

Nicolae Sfetcu

**INTRODUCERE ÎN
TEHNOLOGIILE CUANTICE**

**calculul cuantic
criptografia cuantică
filosofia tehnologiilor cuantice**

MultiMedia Publishing

Introducere în tehnologiile cuantice

Calculul cuantic, criptografia cuantică, filosofia tehnologiilor cuantice

PREVIZUALIZARE

Nicolae Sfetcu¹

Publicat de MultiMedia Publishing

Copyright © 2026 Nicolae Sfetcu. Toate drepturile rezervate

¹ Cercetător - Divizia de Istoria Științei (DIS)/Comitetul Român de Istoria și Filosofia Științei și Tehnicii (CRIFST) al Academiei Române, [ORCID: 0000-0002-0162-9973](https://orcid.org/0000-0002-0162-9973), Web of Science Researcher ID [V-1416-2017](https://www.researcherid.org/V-1416-2017). Email: nicolae@sfetcu.com

Editura MultiMedia Publishing, <https://www.telework.ro/ro/editura/>

ISBN: 978-606-033-958-8

[DOI: 10.58679/MM31480](https://doi.org/10.58679/MM31480)

Secțiunea "Calculul cuantic": Sursa: Ciaran Hughes, Joshua Isaacson, Anastasia Perry, Ranbel F. Sun, Jessica Turner (2021) *Quantum Computing for the Quantum Curious*, Springer Cham, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-61601-4>, licența [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Traducere și adaptare: © 2026 Nicolae Sfetcu

Secțiunea "Criptografia cuantică": Sursa: Xiaoqing Tan (2012). "Introduction to Quantum Cryptography", din *Theory and Practice of Cryptography and Network Security Protocols and Technologies*, Cap. 5, <http://dx.doi.org/10.5772/56092>, licența [CC BY 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/). Traducere și adaptare: © 2026 Nicolae Sfetcu

DECLINARE DE RESPONSABILITATE

Având în vedere posibilitatea existenței erorii umane sau modificării conceptelor științifice, nici autorul, nici editorul și nicio altă parte implicată în pregătirea sau publicarea lucrării curente nu pot garanta în totalitate că toate aspectele sunt corecte, complete sau actuale, și își declină orice responsabilitate pentru orice eroare ori omisiune sau pentru rezultatele obținute din folosirea informațiilor conținute de această lucrare.

Cu excepția cazurilor specificate în această carte, nici autorul sau editorul, nici alți autori, contribuabili sau alți reprezentanți nu vor fi răspunzători pentru daunele rezultate din sau în legătură cu utilizarea acestei cărți. Aceasta este o declinare cuprinzătoare a răspunderii care se aplică tuturor daunelor de orice fel, incluzând (fără limitare) compensatorii; daune directe, indirecte sau consecvente, inclusiv pentru terțe părți.

Înțelegeți că această carte nu intenționează să înlocuiască consultarea cu un profesionist educațional, juridic sau financiar licențiat. Înainte de a o utiliza în orice mod, vă recomandăm să consultați un profesionist licențiat pentru a vă asigura că faceți ceea ce este mai bine pentru dvs.

Această carte oferă conținut referitor la subiecte educaționale. Utilizarea ei implică acceptarea acestei declinări de responsabilitate..

Cuprins

Calculul cuantic, criptografia cuantică, filosofia tehnologiilor cuantice	1
Calculul cuantic.....	4
1 Introducere în superpoziție.....	4
1.1 Superpoziție clasică.....	4
1.2 Superpoziția cuantică	6
1.3 Idei importante	8
1.4 Exerciții	8
2 Ce este un qubit?	9
2.1 Reprezentarea matematică a qubiților	10
2.2 Reprezentare matriceală	12
2.3 Sfera Bloch.....	13
2.4 Realizarea fizică a qubiților	15
2.5 Idei importante	15
2.6 Exerciții	16
3 Crearea superpoziției: Divizorul de fascicul	19
3.1 Divizorul de fascicul	19
3.2 Interferometru Mach-Zehnder.....	26
3.3 Idei importante	29
3.4 Exerciții	29
Bibliografie	34
Cuprins	41
Cartea	42
Ce vei învăța din carte.....	42
Calcul cuantic, explicat pe înțelesul tău.....	42
Criptografie cuantică și QKD (BB84, EPR și nu numai)	42
Filosofia tehnologiilor cuantice: ce înseamnă „a doua revoluție cuantică”	43
Pentru cine este cartea	43
De ce merită	43
Ce include (pe scurt)	43
FAQ.....	43

Calculul cuantic

1 Introducere în superpoziție

În această secțiune, vom trece în revistă conceptele de superpoziție clasică și cuantică. Superpoziția cuantică este cadrul pentru înțelegerea tuturor fenomenelor cuantice. Deoarece nu observăm fenomene cuantice în viața noastră de zi cu zi, poate părea confuză la început. Cu toate acestea, oricât de neintuitivă ar părea lumea cuantică, există un număr vast de experimente care arată în mod concludent că universul funcționează într-adevăr conform legii superpoziției cuantice la cele mai mici distanțe accesibile astăzi². Înainte de a intra în detalii specifice despre superpoziția cuantică, este util să explicăm modul în care termenul „superpoziție” este utilizat în contexte diferite atât în fizica clasică, cât și în cea cuantică. La sfârșitul capitolului, prezentăm activitățile și întrebările aferente. După ce veți dobândi experiență cu superpoziția cuantică prin rezolvarea acestor probleme, aceasta va deveni mai intuitivă. Cu cât câștigați mai multă experiență avansând în această carte, cu atât superpoziția cuantică va avea mai mult sens.

1.1 Superpoziție clasică

În fizica clasică, conceptul de superpoziție este folosit pentru a descrie momentul în care două mărimi fizice sunt adunate pentru a forma o a treia mărime fizică, care este complet diferită de cele două originale. Un exemplu al „principiului superpoziției” în fizica clasică este clar atunci când se lucrează cu unde. Două impulsuri pe o coardă care trec unul prin celălalt vor interfera urmând principiul superpoziției, așa cum se arată în Fig. 1.1. Căștile cu anulare a zgomotului utilizează superpoziția prin crearea de unde sonore cu aceeași magnitudine ca unda sonoră de intrare, dar complet defazate, anulând astfel unda sonoră. Această interferență distructivă este ilustrată în a doua figură a Fig. 1.1.

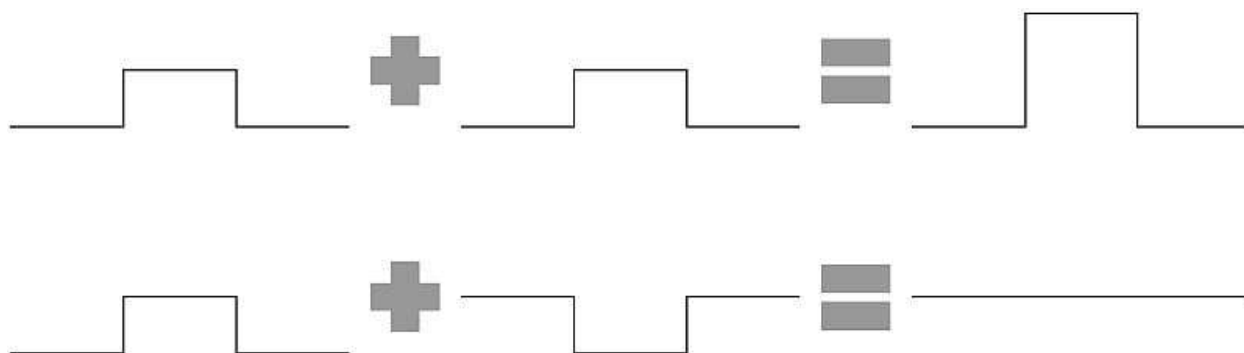


Fig. 1.1 Exemple de interferență constructivă și distructivă datorată principiului clasic al superpoziției

² Aceste experimente au culminat cu teste ale inegalității lui Bell https://en.wikipedia.org/wiki/Bell_test — care arată că particulele pot fi de fapt în două locații în același timp <https://www.quantamagazine.org/physicists-are-closing-the-bell-test-loophole-20170207/>.

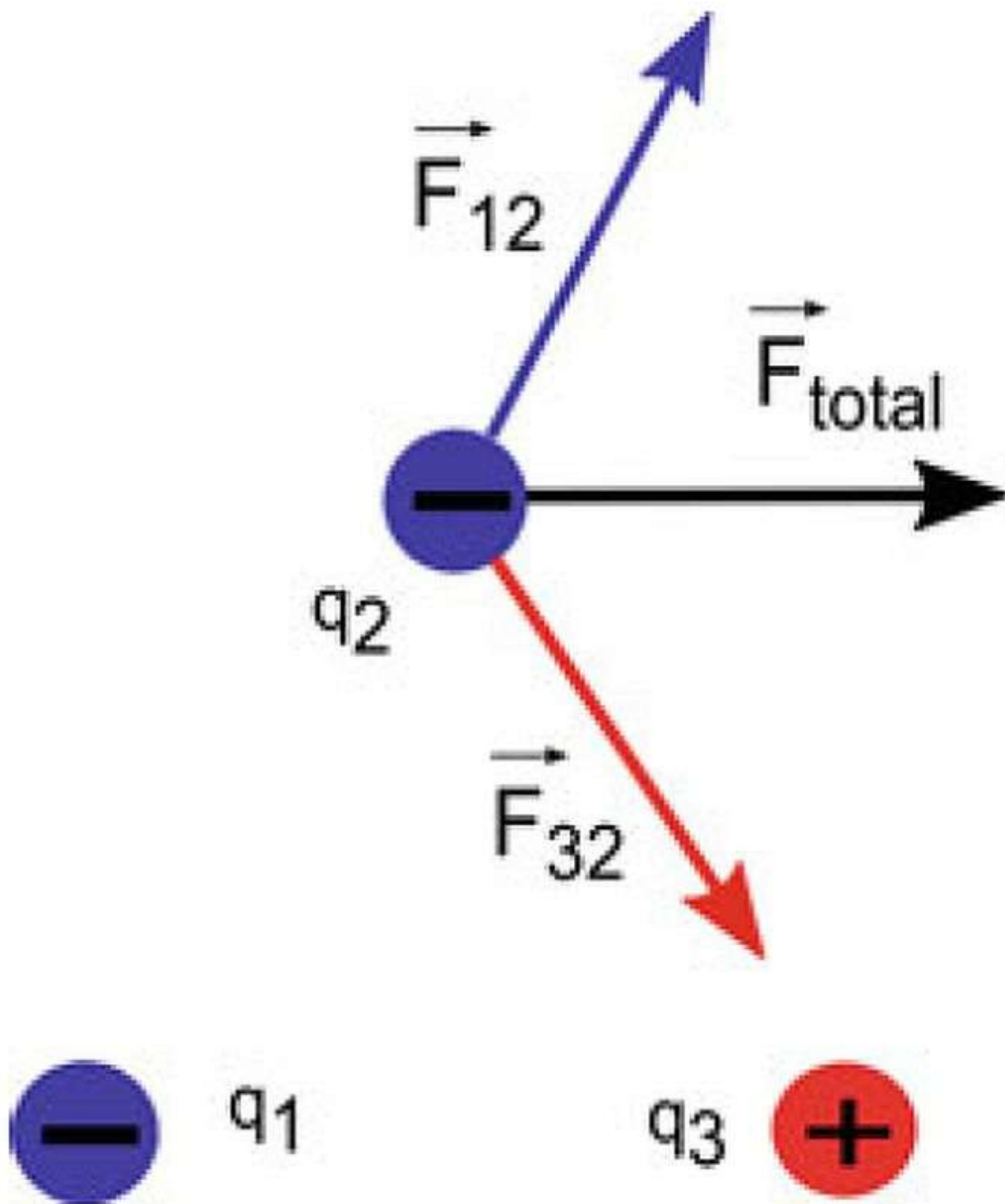


Fig. 1.2 O superpoziție clasică este utilizată pentru a calcula forța electrică totală asupra unei sarcini q_2 datorată sarcinilor q_1 și q_3 de fază, anulând astfel unda sonoră. Această interferență distructivă este ilustrată în a doua figură a Fig. 1.1.

O altă aplicație comună a superpoziției clasice este găsirea magnitudinii și direcției totale a unor mărimi precum forța, câmpul electric, câmpul magnetic etc. De exemplu, pentru a calcula forța electrică totală F_{total} asupra unei sarcini q_2 produsă de alte sarcini q_1 și q_3 , s-ar însuma

forțele produse de fiecare sarcină individuală: $F_{\text{total}} = F_{12} + F_{32}$. Provocarea aici este că forțele sunt vectori, deci este necesară adunarea vectorială, așa cum se arată în Fig. 1.2.

