare cunoștințe solide de mecanica cuantică. Pentru simplitate, vom recurge la explicația efectului, referindu-ne la una din aplicațiile sale în optică [3].

Considerăm o rază de lumină polarizată orizontal ce traversează o serie de medii optice active (fig. 2). În final, la ieșirea din mediile optice active, raza de lumină devine polarizată vertical (amintim că un mediu optic activ rotește planul de polarizare al luminii). Deci, planul de polarizare al luminii s-a rotit cu unghiul $\alpha_0 = 90^\circ$. Să presupunem că în total avem $N = 6$ medii optice active și fiecare dintre ele rotește planul de polarizare al luminii cu $\alpha = 90^\circ / N = 15^\circ$. Ca rezultat, probabilitatea de trecere a unui foton prin polarizatorul orizontal final va fi nulă și detectorul D va indica absența luminii.

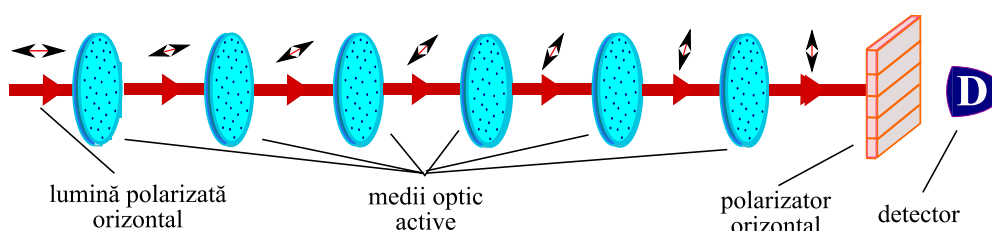


Figura 2

Acum să presupunem că după fiecare mediu optic activ este plasat câte un polarizator orizontal (fig. 3). Lumina traversând primul mediu optic activ, planul ei de polarizare se rotește cu unghiul $\alpha = 15^\circ$. Conform legii lui Malus, probabilitatea ca fotonul să nu fie absorbit de polarizator este $p_1 = \cos^2 \alpha$. Dacă fotonul nu este absorbit, atunci el rămâne polarizat orizontal.



Figura 1

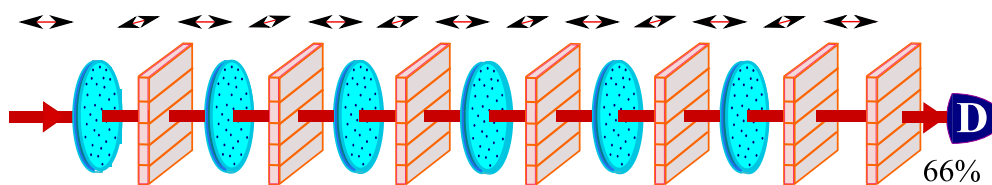


Figura 3

Lumina traversând al doilea mediu optic activ, planul ei de polarizare 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, el va fi iarăși polarizat orizontal. Probabilitatea ca fotonul să ajungă la detector după traversarea a N polarizatoare este

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

În cazul nostru, când $\alpha = 15^\circ$, obținem: $p = 66\%$. Deci, în lipsa polarizatoarelor lumina nu va ajunge la detector, iar în prezența acestora detectorul va înregistra 66% din lumina incidentă.

În cazul unui număr N foarte mare de elemente “substanță optic activă – polarizator”, din expresia (1) se obține

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

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

Din formula (2) rezultă că în cazul unui număr foarte mare de elemente ($N \rightarrow \infty$) avem $p = 1$, adică fotonul niciodată nu va fi absorbit. Menționăm că această situație se poate întâmpla numai în prezența polarizatoarelor. Tocmai aceasta este esența efectului Zenon. În acest caz, rolul observatorului îl joacă polarizatorul. De îndată ce substanța optic activă începe să rotească planul de polarizare al fotonului, polarizatorul îl readuce la starea inițială.

Un caz similar îl reprezintă particula radioactivă. De îndată ce particula „începe să se dezintegreze”, observarea acesteia face ca funcția de undă a particulei să sufere un colaps. Dacă intervalul de timp dintre măsurători este suficient de mic, funcția de undă revine la starea inițială. Astfel, măsurătorile frecvente pot încetini evoluția dinamică a unui sistem cuantic și pot împiedica, în cele din urmă, trecerea sistemului într-o stare diferită de cea inițială.

Ca rezultat, observațiile care se efectuează 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 reduc viteza ei de dezintegrare. Deci, dacă lipsesc produsele dezintegrării, rezultă că dezintegrarea nu a avut loc. Menționăm că *nu are loc* o interacțiune reală a aparatului de măsură cu produsele dezintegrării (deoarece aceste produse pur și simplu lipsesc) și de aceea nu este clar cum procesul de măsurare a influențat procesul de dezintegrare.

În acest caz procesul de măsurare poate fi comparat cu observarea unui măr copt care este gata să cadă din pom. Observațiile efectuate asupra mărului micșorează probabilitatea căderii acestuia. Cel mai interesant este faptul că noi nu urmărim însuși mărul, ci locul unde el trebuie să cadă. Astfel, urmărind locul de lângă tulpină, influențăm starea mărului din pom.

(Probabil, cu ajutorul efectului cuantic Zenon s-ar putea explica și principiul lui Le Chatelier. Conform acestuia, dacă asupra unui sistem aflat în echilibru stabil se acționează din exterior, modificându-i unii dintre parametrii de echilibru (temperatură, presiune, concentrație etc.), atunci în sistem se amplifică procesele care se opun acestor modificări.)

Efectul cuantic Zenon a fost confirmat experimental la sfârșitul anului 1989 de către un grup de cercetători americani, de la The National Institute of Standards and Technology (Boulder, USA) [4]. Grupul era condus de D. Wineland (Laureat al Premiului Nobel pentru Fizică, 2012), care a cercetat tranzițiile cuantice în atomii de Be ce au loc sub acțiunea radiației electromagnetice.

O confirmare mai recentă a efectului cuantic Zenon a fost obținută în anul 2006 de către un alt grup de cercetători, condus de W. Ketterle (Laureat al Premiului Nobel pentru Fizică, 2001) care au utilizat atomi de rubidiu aflați în stare nestabilă în calitate de particule, a căror dezintegrare a fost încetinită [5]. În timp ce în experiențele precedente încetinirea procesului de dezintegrare se reușea doar de două – trei ori, autorii acestei experiențe au reușit să observe o încetinire a procesului de dezintegrare de treizeci de ori!

Efectul cuantic Zenon poate avea unele consecințe foarte interesante și, la prima vedere, neverosimile. Vom examina câteva dintre acestea.

2. Orientarea în spațiu a păsărilor migratoare

Păsările migratoare au uimit mereu oamenii pentru capacitatea lor de a se orienta în spațiu. Efectuând călătorii de mii de kilometri, păsările se întorc la locurile lor de baștină indiferent de condițiile climaterice în care se află teritoriile pe care le traversează. Care este secretul capacității extraordinare a păsărilor de a se orienta în spațiu?

La sfârșitul anilor '70 fizicianul Klaus Schulten a descoperit că responsabilă pentru capacitatea păsărilor de a naviga este proteina denumită cryptochrom [6]. Cryptochromele sunt fotoreceptori care reacționează imediat la lumina albastră-violetă, fiind sensibili și la câmpul magnetic. Ele au fost descoperite în neuronii din retina ochiului de porumbel. Sub influența luminii în cryptochrome se formează o pereche ion – radical. Atât ionul, cât și radicalul au câte un electron pe orbita exterioară, iar perechea respectivă poate să se afle în una din două stări cuantice distincte: a) cu spinii electronilor paraleli și b) cu spinii electronilor antiparaleli. În prezența câmpului magnetic al Pământului, aceste stări sunt ambele instabile. Stabilă este doar starea numită *coerentă*, care este o superpoziție a stărilor a) și b). Doar ea este starea care contribuie la vizualizarea câmpului magnetic al Pământului în retina ochilor păsărilor.

S-ar părea că secretul orientării păsărilor în spațiu este astfel dezvăluit. Însă, a apărut o altă problemă: viteza de recombinare a ionilor este foarte mare și complexele moleculare care se obțin sunt foarte instabile. Deoarece timpul de viață al lor este foarte mic, ele nu reușesc să reacționeze la acțiunea câmpului geomagnetic.