1.2 Superpoziția cuantică

Superpoziția cuantică este un fenomen asociat sistemelor cuantice. Sistemele cuantice includ obiecte mici, cum ar fi nuclee, electroni, particule elementare și fotoni, pentru care se observă dualitatea undă-particulă și alte efecte non-clasice. De exemplu, în mod normal, v-ați aștepta ca un obiect să poată avea o cantitate arbitrară de energie cinetică cuprinsă între 0 și infinit (∞) Jouli, adică o minge de baseball ar putea fi în repaus sau aruncată cu orice viteză. Cu toate acestea, conform mecanicii cuantice, energia mingii este **cuantificată**, ceea ce înseamnă că poate avea doar anumite valori.

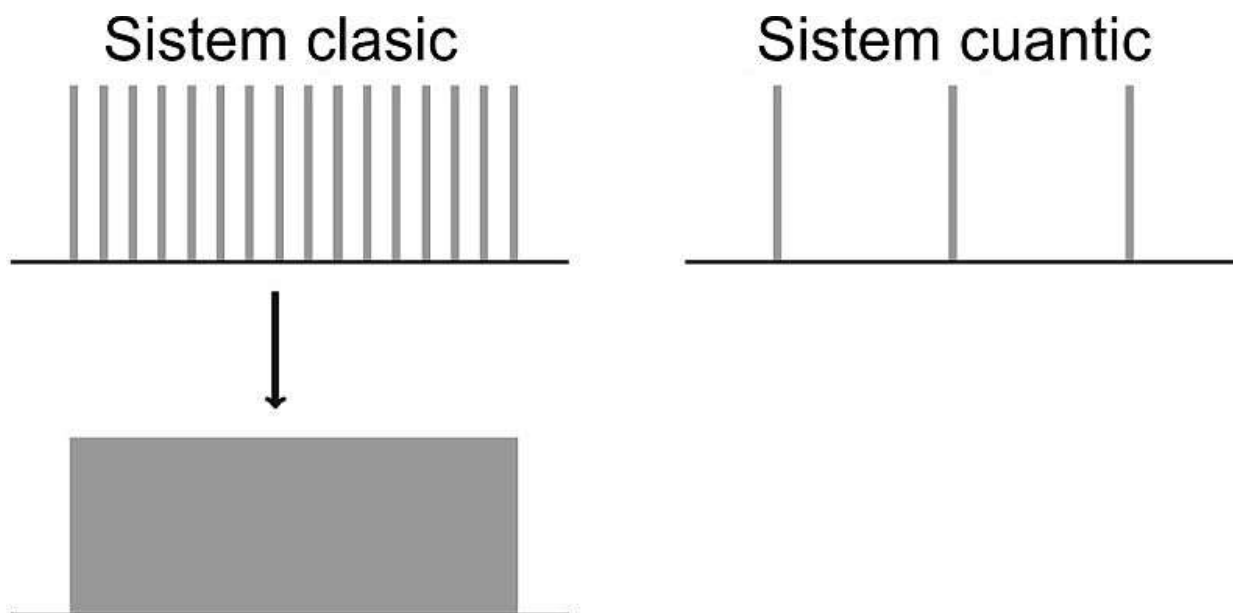


Fig. 1.3 Efectele cuantice asociate cu cuantizarea energiei sunt importante la distanțele atomice și subatomice. În această figură, liniile gri reprezintă energiile permise. În sistemele cuantice, energiile sunt cuantificate. Pe măsură ce ne îndepărtăm de sistemul cuantic pentru a-l vedea printr-o lentilă clasică (reprezentată de săgeata în jos), energiile devin mai dense și par continue. Acesta este motivul pentru care cuantizarea nu este sesizabilă în obiectele de zi cu zi.

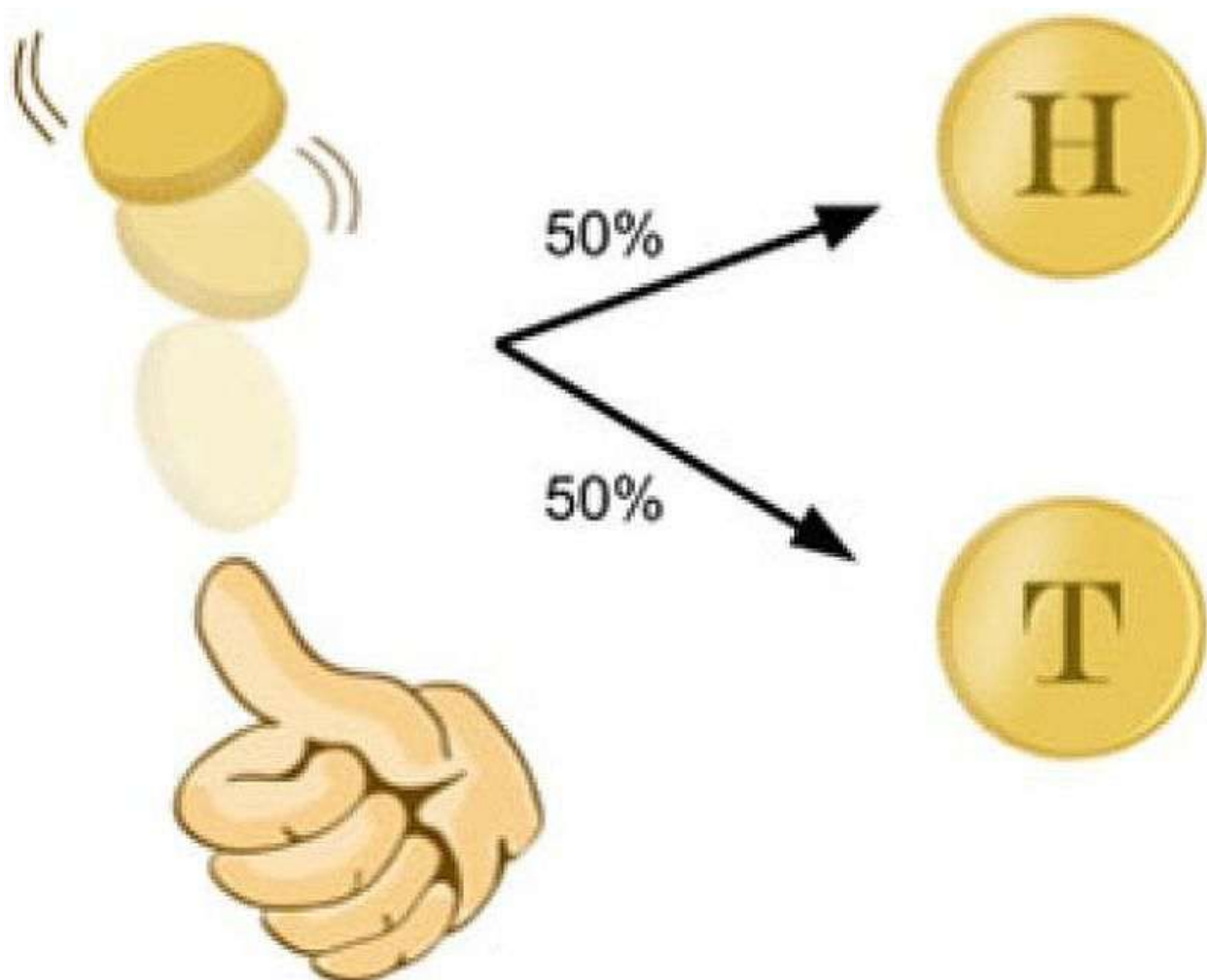


Fig. 1.4 O monedă aruncată are o șansă de 50% să cadă fie pe cap, fie pe pajură.

Un exemplu specific de cuantizare a energiei este atunci când energiile pot avea doar valori întregi $E = 0, 1, 2, 3, \dots$, dar nu și numere intermediare. Acest lucru este contraintuitiv, deoarece nu îl putem observa cu ochii noștri clasici. Diferențele de energie sunt prea mici pentru a fi văzute cu ochiul uman și, ca atare, pot fi tratate ca fiind continue pentru fizica clasică. Cu toate acestea, diferențele sunt mai pronunțate la dimensiuni mai mici, așa cum se arată în Fig. 1.3. De exemplu, atomul de hidrogen este suficient de mic încât efectele cuantice sunt importante, iar Bohr a trebuit să cuantizeze nivelurile de energie pentru a modela cu succes comportamentul său.

Un aspect al suprapunerii cuantice poate fi explicat folosind o analogie cu o monedă. O monedă are o probabilitate de 50/50 să cadă fie pe cap, fie pe pajură, așa cum se arată în Fig. 1.4.

Întrebarea 1 În ce stare se află moneda în timp ce este în aer? Este cap sau pajură?

Putem spune că moneda se află într-o suprapunere atât a capului, cât și a pajurii. Când cade, are o **stare definită**, fie cap, fie pajură. În general, cuvântul „stare” înseamnă orice mod particular în care poate fi descris un sistem. De exemplu, moneda poate fi fie cap, fie pajură, sau o combinație de cap sau pajură în timp ce este aruncată în aer. Toate aceste cazuri se numesc stări ale sistemului

monedă. În timp ce moneda este aruncată, aceasta se află într-o stare de suprapunere. Când observăm moneda, facem o măsurătoare care distruge suprapunerea.

În orice moment dat, un sistem poate fi descris ca fiind într-o stare particulară. Starea este legată de valorile sale cuantizate. De exemplu, o monedă aruncată se află fie într-o stare cap, fie într-o stare pajură. Un electron care orbitează un atom de hidrogen ar putea fi în starea fundamentală sau într-o stare excitată. Un sistem cuantic este special deoarece poate fi într-o suprapunere a acestor stări definite, adică, simultan atât cap, cât și pajură. Rezultatul unei măsurători este observarea unei stări definite cu o probabilitate dată.

În celebrul experiment mental al lui Schrödinger, pisica lui Schrödinger este plasată într-o cutie închisă cu un singur atom care are o anumită probabilitate de a emite radiații mortale în orice moment. Deoarece dezintegrarea nucleară radioactivă este un proces spontan, este imposibil de prezis cu certitudine când se dezintegrează nucleul. Prin urmare, nu știi dacă pisica este vie sau moartă decât dacă deschizi și te uiți în cutie. (Urmărește acest videoclip³.) Se poate spune că pisica este atât vie, cât și moartă, cu o probabilitate diferită de zero. Adică, pisica se află într-o stare de superpoziție cuantică până când deschizi cutia și îi măsori starea. La măsurare, pisica este evident fie vie, fie moartă, iar superpoziția a colapsat într-o stare definită, non-superpoziție.

Sistemele cuantice pot exista într-o stare de superpoziție, iar măsurarea sistemului va colapsa starea de superpoziție într-o singură stare clasică definită. Acest lucru ar putea fi greu de înțeles din punct de vedere clasic, deoarece de obicei nu vedem superpoziția cuantică cu ochii noștri umani (adică în obiecte macroscopice). Einstein a fost cu adevărat deranjat de această caracteristică a sistemelor cuantice. Prietenul său, Abraham Pais, consemnează: „Îmi amintesc că, în timpul unei plimbări, Einstein s-a oprit brusc, s-a întors spre mine și m-a întrebat dacă chiar cred că luna există doar atunci când o privesc.”⁴

1.3 Idei importante

1. O particulă într-o superpoziție cuantică există ca o combinație de stări diferite în același timp.

2. Fiecare stare posibilă are o probabilitate dată de a fi observată, dar măsurarea distruge superpoziția, deoarece se observă o singură stare definită.

1.4 Exerciții

1. Discutați dacă următoarele cantități sunt cuantificate sau continue:

- (a) sarcina electrică
- (b) timpul
- (c) lungimea
- (d) banii
- (e) culoarea vopselei

³ <https://www.youtube.com/watch?v=uWMTOrux0LM>

⁴ Nielsen, M. A. 1., & Chuang, I. L. (2000). Quantum computation and quantum information. New York: Cambridge University Press, p. 212.

2. O cerneală este creată prin amestecarea a 50% cerneală roșie și 50% cerneală galbenă. Un artist o folosește pentru a ștampila o imagine a unui soare. Dacă cerneala se comportă ca un sistem cuantic într-o superpoziție cuantică jumătate galbenă, jumătate roșie, care sunt diferitele opțiuni pentru cum ar putea arăta imaginea rezultată? Câteva opțiuni sunt prezentate în Fig. 1.5.

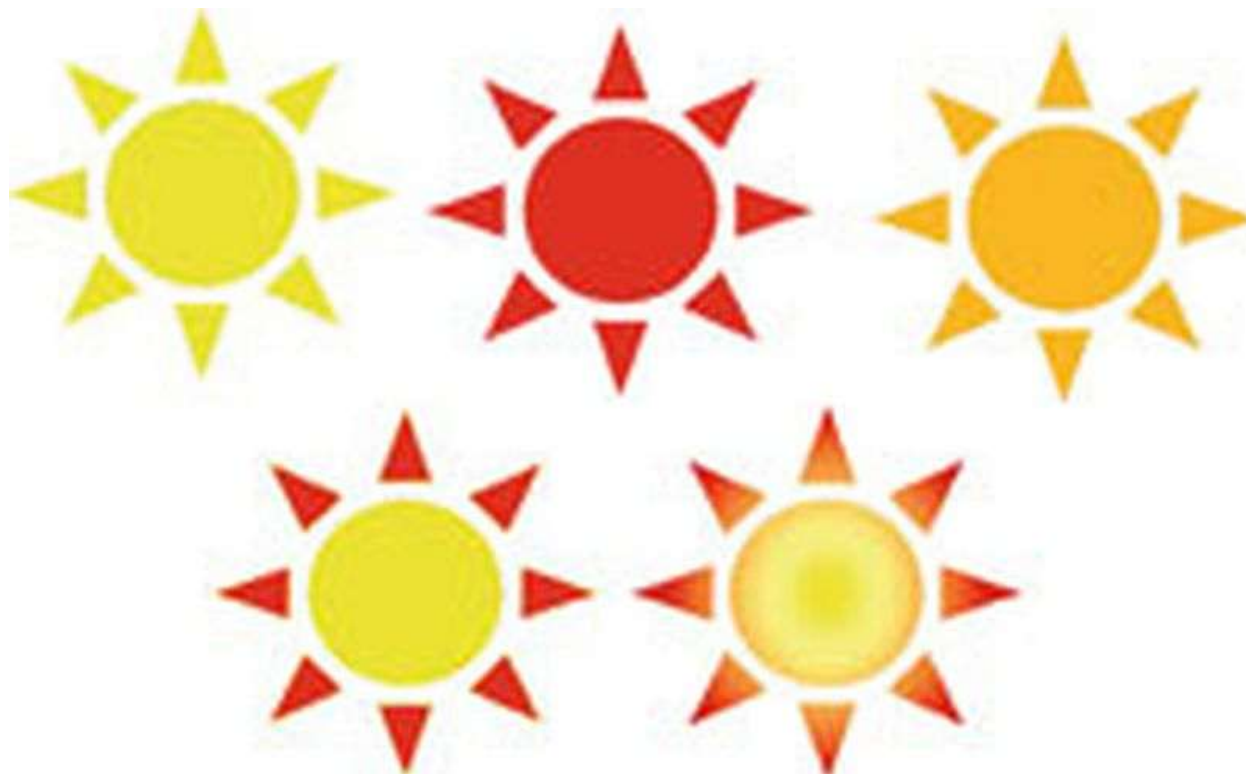


Fig. 1.5 Imaginea sorilor pictați

3. Dacă această imagine controversată a unei rochii⁵ este întotdeauna văzută ca fiind albastră/neagră de către elevul A și întotdeauna văzută ca fiind albă/aurie de către elevul B, se află rochia într-o superpoziție cuantică?

2 Ce este un qubit?

În computerele clasice, informația este reprezentată prin cifre binare 0 sau 1. Acestea se numesc biți. De exemplu, numărul 1 într-o reprezentare binară pe 8 biți este scris ca 00000001. Numărul 2 este reprezentat ca 00000010. Plasăm zerouri suplimentare în față pentru a scrie fiecare număr cu un total de 8 biți, ceea ce se numește un octet. De fapt, fiecare computer clasic traduce acești biți în informații lizibile de om pe dispozitivul dumneavoastră electronic. Documentul pe care îl citiți sau videoclipul pe care îl vizionați este codificat în limbajul binar al computerului în termeni de 1 și 0. Hardware-ul computerului înțelege bitul de 1 ca un curent electric care curge printr-un fir (într-un tranzistor), în timp ce bitul de 0 reprezintă absența unui curent electric într-un fir. Aceste semnale electrice pot fi considerate „pornite” (bitul de 1) sau „oprite” (bitul de 0). Computerul dumneavoastră decodează apoi biții clasici 1 sau 0 în cuvinte sau videoclipuri etc.

⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/The_dress.

Biții cuantici sau **qubiții** sunt similari biților prin faptul că există două stări măsurabile numite stări 0 și 1. Cu toate acestea, spre deosebire de biții clasici, qubiții pot fi, de asemenea, într-o stare de superpoziție a acestor stări 0 și 1, așa cum se arată în Fig. 2.1. Anumite calcule care în mod normal ar trebui efectuate separat pe 0 sau 1 pe un computer clasic ar putea fi acum finalizate într-o singură operațiune folosind un qubit pe un computer cuantic. Intuitiv, acest lucru ar putea face calculele mult mai rapide. Este important de înțeles că, deși un singur qubit se află într-o superpoziție a doi biți clasici, atunci când se măsoară un qubit, măsurarea are de fapt ca rezultat un singur bit clasic de informație: fie 0, fie 1.

2.1 Reprezentarea matematică a qubiților

2.1.1 Notăția Dirac Bra-Ket

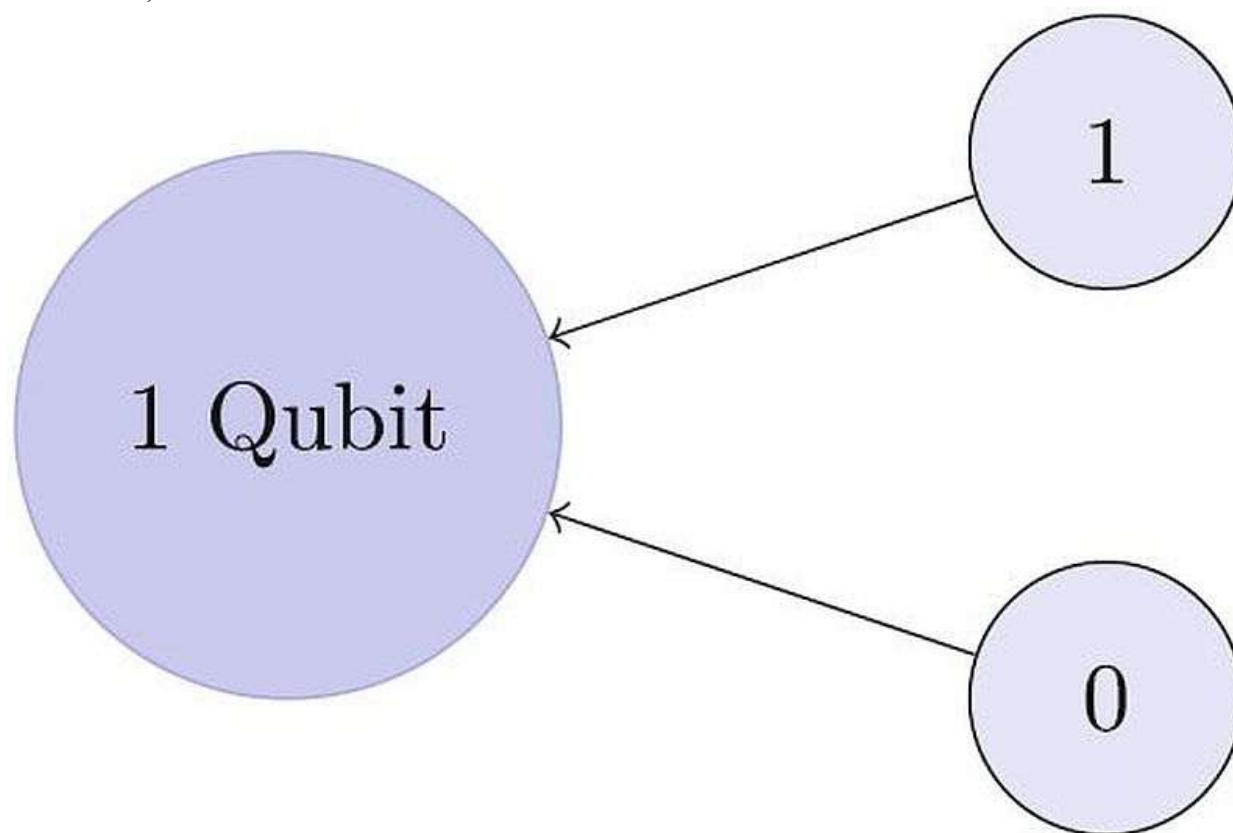


Fig. 2.1 Un bit clasic poate fi fie 0, fie 1. Un qubit poate fi într-o suprapunere atât a lui 0, cât și a lui 1

$$|\text{cat}\rangle = \alpha \left| \text{cat sitting} \right\rangle + \beta \left| \text{cat lying} \right\rangle$$

Fig. 2.2 Starea pisicii lui Schrödinger exprimată în notația bra-ket

Pentru a lucra cu qubiți, este util să știm cum se pot exprima stările mecanicii cuantice cu formule matematice. Notăția Dirac sau „bra-ket” este frecvent utilizată în mecanica cuantică și calculul cuantic. Starea unui qubit este inclusă în jumătatea dreaptă a unei paranteze unghiulare, numită „ket”. Un qubit, $|\psi\rangle$, poate fi într-o stare $|0\rangle$ sau $|1\rangle$ sau chiar o suprapunere atât a lui $|0\rangle$, cât și a lui $|1\rangle$. Aceasta se scrie ca

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

unde α și β sunt numite amplitudinile stărilor (Fig. 2.2). Amplitudinile sunt în general numere complexe (un tip special de număr utilizat în matematică și fizică). Cu toate acestea, pentru a înțelege semnificația amplitudinilor, ne putem imagina amplitudinile ca fiind numere obișnuite (reale). Amplitudinile ne permit să reprezentăm matematic toate suprapunerile posibile.

Amplitudinile sunt foarte importante deoarece ne oferă probabilitatea de a găsi particula în acea stare specifică atunci când efectuăm o măsurare. Probabilitatea de a măsura particula în starea $|0\rangle$ este $|\alpha|^2$, iar probabilitatea de a măsura particula în starea $|1\rangle$ este $|\beta|^2$. De ce este ridicat la pătrat? Răspunsul scurt este că oferă predicțiile experimentale corecte pentru această alegere de reprezentare⁶. Ridicarea la pătrat a lui α și β pentru a găsi probabilitatea este similară cu ridicarea la pătrat a amplitudinii unei unde pentru a găsi energia unde. Deoarece probabilitatea totală de a observa toate stările sistemului cuantic trebuie să însumeze 100%, amplitudinile trebuie să respecte această regulă:

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1. \quad (2.2)$$

Aceasta se numește regulă de **normalizare**. Coeficienții α și β pot fi întotdeauna rescalați cu un anumit factor pentru a normaliza starea cuantică.

2.1.2 Exemple

1. Starea cuantică a unei monede care se rotește poate fi scrisă ca o suprapunere de cap și pajură. Folosind capul ca $|1\rangle$ și pajura ca $|0\rangle$, starea cuantică a monedei este

$$|\text{moneda}\rangle = 1/\sqrt{2} (|1\rangle + |0\rangle). \quad (2.3)$$

Care este probabilitatea de a obține cap?

Amplitudinea lui $|1\rangle$ este $\beta = 1/\sqrt{2}$, deci $|\beta|^2 = (1/\sqrt{2})^2 = 1/2$. Deci probabilitatea este de 0,5 sau 50%.

2. O monedă ponderată are o probabilitate dublă de a cădea pe cap vs. pajură. Care este starea monedei în notația „ket”?

$$P_{\text{cap}} + P_{\text{pajura}} = 1 \quad (\text{Condiție de normalizare})$$

$$P_{\text{cap}} = 2P_{\text{pajura}} \quad (\text{Afirmație în exemplu})$$

$$\rightarrow P_{\text{pajura}} = 1/3 = \alpha^2$$

$$\rightarrow P_{\text{cap}} = 2/3 = \beta^2$$

⁶ Știm din experimente că fizica cuantică este probabilistică. Coeficienții la pătrat sunt necesari pentru a obține o cantitate care se comportă ca o distribuție de probabilitate, adică este un număr real și pozitiv. Prin definiție, nu poate exista o probabilitate negativă.

$$\rightarrow \alpha = \sqrt{1/3}, \beta = \sqrt{2/3}$$

$$|\text{moneda}\rangle = \sqrt{1/3}|0\rangle + \sqrt{2/3}|1\rangle$$

O concepție greșită des întâlnită este că măsurarea unui singur qubit va duce la o medie ponderată a stărilor $|0\rangle$ și $|1\rangle$. Este important de reținut că, după efectuarea măsurătorii pe un singur qubit, qubitul nu mai este într-o suprapunere, ci ia o stare definită fie $|0\rangle$, fie $|1\rangle$ ⁷. Aceasta înseamnă că nu veți putea găsi α sau β dintr-un singur qubit. În schimb, trebuie să creăm mai mulți qubiți care se află în aceeași stare cuantică și apoi să măsurăm câți dintre qubiți se colapsează în $|0\rangle$ (reprezentând α) și câți se colapsează în $|1\rangle$ (reprezentând β). Prin urmare, sunt necesare mai multe particule identice pentru a număra câte se colapsează în $|0\rangle$ sau $|1\rangle$.