Profesorul grec Iannis Kominis de la University of Crete (din Heraklion, Grecia) susține însă că, datorită efectului cuantic Zenon, timpul de viață al perechilor ion – radical devine suficient de mare pentru ca ele să fie capabile să reacționeze la câmpul magnetic al Pământului [7]. După părerea lui I. Kominis, procesul de recombinare este echivalent cu procesul de măsurare. O frecvență mare a recombinării înseamnă că măsurările se efectuează foarte des și, datorită efectului cuantic Zenon, frecvența recombinărilor se micșorează, iar durata stării de coerență crește. Astfel, câmpul magnetic terestru va avea suficient timp pentru a orienta spinii electronilor, pentru ca păsările să „vadă” acest câmp. Însuși Kominis numește această situație „contrară intuiției”. Într-adevăr, în mod paradoxal, distrugând coerența cuantică, recombinarea ionilor contribuie, în același timp, la creșterea stabilității ei.

Observațiile efectuate asupra stolurilor de păsări migratoare au arătat că, în medie, eroarea în determinarea direcției câmpului magnetic este de 15° . Calculele efectuate de I. Kominis au arătat că această eroare nu poate depăși 18° . Astfel, se poate vorbi despre o bună concordanță între calcule și observații.

Este important a se menționa caracterul neobișnuit al rezultatelor obținute de Kominis: capacitatea macroscopică a păsărilor de a „simți” câmpul magnetic este determinată de un efect care până în prezent se considera că descrie doar comportamentul obiectelor cuantice microscopice.

3. Măsurări fără interacțiune.

Să ne imaginăm că am avea un anumit număr de lăzi. O parte dintre acestea sunt goale, însă în fiecare din celelalte se află câte o bombă. Fiecare bombă este prevăzută cu o celulă fotoelectrică astfel încât bomba explodează, chiar dacă pe ea cade și un singur foton. Cum am putea prin metode optice să separăm lăzile cu bombe de cele care nu conțin bombe?

Dacă ne limităm doar la fizica clasică, problema devine foarte dificilă de rezolvat. Deschizând cutia într-o încăpere absolut întunecată, nu vom putea obține nici o informație despre prezența sau absența bombei. Pentru a obține informația necesară avem nevoie de lumină. Însă prezența chiar și a unui singur foton face ca bomba să explodeze. De aceea, iluminând lăzile, putem determina doar în care din ele *au fost* bombe. Așadar, problema constă în determinarea prezenței unui obiect fără a interacționa cu acesta. Această problemă a fost formulată pentru prima dată de către fizicienii A. Elitzur și L. Vaidman din Israel în anul 1993. Ei au obținut și prima soluție a problemei [8] cu ajutorul unui interferometru de tip Mach-Zehnder (fig. 4).

Interferometrul este alcătuit din două oglinzi reflectoare absolute (2 și 3) și două lame semitransparente (1 și 4). Lama semitransparentă 1 despică raza de lumină incidentă în două fascicule. În urma suprapunerii acestor fascicule, detectoarele D-light și D-dark vor înregistra o imagine de interferență a luminii. Lungimile brațului superior și a celui inferior ale interferometrului pot fi alese astfel, încât în detectorul D-light să obținem maxim de interferență, iar în detectorul D-dark – minim de interferență. Astfel, detectorul D-light va înregistra prezența luminii, iar detectorul D-dark – absența acesteia. 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.

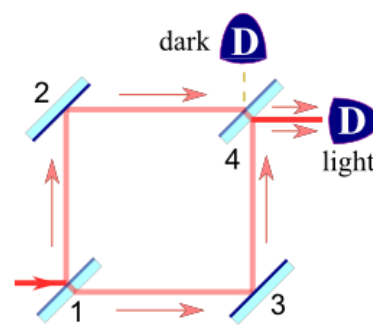


Figura 4

Acum să presupunem că în brațul superior al interferometrului se introduce una din lăzi (fig. 5). Dacă lada este goală, lumina trece liber prin ea și imaginea nu se modifică. Ce se va întâmpla, dacă în calea luminii se va afla lada cu bombă? Vom analiza din punctul de vedere al teoriei corpusculare a luminii. Cu probabilitatea de 0,5, fotonul poate să treacă prin brațul superior al interferometrului și bomba va exploda. Cu aceeași probabilitate el poate să treacă prin brațul inferior. Reflectându-se pe lama semitransparentă 4, fotonul va ajunge, cu probabilitatea 0,25, la detectorul D-light (în acest caz, nu se va obține nici o informație despre prezența bombei) și cu aceeași probabilitate – la detectorul D-dark, înregistrându-se în acest mod prezența bombei.