2.2 Reprezentare matriceală

Atunci când se scrie un singur qubit într-o superpoziție $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, este util să se utilizeze algebra matriceală. În reprezentarea matriceală, un qubit este scris ca un vector bidimensional unde amplitudinile sunt componentele vectorului

$$|\psi\rangle = (\alpha / \beta). \quad (2.5)$$

Stările $|0\rangle$ și $|1\rangle$ sunt de obicei reprezentate ca

$$|0\rangle = (1 / 0), |1\rangle = (0 / 1).$$

Experimental, starea unui qubit poate fi schimbată printr-o acțiune fizică, cum ar fi aplicarea unui laser electromagnetic sau trecerea acestuia printr-un dispozitiv optic. Schimbarea stării unui qubit printr-o acțiune fizică corespunde matematic înmulțirii vectorului qubit $|\psi\rangle$ cu o **matrice unitară** U , astfel încât, după operație, starea este acum $|\psi'\rangle = U|\psi\rangle$. Unitară este un termen matematic care exprimă faptul că U poate acționa asupra qubitului doar în așa fel încât probabilitatea totală $|\alpha|^2 + |\beta|^2$ să nu se modifice. O matrice U este unitară dacă produsul matriceal al lui U și transpunerea sa conjugată $U^\dagger$ (numită U-cruce) se înmulțesc pentru a da matricea identitate: $UU^\dagger = U^\dagger U = 1$. Acest lucru este foarte important deoarece, în toate construcțiile matematice ale mecanicii cuantice, o presupunere fundamentală este că fiecare operator (matriceal) trebuie să fie unitar. Acest lucru asigură că, după schimbarea oricărei stări printr-o acțiune, probabilitatea totală de a observa toate stările posibile va fi însumată în continuare la 100%. Dacă acest lucru nu s-ar întâmpla, atunci nu am putea interpreta rezultatele mecanicii cuantice ca fiind probabilistice, iar rezultatele nu ar fi în concordanță cu numeroasele experimente efectuate până în prezent. Acțiunea fizică de interacțiune cu starea corespunde matematic aplicării unui operator unitar.

2.2.1 Exemple

1. Care este transpunerea conjugată a următoarei matrice?

$$A = (1 \ i / 1 \ i). \quad (2.7)$$

⁷ Atunci când se formulează reprezentarea matematică a mecanicii cuantice, aceasta este una dintre cele patru ipoteze fundamentale care trebuie făcute. Motivul prăbușirii este încă necunoscut: https://en.wikipedia.org/wiki/Wave_function_collapse. Citiți mai multe la acest link: <https://www.quantamagazine.org/how-quantum-trajectory-theory-lets-physicists-understand-whats-going-on-during-wave-function-collapse-20190703/>.

Transpunerea conjugată a unei matrice se găsește folosind următorii doi pași. Mai întâi, „conjugăm” numerele complexe. Conjugatul unui număr complex se găsește prin schimbarea semnului părții imaginare. Conjugatul complex al lui 1 este doar 1, în timp ce conjugatul complex al lui $+i$ este $-i$. În al doilea rând, transpunem matricea conjugată. Transpunerea unei matrice schimbă rândurile cu coloanele, adică primul rând se transformă în prima coloană, al doilea rând se transformă în a doua coloană etc. Prin urmare,

$$A^\dagger = (1 \ 1 / -i \ -i)$$

2. Este matricea A de mai sus unitară?

Înmulțirea lui A cu transpunerea sa conjugată nu produce matricea identitate, deci A nu este unitară.

3. Care este rezultatul aplicării operatorului unitar X pe un qubit cu starea $|0\rangle$?

$$X = (0 \ 1 / 1 \ 0), |0\rangle = (1 / 0). \quad (2.11)$$

$$X|0\rangle = (0 \ 1 / 1 \ 0) (1 / 0) = (0 / 1) = |1\rangle. \quad (2.12)$$

Matricea X schimbă starea de qubit $|0\rangle$ în starea de qubit $|1\rangle$.

2.3 Sfera Bloch

Un singur qubit poate fi vizualizat folosind sfera Bloch. Sfera Bloch este o reprezentare vizuală a unui qubit cu proprietăți geometrice similare cercului unitar din trigonometrie. Fiecare punct de pe sfera Bloch corespunde unei posibile suprapuneri diferite a unui singur qubit. Partea superioară și inferioară a sferei corespund celor două stări măsurabile ale qubitului, $|0\rangle$ și $|1\rangle$. O săgeată pe sfera Bloch, care poate indica oricare dintre locațiile diferite de pe suprafața sferei, indică starea curentă a qubitului. Figura 2.3 prezintă patru exemple despre cum poate fi utilizată sfera Bloch pentru a vizualiza diferite stări ale qubitului. Când săgeata nu indică direct partea superioară sau inferioară a sferei, qubitul se află într-o stare de suprapunere. De exemplu, peste tot în jurul ecuatorului, qubitul are o șansă de 50/50 de a se prăbuși în $|0\rangle$ sau $|1\rangle$ la măsurare. Locația exactă de pe ecuator corespunde unei stări distincte, în care amplitudinile pot avea semne diferite și pot fi numere reale sau imaginare.

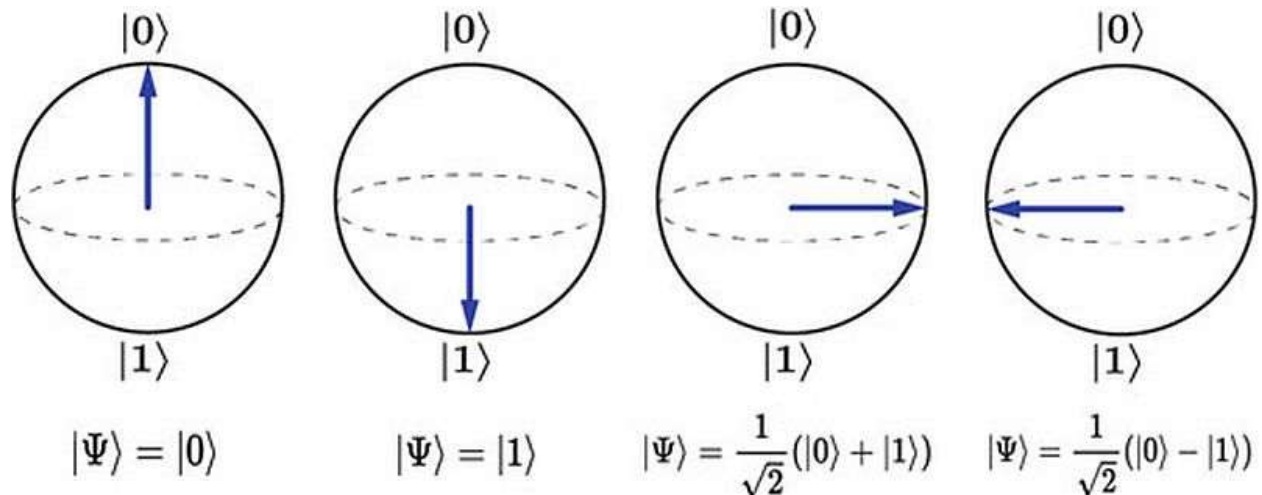


Fig. 2.3 Starea unui qubit este reprezentată de o săgeată pe sfera Bloch

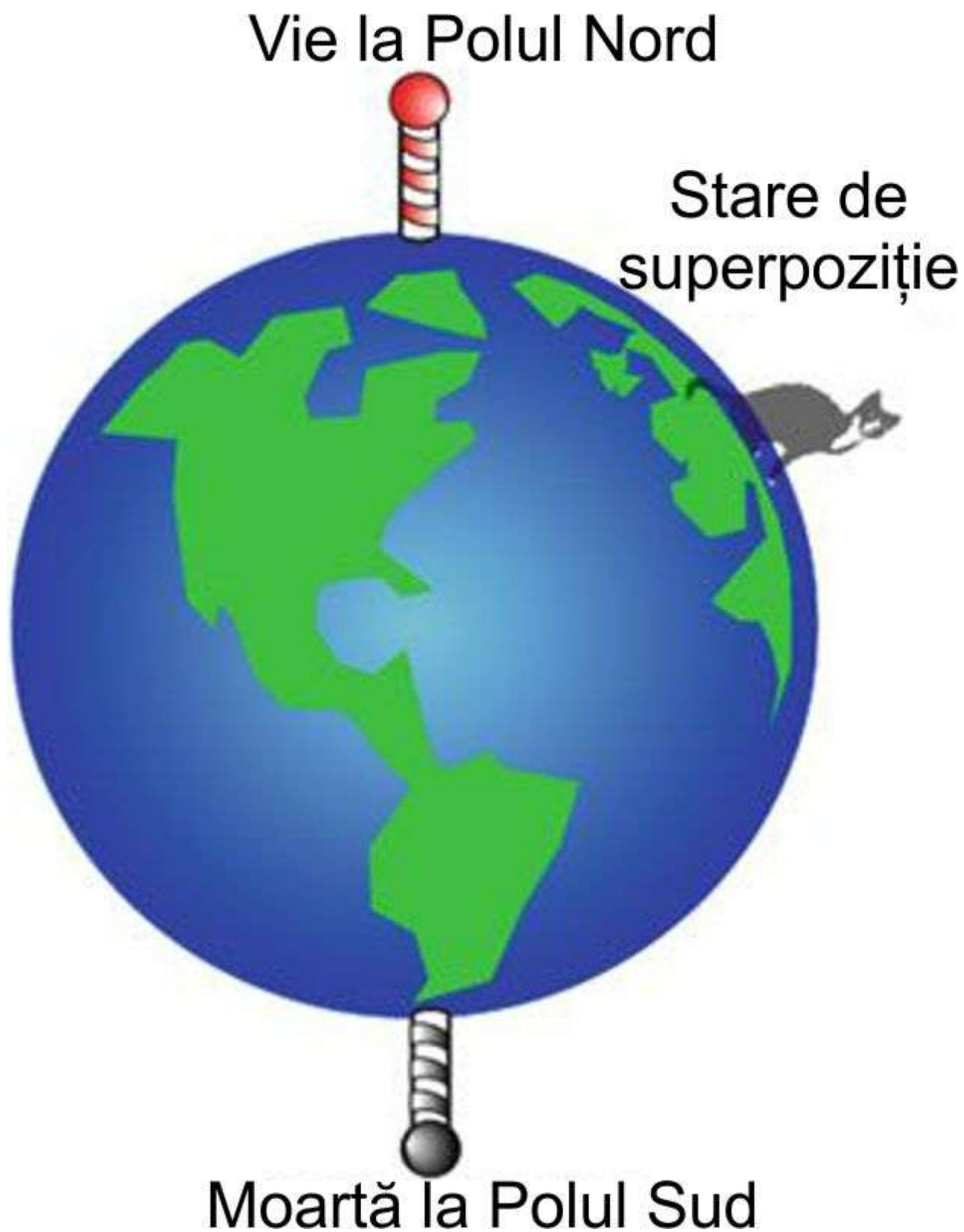


Fig. 2.4 O caricaturizare a sferei Bloch reprezentată ca Pământul și starea pisicii lui Schrodinger reprezentată ca o locație de pe Pământ

Când starea qubitului este schimbată, săgeata se rotește într-o poziție diferită pe sferă. O analogie este să ne gândim la qubit ca la pisica lui Schrodinger care călătorește în jurul globului, așa cum se arată în Fig. 2.4. Când pisica se află la Polul Nord, cu siguranță va fi în viață. Când pisica se află la Polul Sud, cu siguranță va fi moartă. Atâta timp cât starea pisicii nu este măsurată, aceasta poate fi oriunde altundeva pe glob, într-o stare de suprapunere de viață și moarte. Ca programatori ai computerului cuantic, este sarcina noastră să manipulăm starea qubitului, ceea ce îi oferă pisicii instrucțiuni despre cum să se miște în jurul globului.

Întrebarea 1 Pisica lui Schrodinger este determinată a fi în viață. În ce locație de pe Pământ din Fig. 2.4 ar fi putut fi pisica înainte de măsurarea cuantică?

- (a) Rusia
- (b) Australia
- (c) Polul Nord
- (d) toate variantele de mai sus

Pisica ar fi putut fi oriunde pe Pământ, cu excepția Polului Sud. Observați că în Australia pisica are o probabilitate mai mică de a fi în viață, deoarece este mai departe de Polul Nord.

Sfera Bloch este un ajutor vizual util pentru a înțelege cum un qubit poate avea un număr infinit de stări cuantice posibile. Cu toate acestea, reprezintă doar un qubit și nu funcționează pentru sisteme de doi sau mai mulți qubiți.

2.4 Realizarea fizică a qubiților

Într-un computer clasic, biții 0 și 1 reprezintă matematic cele două tensiuni permise pe un fir într-un circuit clasic. Dispozitivele semiconductoare numite tranzistoare sunt utilizate pentru a controla ce se întâmplă cu aceste tensiuni. O întrebare frecvent pusă de studenții noi este „Din ce este făcut un qubit?” Deoarece computerele cuantice se bazează pe concepte fundamental diferite față de computerele clasice, acestea trebuie construite dintr-o tehnologie complet diferită, adică nu este posibil să existe un curent clasic într-o suprapunere a ambelor tipuri de curent care curg și nu curg printr-un fir. Computerele cuantice sunt încă la început, așa că există mulți candidați diferiți pentru tehnologia necesară pentru a le construi. Unele tehnologii se bazează pe sisteme optice, altele utilizează supraconductori⁸ și există altele bazate pe molecule. Încă nu este clar dacă oricare dintre acestea este mai benefică decât celelalte și este și mai clar dacă toate computerele cuantice viitoare vor fi construite din aceeași tehnologie sau dacă vor exista multe tipuri diferite de computere cuantice disponibile (în același mod în care există atât console de jocuri Xbox, cât și PlayStation, dar ambele au același scop general - jocurile interactive). Vom studia două experimente diferite care ilustrează proprietățile qubiților, dar detaliile ingineresti ale construirii unui computer cuantic depășesc cu mult scopul acestei introduceri.