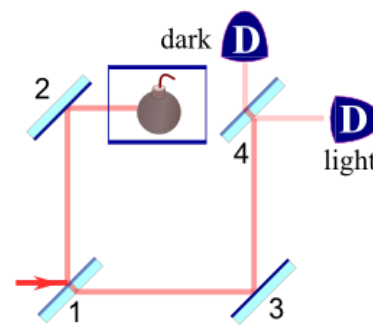


Figura 5

În cazul unui singur foton, acesta 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). Astfel, prezența bombei poate fi înregistrată fără ca fotonul să interacționeze cu ea.

Toate cele expuse au loc datorită dualismului undă – corpuscul al 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, vom putea selecta doar 25% din toate lăzile cu bombe. Celelalte bombe fie vor exploda, dacă fotonul se va deplasa prin brațul superior al interferometrului, fie nu vom cunoaște nimic despre conținutul lăzii, dacă fotonul se va deplasa prin brațul inferior al interferometrului și va ajunge la detectorul D-light. Modificând coeficientul de reflexie al lamelor semitransparente, se poate obține o eficiență de 50%. Dar nici aceasta nu este o limită.

Utilizând efectul cuantic Zenon, se poate face ca probabilitatea explodării unei bombe să fie oricât de mică. Aceasta se poate realiza prin mai multe metode. Vom analiza una din ele [3].

În interferometrul Mach-Zehnder, lamele semitransparente sunt înlocuite cu două polarizatoare (1 și 2) care sunt transparente pentru lumina polarizată orizontal și reflectă lumina polarizată vertical (fig. 6). Raza de lumină, care inițial este polarizată orizontal, intră în interferometru pe lângă oglinda 3. Substanța optic activă 4 rotește planul de polarizare al luminii cu $90^\circ / N$. Ajungând la polarizatorul 1, raza de lumină se descompune în două componente: una polarizată orizontal, care trece prin brațul superior al interferometrului și una polarizată vertical, care trece prin brațul inferior. Traversând polarizatorul 2, razele de lumină se reunesc și se obține iarăși o singură rază de lumină, al cărei plan de polarizare este rotit cu $90^\circ / N$ față de orizontală. Reflectându-se pe 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.

Să presupunem că în brațul inferior al interferometrului se află un obiect (lada cu bombă). Pentru simplitate, vom considera iarăși cazul $N=6$.

Ajungând la polarizatorul 1, există probabilitatea $p = 1 - \cos^2 15^\circ = 0,067$ ca fotonul să treacă prin ramura inferioară 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 ca la un moment dat fotonul să fie absorbit 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.

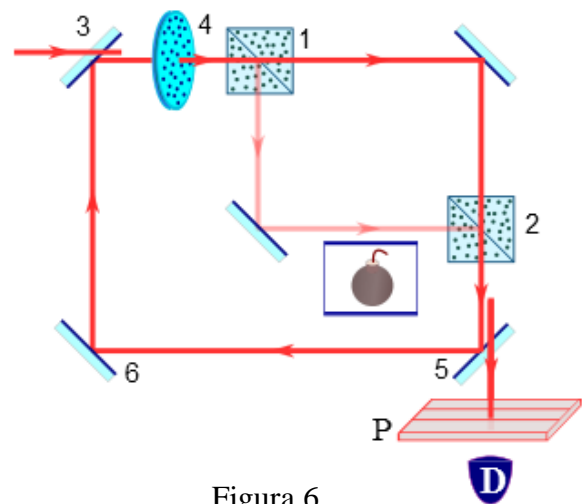


Figura 6

4. Apocalipsa cuantică

Descoperirea de către astronomi, în 1998, a energiei întunecate i-a determinat pe fizicienii americani Lawrence Krauss și James Dent [9] să facă o presupunere halucinantă și neașteptată că ar fi crescut considerabil probabilitatea „sfârșitului lumii” (a celui de-al doilea Big – Bang).

Conform cercetărilor teoretice, Universul nostru a luat naștere în urma unei Mari Explozii (Big Bang) cu aproximativ 14 miliarde de ani în urmă. Din acel moment, Universul este în expansiune permanentă. Până nu demult se considera că expansiunea Universului este încetinită din cauza interacțiunii gravitaționale dintre galaxii. În anii 1998-1999, însă, două grupuri de astronomi în frunte cu fizicienii Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt și Adam G. Riess au demonstrat că Universul se extinde accelerat. Aceasta ar însemna că există o forță de respingere între galaxii (un fel de antigravitație). Pentru descoperirea expansiunii accelerate a Universului, Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt și Adam G. Riess au fost distinși cu Premiul Nobel pentru Fizică, 2011. În prezent, se consideră că antigravitația este creată de o formă deosebită de energie, numită energie întunecată, în care sunt „scufundate” toate galaxiile.

Krauss consideră că în urma Marii Explozii o bună parte a materiei, care la acel moment exista sub o formă deosebită de energie, s-a transformat în energie obișnuită, din care s-ar fi format Universul nostru. Însă o parte din această energie (energia întunecată) nu s-a transformat în materie. Cu alte cuvinte, vidul fals de înaltă energie nu s-ar fi transformat în vid obișnuit cu energie nulă, ci într-un alt vid fals cu o energie mai mică, dar diferită de zero ($\sim 10^{-9}$ J/m³).

În opinia lui Krauss, energia întunecată se poate transforma și ea, în orice moment, în materie. Adică, în orice moment ar putea avea loc un al doilea Big – Bang care va distruge Universul nostru obișnuit. Când se va întâmpla aceasta, nu se cunoaște. Universul poate fi comparat cu un atom de materie radioactivă, care în orice moment se poate dezintegra, dar momentul la care s-ar putea întâmpla aceasta depinde de întâmplare. Krauss consideră materia întunecată un sistem cuantic care se află într-o stare nestabilă. Cu alte cuvinte, noi trăim pe un „vulcan” care în orice moment poate să erupă, iar momentul erupției poate fi influențat de efectul cuantic Zenon.

S-ar părea că efectul cuantic Zenon ne sugerează altceva: cu cât mai frecvent vom observa o particulă radioactivă, cu atât mai mică va fi probabilitatea că aceasta să se dezintegreze. Însă conform teoriei, dacă un sistem cuantic instabil a existat foarte mult timp în această stare, atunci crește brusc probabilitatea ca el să se mențină în această stare. Deci, există un punct critic, după care probabilitatea ca sistemul să se descompună devine foarte mică. Krauss consideră că Universul nostru a depășit acest punct. Însă, cum se știe, în 1998 astronomii au descoperit energia întunecată. În conformitate cu efectul cuantic Zenon, această descoperire a întors Universul la punctul critic. În mod corespunzător, a crescut brusc probabilitatea celui de-al doilea Big – Bang.

În final, este de menționat faptul că rămâne neclar cum observarea cu ajutorul aparatelor de pe Pământ a luminii radiate de galaxii cu milioane de ani în urmă ar putea influența aceste obiecte sau chiar Universul în ansamblu.

Bibliografie

1. Treiman S. *The Odd Quantum*, Princeton University Press, 2001.
2. Misra B., Sudarshan E.C.G. The Zeno's paradox in quantum theory, *Journal of Mathematical Physics*, **18** (4), p.756–763 (1977).
3. Kwiat P. G., Weinfurter H., Zeilinger A., *Quantum Seeing in the Dark*, Sci. Am., **74** (1996).
4. Itano W.M., Heinzen D.J., Bollinger J.J., Wineland D.J., (1990). *Quantum Zeno effect*. Phys. Rev. A **41** (5): 2295–2300 (1990).
5. Streed E. W. et al., Continuous and Pulsed Quantum Zeno Effect, Phys. Rev. Lett. **97**, 260402 (2006).
6. Schulten K., Swenberg C. E., Weller A. A Biomagnetic Sensory Mechanism Based on Magnetic Field Modulated Coherent Electron Spin Motion, *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, NF111:1-5, 1978.
7. Kominis I. K. Quantum Zeno effect explains magnetic-sensitive radical-ion-pair reactions, Phys. Rev. E **80**, 056115 (2009).
8. Elitzur A. C., Vaidman L. (1993). Quantum mechanical interaction-free measurements, Found. Phys. **23**, 987-97.
9. Lawrence M. Krauss, James Dent. *Late Time Behavior of False Vacuum Decay: Possible Implications for Cosmology and Metastable Inflating States*, Phys. Rev. Lett. **100**, 171301 (2008).

Prezentat la redacție: 20 martie 2020; acceptat: 27 mai 2020.

Articolul este depozitat în baza de date IBN:

https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_numar_revista/26/2138.