2.5 Idei importante

1. Un qubit poate fi într-o suprapunere de stări $|0\rangle$ și $|1\rangle$. Sfera Bloch poate fi utilizată pentru a reprezenta vizual un singur qubit.

⁸ Laboratorul Național de Accelerare Fermi cercetează modalitățile de a crea qubiți coerenți cu durată lungă de viață folosind expertiza lor în cavități supraconductoare de radiofrecvență, de exemplu <https://qis.fnal.gov/superconducting-quantum-systems/>.

2. Un qubit poate fi scris în termeni de amplitudini. Fiecare amplitudine la pătrat corespunde probabilității de măsurare a qubitului în $|0\rangle$ sau $|1\rangle$.
3. O modificare fizică a unui qubit corespunde matematic unor matrici unitare care înmulțesc amplitudinile qubitilor.

Tabelul 2.1 Tabel pentru mesaj

Litera	Cod binar	Litera	Cod binar
A	01000001	N	01001110
B	01000010	O	01001111
C	01000011	P	01010000
D	01000100	Q	01010001
E	01000101	R	01010010
F	01000110	S	01010011
G	01000111	T	01010100
H	01001000	U	01010101
I	01001001	V	01010110
J	01001010	W	01010111
K	01001011	X	01011000
L	01001100	Y	01011001
M	01001101	Z	01011010

2.6 Exerciții

1. Dacă o monedă este un bit clasic de informație (capul = 1 și pajură = 0), cum este reprezentat numărul 2 în notația standard pe 8 biți folosind monede? (Indiciu: Găsiți reprezentarea pe 8 biți a numărului 2, apoi converțiți-o în H (cap) și T (pajură).)

2. Folosind tabelul 2.1, puteți afla ce spune acest mesaj binar 01000011 01000001 01010100? (Notă: Acesta este de fapt modul în care computerul și telefonul dvs. decodează informațiile din biți în text.)

3. Presupuneți că o monedă aruncată poate fi măsurată fie ca cap (H), fie ca pajură (T).

(a) Dacă moneda este într-o stare normalizată $1/\sqrt{10} |H\rangle + 3/\sqrt{10} |T\rangle$, care este probabilitatea ca moneda să fie pajură?

(b) În timpul unei aruncări, moneda se află într-o stare $1/3 |H\rangle + 2/3 |T\rangle$. Este această stare normalizată?

(c) O mașină este construită pentru a arunca monede și a le pune în starea $1/3 |H\rangle + \sqrt{3}/2 |T\rangle$ atunci când sunt aruncate. Dacă se aruncă 100 de monede, câte monede ar trebui să cadă pajură?

(d) O monedă începe în starea $1/\sqrt{10} |H\rangle + 3/\sqrt{10} |T\rangle$. După ce se face o măsurare pe monedă, care ar putea fi starea acesteia?

4. Prietenul tău îți dă mai mulți qubiti care se află în aceeași stare de superpoziție. Cum poți determina care este starea?

5. Un qubit este pregătit într-o stare necunoscută. Apoi este măsurat cu rezultatul $|0\rangle$.

(a) Care dintre următoarele ar putea fi starea sa inițială înainte de măsurare: $|0\rangle$, $1/\sqrt{10} |0\rangle + 3/\sqrt{10} |1\rangle$, $1/2 |0\rangle + \sqrt{3}/2 |1\rangle$ și/sau $1/\sqrt{2} (|0\rangle + |1\rangle)$?

(b) Dacă ați încerca să măsurați același qubit a doua oară, puteți restrânge detaliile despre starea inițială?

(c) Un alt qubit este preparat în aceeași stare necunoscută. Este măsurat în starea $|1\rangle$. Ce puteți spune despre starea inițială acum?

6. Care este produsul matriceal al matricei X,

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (2.13)$$

și qubitul de stare $|0\rangle$?

7. Care este produsul matriceal al matricei X de mai sus și qubitul de stare $|1\rangle$?

8. Care este produsul matriceal al matricei X de mai sus și un qubit în starea generală $|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$?

9. Găsiți transpunerea conjugată a matricei

$$Y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

10. Arătați că matricea

$$U = 1/\sqrt{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

este unitară.

11. Arătați prin exemplu că aplicarea unei matrice neunitare la un qubit are ca rezultat probabilități care nu mai sunt egale cu 100%. (Indiciu: Începeți cu orice stare inițială, de exemplu, $|0\rangle$. Măsurați probabilitățile de a găsi fie 0, fie 1. Aplicați o matrice neunitară la starea inițială. Apoi măsurați probabilitățile de a găsi fie 0, fie 1. Probabilitățile sunt egale cu 100%?)

12. Dacă se măsoară qubitul reprezentat de Fig. 2.5, care sunt rezultatele posibile? Nu sunt necesare valori numerice pentru amplitudini, ci doar afirmații conceptuale.

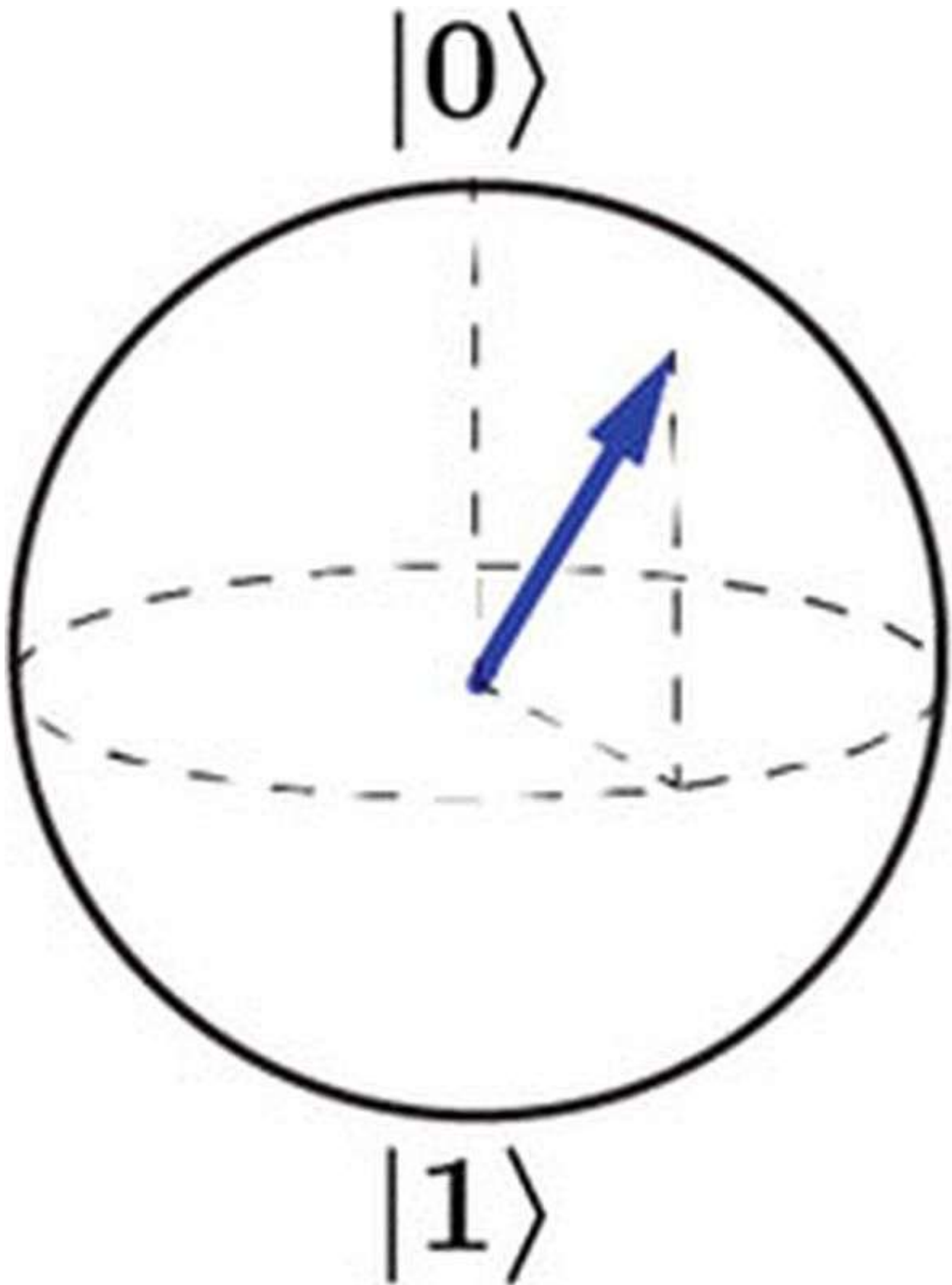


Fig. 2.5 Starea unui qubit prezentată pe sfera Bloch

3 Crearea superpoziției: Divizorul de fascicul

Acum, că am explorat qubiții și fenomenul de superpoziție, ne putem pune întrebarea: cum știm că superpoziția are loc cu adevărat? Care sunt dovezile care arată că o particulă cuantică există într-adevăr în două locații diferite în același timp, în timp ce se află într-o superpoziție cuantică? Natura științei înseamnă că experimentele actualizează constant rezultatele anterioare, așadar există și alte interpretări ale rezultatelor experimentale care pot explica datele fără a fi nevoie de superpoziție? În acest capitol vom explora dovezile experimentale care infirmă alte interpretări decât superpoziția cuantică. În plus, deși o monedă aruncată este un model simplu al unui qubit, nu este foarte utilă pentru construirea unui computer cuantic, deoarece nu prezintă toate proprietățile unei superpoziții cuantice adevărate. De exemplu, nu putem manipula amplitudinile superpoziției. În acest capitol, vom studia câteva exemple fizice reale de particule cuantice într-o superpoziție care conține două stări. Aceste exemple includ un foton într-un divizor de fascicul și interferometrul Mach-Zehnder.

3.1 Divizorul de fascicul

În optica clasică, un divizor de fascicul acționează ca o oglindă parțial reflectorizantă care împarte un fascicul de lumină în două. Într-un divizor de fascicul 50/50, 50% din intensitatea luminii este transmisă și 50% este reflectată, așa cum se arată în Fig. 3.1.

O modalitate de a vizualiza divizorul de fascicul este de a vă imagina o barieră cu găuri decupate aleatoriu, ca niște brânzeturi elvețiene, așa cum se arată în Fig. 3.2. Imaginați-vă că această barieră este plasată într-un iaz și o undă de apă se deplasează spre barieră. După ce unda lovește bariera, am observa o undă mai mică care trece prin barieră, iar o alta ar fi reflectată de barieră.

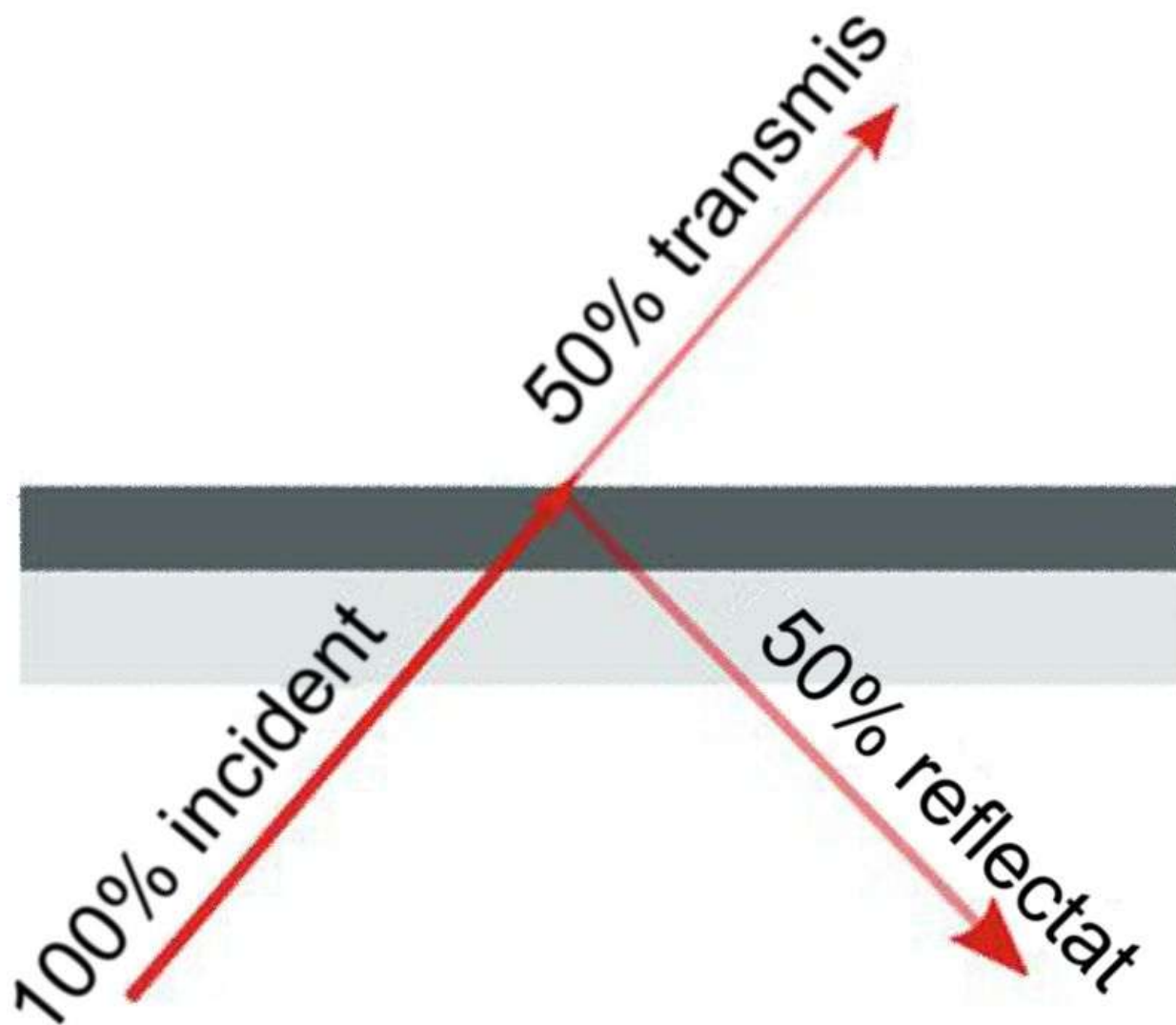


Fig. 3.1 Un divizor de fascicul reflectă 50% din lumina incidentă și transmite 50% din lumina incidentă.

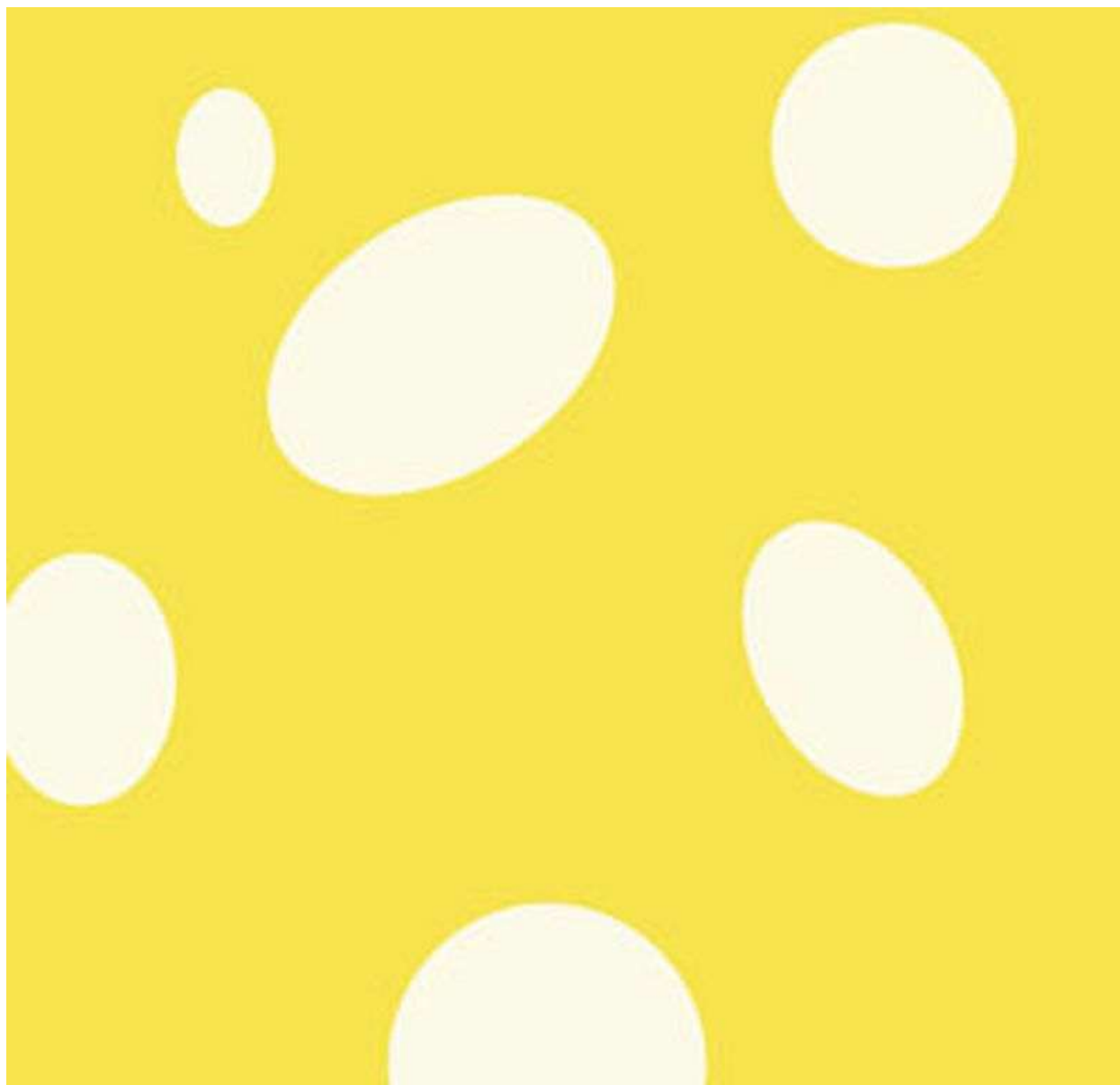


Fig. 3.2 Un divizor de fascicul reflectă 50% din lumina incidentă și transmite 50% din lumina incidentă.

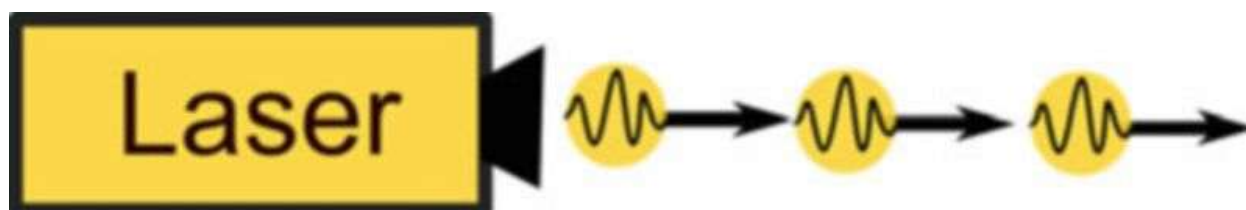


Fig. 3.3 Lumina de intensitate scăzută este un flux de fotoni singolari.

Întrebarea 1 Ce s-ar întâmpla dacă o particulă clasică, cum ar fi o minge de fotbal, este lovită aleatoriu la barieră? Presupunem că mingea poate trece prin găuri.

Experimentele demonstrează că lumina se comportă atât ca o undă (experimentul cu dublă fantă Young), cât și ca o particulă (efectul fotoelectric, efectul Compton). Clasic, lumina este

considerată o undă constând din câmpuri electrice și magnetice care oscilează continuu. Cu toate acestea, lumina poate fi considerată și ca un flux de particule numite fotoni. Fotonii nu au masă, dar transportă energia luminii dintr-un punct în altul cu viteza luminii. Un fascicul laser este alcătuit din fotoni. Dacă reduceți intensitatea laserului, puteți chiar trimite câte un foton pe rând, așa cum se arată în Fig. 3.3. Deoarece configurarea unei singure surse de fotoni și a unui detector necesită echipament specializat, vom rula în schimb un simulator pentru a explora efectele cuantice ale fotonilor.

Întrebarea 2 Deschideți simulatorul de divizare a fasciculului⁹, accesați ecranul Comenzi și trageți un singur foton. Configurarea înainte ca fotonul să lovească un divizor de fascicul este prezentată în Fig. 3.4. Ce detectoare sunt declanșate atunci când fotonul trece prin divizorul de fascicul 50/50?

- (a) Întotdeauna detectorul 1
- (b) Întotdeauna detectorul 2
- (c) Detectorul 1 SAU detectorul 2
- (d) Atât detectorul 1, cât și detectorul 2
- (e) Niciunul

⁹ https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/simulations_html5/sims/photons-particles-waves/photons-particles-waves.html

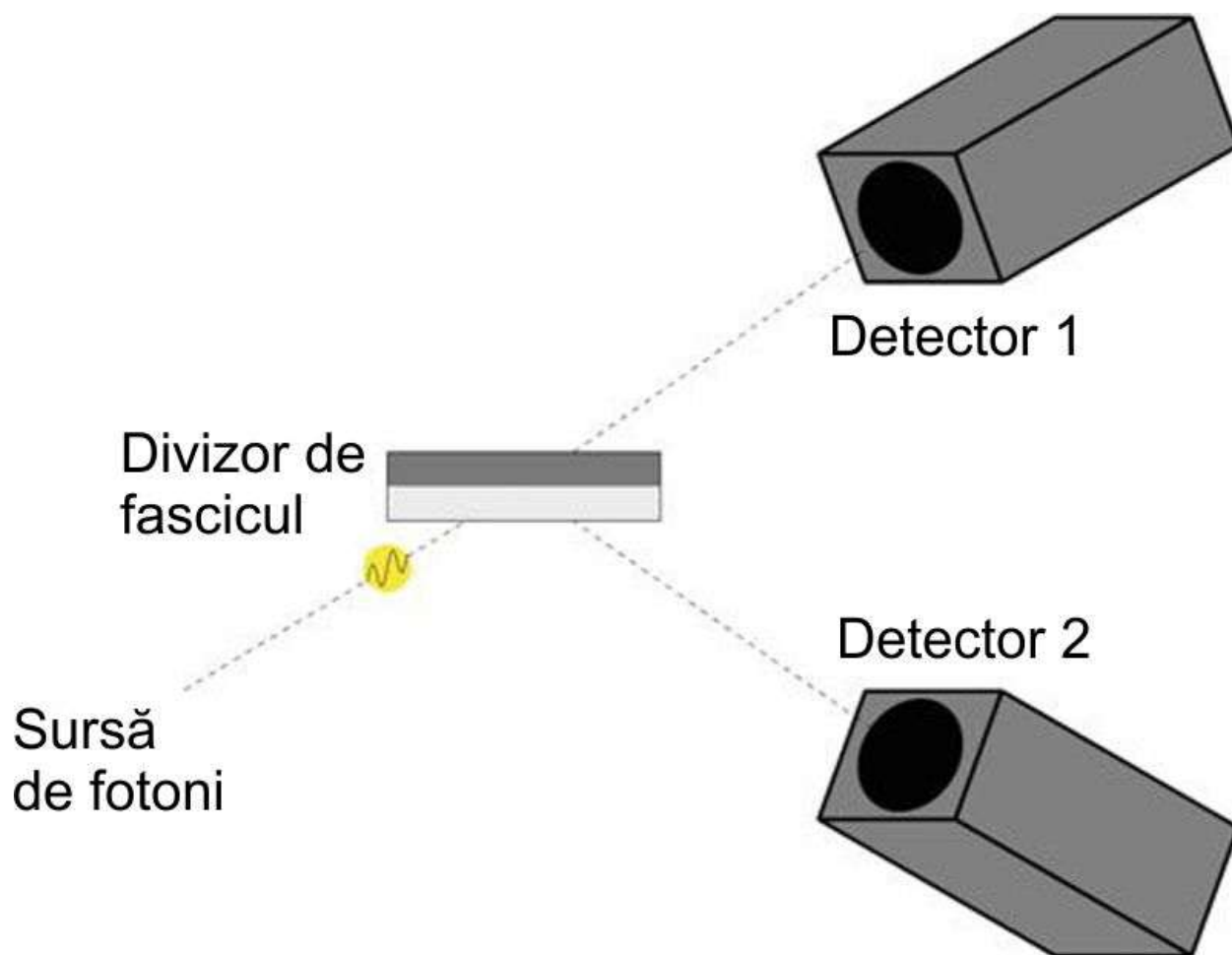


Fig. 3.4 Un singur foton este trimis la un divizor de fascicul, iar rezultatul este măsurat cu detectoare pentru a vedea dacă divizorul de fascicul transmite sau reflectă.

Întrebarea 3 Care detector(i) s-ar declanșa dacă o undă clasică este trimisă prin divizorul de fascicul?

- (a) Întotdeauna detectorul 1
- (b) Întotdeauna detectorul 2
- (c) Detectorul 1 SAU detectorul 2
- (d) Atât detectorul 1, cât și detectorul 2
- (e) Niciunul

Întrebarea 4 Care detector(i) s-ar declanșa dacă o particulă clasică este trimisă prin divizorul de fascicul?

- (a) Întotdeauna detectorul 1
- (b) Întotdeauna detectorul 2
- (c) Detectorul 1 SAU detectorul 2

(d) Atât detectorul 1, cât și detectorul 2

(e) Niciunul

Întrebarea 5 Ce face fotonul în momentul în care întâlnește divizorul de fascicul 50/50?

(a) Se împarte în jumătate. Jumătate din foton este transmis și jumătate este reflectat.

(b) Întregul foton trece prin el cu o probabilitate de 50% și se reflectă cu o probabilitate de 50%.

(c) Întregul foton este atât transmis, cât și reflectat, practic în două locuri simultan.

Dacă fotonul ar fi fost împărțit în jumătate, ambele detectoare din experimentul cu divizorul de fascicul ar fi declanșate simultan. Deoarece se declanșează doar un detector odată, fotonul nu s-ar fi putut separa. În acest caz, vedem că lumina se comportă mai mult ca o minge de fotbal decât ca unda de apă.

În acest moment, s-ar putea să vă gândiți că fotonul a fost fie transmis, fie reflectat la divizorul de fascicul și pur și simplu nu am avut această informație până când nu a lovit Detectorul 1 sau 2. Din păcate, aceasta ar fi interpretarea incorectă formată de creierul nostru animal clasic. Ar fi ca și cum am spune că moneda a fost cap de la bun început și tot ce a trebuit să facem a fost să ne uităm la ea pentru a-i determina starea. Similar cu modul în care o monedă care se învârtă va ateriza pe cap 50% din timp și pe pajură 50% din timp, fotonul singular se află într-o suprapunere a ambelor stări până în punctul în care ajunge la detectoare. Această distincție ar putea părea o chestiune de semantică, dar este importantă deoarece descrie două moduri diferite în care universul funcționează la cele mai mici distanțe posibile. De asemenea, va fi importantă odată ce sistemul devine mai complicat. Configurația experimentală după ce fotonul lovește un divizor de fascicul este prezentată în Fig. 3.5.

Dacă considerăm calea transmisă să fie $|0\rangle$ (detectorul 1), iar calea reflectată să fie $|1\rangle$ (detectorul 2), atunci starea fotonului după divizorul de fascicul este

$$|\text{foton}\rangle = 1/\sqrt{2} |0\rangle + 1/\sqrt{2} |1\rangle \quad (3.1)$$

La măsurare, va colapsa suprapunerea în $|0\rangle$ sau $|1\rangle$? Din păcate, nu este posibil să se prezică ce detector va fi activat la un moment dat, deoarece mecanica cuantică este inerent probabilistică.

Fenomenul de suprapunere permite computerelor cuantice să efectueze operațiuni simultan pe doi biți de informație cu un singur qubit. De fapt, este posibil să se creeze un computer cuantic de uz general (numit și universal) folosind fotoni ca și qubiți, divizoare de fascicul pentru a crea suprapunere și bucăți de sticlă care încetinesc fotonii de-a lungul unor căi selectate (schimbătoare de fază)¹⁰.

¹⁰ Knill, E.; Laflamme, R.; Milburn, G. J. (2001). "A scheme for efficient quantum computation with linear optics". *Nature*. Nature Publishing Group. 409 (6816): 46–52.

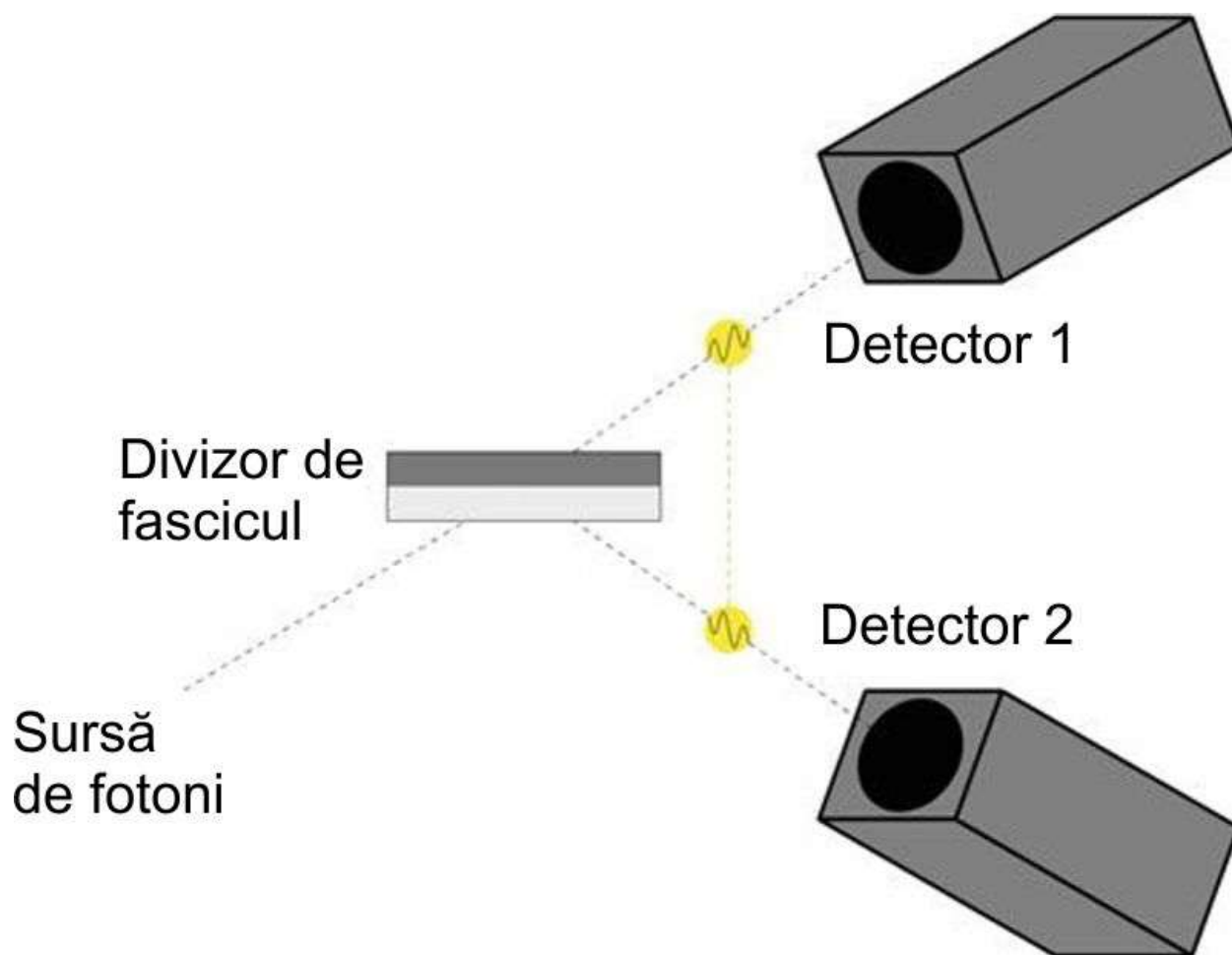


Fig. 3.5 Divizorul de fascicul pune fotonul într-o stare de suprapunere.

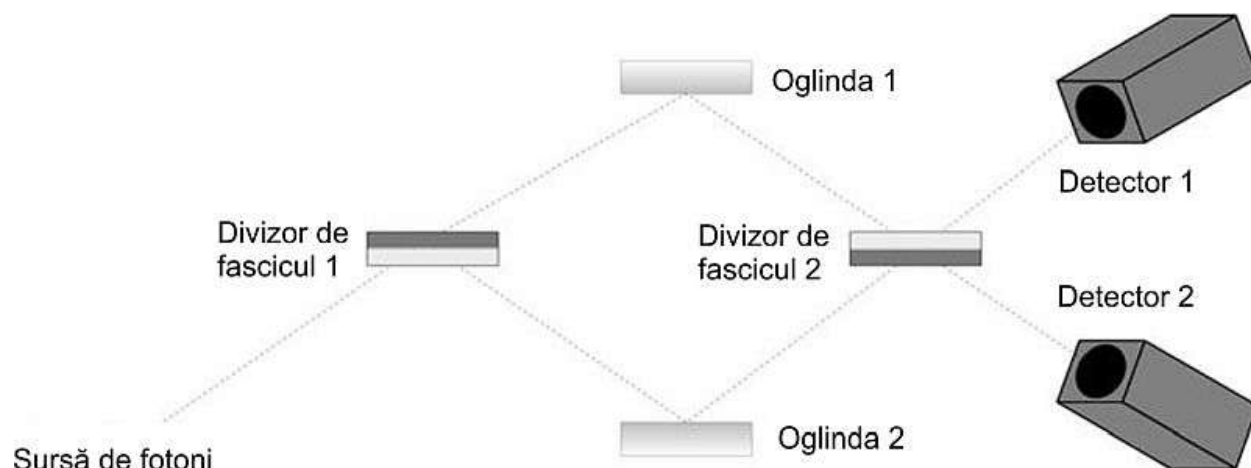


Fig. 3.6 Schema interferometrului Mach-Zehnder de la https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/simulations_html5/sims/Mach-Zehnder-Interferometer/Mach_Zehnder_Interferometer.html

3.2 Interferometru Mach-Zehnder

Pentru a ne convinge că fotonul a parcurs într-adevăr două căi simultan, să vedem ce se întâmplă când se adaugă un al doilea divizor de fascicul. Această configurație experimentală este prezentată în Fig. 3.6. Oglinzile redirectionează fotonii către al doilea divizor de fascicul. Această configurație a dispozitivului este cunoscută sub numele de interferometru Mach-Zehnder. Configurația este foarte sensibilă la distanțele dintre oglinzi și detectoare, care trebuie să fie identice sau să difere cu un număr întreg din lungimea de undă a fotonului.

Întrebarea 6 Dacă presupunem că fotonul a fost reflectat de primul divizor de fascicul, ce detectoare ar fi declanșate?

- (a) Întotdeauna detectorul 1
- (b) Întotdeauna detectorul 2
- (c) Detectorul 1 SAU detectorul 2
- (d) Atât detectorul 1, cât și detectorul 2
- (e) Niciunul

Întrebarea 7 Dacă presupunem că fotonul a fost transmis de primul divizor de fascicul, ce detectoare ar fi declanșate?

- (a) Întotdeauna detectorul 1
- (b) Întotdeauna detectorul 2
- (c) Detectorul 1 SAU detectorul 2
- (d) Atât detectorul 1, cât și detectorul 2
- (e) Niciunul.

Întrebarea 8 Construiți interferometrul Mach-Zehnder în simulatorul de divizor de fascicul¹¹ și emiteți un singur foton. Care detectoare sunt declanșate?

- (a) Întotdeauna detectorul 1
- (b) Întotdeauna detectorul 2
- (c) Detectorul 1 SAU detectorul 2
- (d) Atât detectorul 1, cât și detectorul 2
- (e) Niciunul

Dacă fotonul a fost fie transmis, fie reflectat de primul divizor de fascicul, ar avea o șansă de 50/50 de a fi transmis sau reflectat de al doilea divizor de fascicul. Astfel, ambele detectoare ar trebui să se declanșeze cu o probabilitate egală. Cu toate acestea, în mod ciudat, rezultatele experimentale nu sunt de acord cu această ipoteză, deoarece doar un detector este declanșat cu o

¹¹ https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/simulations_html5/sims/Mach-Zehnder-Interferometer/Mach_Zehnder_Interferometer.html.

probabilitate de 100%. Acest fenomen ciudat este înțeles mai intuitiv din perspectiva ondulatorie a luminii.

Pentru a înțelege funcționarea interferometrului, este important de reținut că divizoarele de fascicul au o polaritate. Divizorul de fascicul constă dintr-o bucată de sticlă acoperită cu un dielectric pe o parte. Când lumina intră în divizorul de fascicul din partea dielectrică, lumina reflectată este defazată cu π . Lumina care intră din partea sticlei nu va suferi nicio defazare. Defazarea are loc numai atunci când lumina se deplasează de la un indice de refracție scăzut la unul ridicat ($n_{\text{aer}} < n_{\text{dielectric}} < n_{\text{sticlă}}$).

Ce înseamnă că un foton este defazat? În acest caz, este mai intuitiv să ne gândim la natura ondulatorie a luminii. Defazarea ar inversa oscilațiile câmpului electric și magnetic față de unda de intrare. Dacă o undă defazată π se suprapune cu unda originală, apare o interferență distructivă, așa cum se arată în Fig. 3.7.

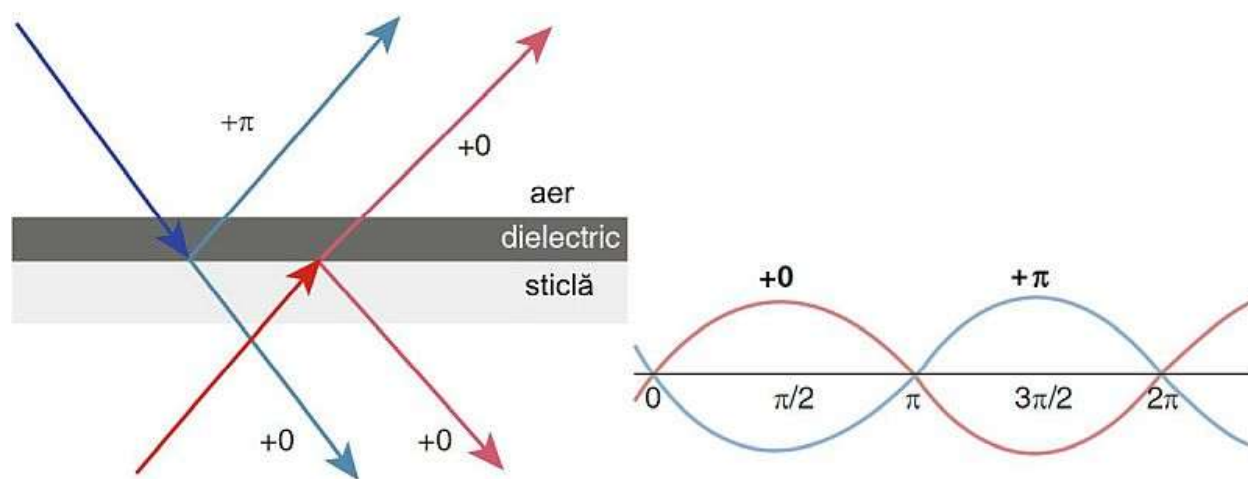


Fig. 3.7 Lumina care trece printr-un divizor de fascicul este defazată dacă este reflectată din partea dielectrică, dar nu este defazată dacă este reflectată din partea sticlei.

Întrebarea 9 Dacă presupunem că lumina este o undă clasică care prezintă interferență, puteți calcula care detectoare ar fi declanșate? Rețineți că primul divizor de fascicul are partea dielectrică în sus, în timp ce al doilea are dielectricul în jos, așa cum se arată în Fig. 3.6.

- (a) Întotdeauna detectorul 1
- (b) Întotdeauna detectorul 2
- (c) Detectorul 1 SAU detectorul 2
- (d) Atât detectorul 1, cât și detectorul 2
- (e) Niciunul

3.2.1 Explicația particulelor

Comportamentul interferometrului poate fi privit și din perspectiva particulelor, deși poate fi mai puțin intuitiv. Reamintim din experimentul cu divizor unic de fascicul că fotonul nu s-a divizat și nu s-a clonat. Se afla într-o stare de superpoziție, practic urmând ambele căi. Al doilea divizor de fascicul tratează fotonul ca și cum ar fi intrat simultan atât de sus, cât și de jos. După

cum se arată în Fig. 3.8, calea superioară intră în al doilea divizor de fascicul din partea de sticlă și nu experimentează nicio schimbare de fază, în timp ce calea inferioară intră din partea dielectrică și este defazată la reflexie. Stările $+0$ și $+\pi$ de la Detectorul 2 interferează distructiv, în timp ce stările $+0$ și $+0$ de la Detectorul 1 interferează constructiv. Prin urmare, Detectorul 1 se declanșează cu o probabilitate de 100%.

Întrebarea 10 Dacă fotonul este trimis în interferometrul Mach-Zehnder din stânga sus în loc de stânga jos, care detector(i) ar fi declanșat(e) și cu ce probabilitate?

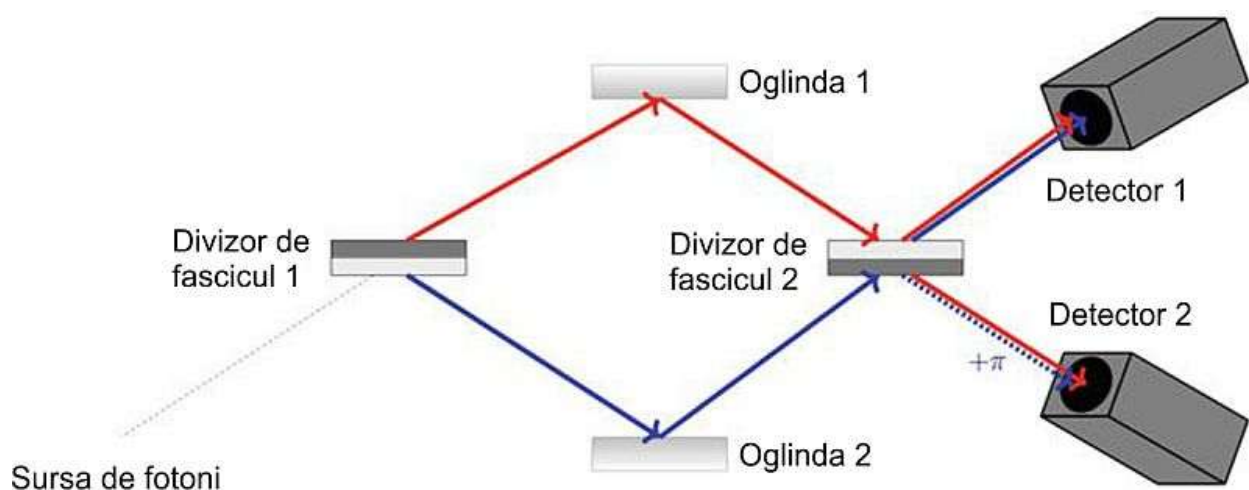


Fig. 3.8 Calea albastră arată traiectoria fotonului dacă acesta este reflectat de Divizorul de fascicul 1. Calea roșie arată traiectoria dacă fotonul este transmis. Deoarece Divizorul de fascicul 2 are dielectricul orientat în jos, albastrul este defazat la reflexie.

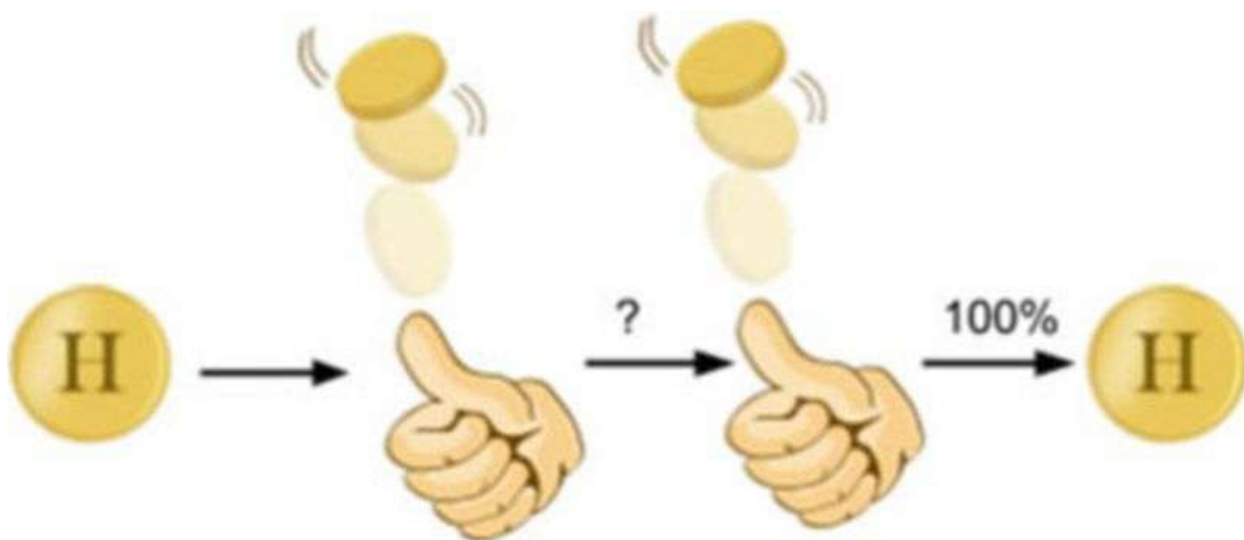


Fig. 3.9 Analogia cu moneda pentru interferometru. Trimiterea unui foton printr-un divizor de fascicul îl pune în superpoziție, dar adăugarea unui al doilea divizor de fascicul anulează superpoziția și recuperează starea inițială.

Chiar dacă ieșirea primului divizor de fascicul este 50/50, al doilea divizor de fascicul poate distinge dacă laserul a fost emis de sus sau de jos. Primul divizor de fascicul creează o stare de superpoziție, dar adăugarea unui al doilea anulează superpoziția și recuperează starea inițială. Aceasta este o operațiune non-clasică. Ar fi ca și cum am începe cu moneda cu capul în sus, am

arunca-o, am arunca-o din nou cât este încă în aer și apoi am obține întotdeauna cap când aterizează! Acest lucru este evidențiat în Fig. 3.9.

Există informații ascunse în starea de superpoziție. În qubitul fonic Mach-Zehnder, informația este codificată sub forma schimbării de fază. În experimentul prezentat în Fig. 3.8, am ales ca schimbarea de fază să aibă o valoare de π . Totuși, am fi putut la fel de ușor alege ca defazajul să aibă orice valoare între 0 și 2π (unghiurile unui cerc). Fiecare alegere separată de defazaj ar produce un tip diferit de stare de superpoziție care ar produce în continuare același rezultat măsurabil 50/50. Acest lucru este reprezentat pe sfera Bloch prin locații diferite de-a lungul ecuatorului¹². Această informație de defazaj este prezentă în amplitudini, dar nu și în pătratul amplitudinilor (și, prin urmare, ascunsă de noi în experimentul Mach-Zehnder - deși am putea face un alt experiment pentru a încerca să determinăm această informație). Iată două exemple simple de stări distincte care pot fi create în două aranjamente experimentale diferite ale experimentului Mach-Zehnder, care au în continuare aceeași probabilitate 50/50:

$$1/\sqrt{2} |0\rangle + 1/\sqrt{2} |1\rangle \text{ sau } 1/\sqrt{2} |0\rangle - 1/\sqrt{2} |1\rangle \quad (3.2)$$

În aceste două stări, semnele plus sau minus reprezintă două dintre numeroasele defazaje diferite care sunt posibile. Fiecare alegere diferită a defazajului depinde de modul în care este ales aranjamentul experimental. După cum puteți vedea, superpoziția cuantică este inextricabil legată de dualitatea undă-particulă. Mai mult, în experimentul Mach-Zehnder am creat o superpoziție, am efectuat o schimbare de fază și apoi am observat interferența undelor. Aceste operații experimentale sunt echivalente cu aplicarea matematică a operațiilor matrice/porți pe un qubit, așa cum vom vedea mai târziu. Ca atare, Mach-Zehnder este un exemplu al modului în care putem implementa tehnologic qubiții (fotonul) și operațiile (superpoziție/schimbare de fază etc.) pentru a construi un computer cuantic¹³. În calculul cuantic, se vorbește despre superpoziția stărilor mai degrabă decât despre comportamentul undelor. Totuși, așa cum am văzut, ambele cadre conduc la aceeași înțelegere a interferometrului Mach-Zehnder. Mai târziu vom folosi interferometrul pentru a implementa un algoritm cuantic.

3.3 Idei importante

1. Un foton poate fi pus într-o superpoziție folosind un divizor de fascicul. După ce trece prin divizorul de fascicul, un foton ia ambele căi simultan.

2. Interferometrul Mach-Zehnder arată cum fotonul ia de fapt două căi simultan. Aceasta este o dovadă experimentală concludentă a superpoziției fotonilor.

3.4 Exerciții

1. Prietenul dvs. care vă explică superpoziția spune că:

„O particulă în starea $(1/\sqrt{2}) |0\rangle + (1/\sqrt{2}) |1\rangle$ reprezintă o lipsă de cunoaștere a sistemului. În timp, particula se schimbă între stările $|0\rangle$ și $|1\rangle$. Starea de superpoziție spune că, în general, particula se află în fiecare dintre cele două stări în jumătate din timp.”

¹² O amplitudine complexă $e^{i\varphi}$ cu unghiuri de fază posibile infinite φ nu afectează probabilitatea, deoarece $|e^{i\varphi}|^2 = 1$.

¹³ Trebuie menționat că tehnologia a progresat astfel încât majoritatea qubiților sunt implementați în prezent folosind transmoni supraconductori și nu folosind un circuit Mach-Zehnder.

Cu ce părți ale acestei afirmații sunteți de acord și cu ce nu sunteți de acord?

2. Doar un detector este declanșat dacă un singur foton este trimis prin experimentul divizorului de fascicul prezentat în Fig. 3.5. Dacă laserul emite doi fotoni în același timp, care este probabilitatea ca ambele detectoare să fie declanșate simultan? Acum, ce ziceți de trei fotoni? Zece fotoni? Rețineți că acesta este motivul pentru care un fascicul de lumină de putere mai mare pare să ajungă simultan la ambele detectoare.

3. În practică, este dificil să plasați detectoarele la exact aceeași distanță de divizorul de fascicul. Diferența de distanță este măsurată folosind întârzierea Δt dintre fotoni. Experimentul este prezentat în Fig. 3.10, iar datele în Fig. 3.11.

(a) Datele prezentate în Fig. 3.11 la $\Delta t = 0$ susțin că lumina este o particulă sau o undă?

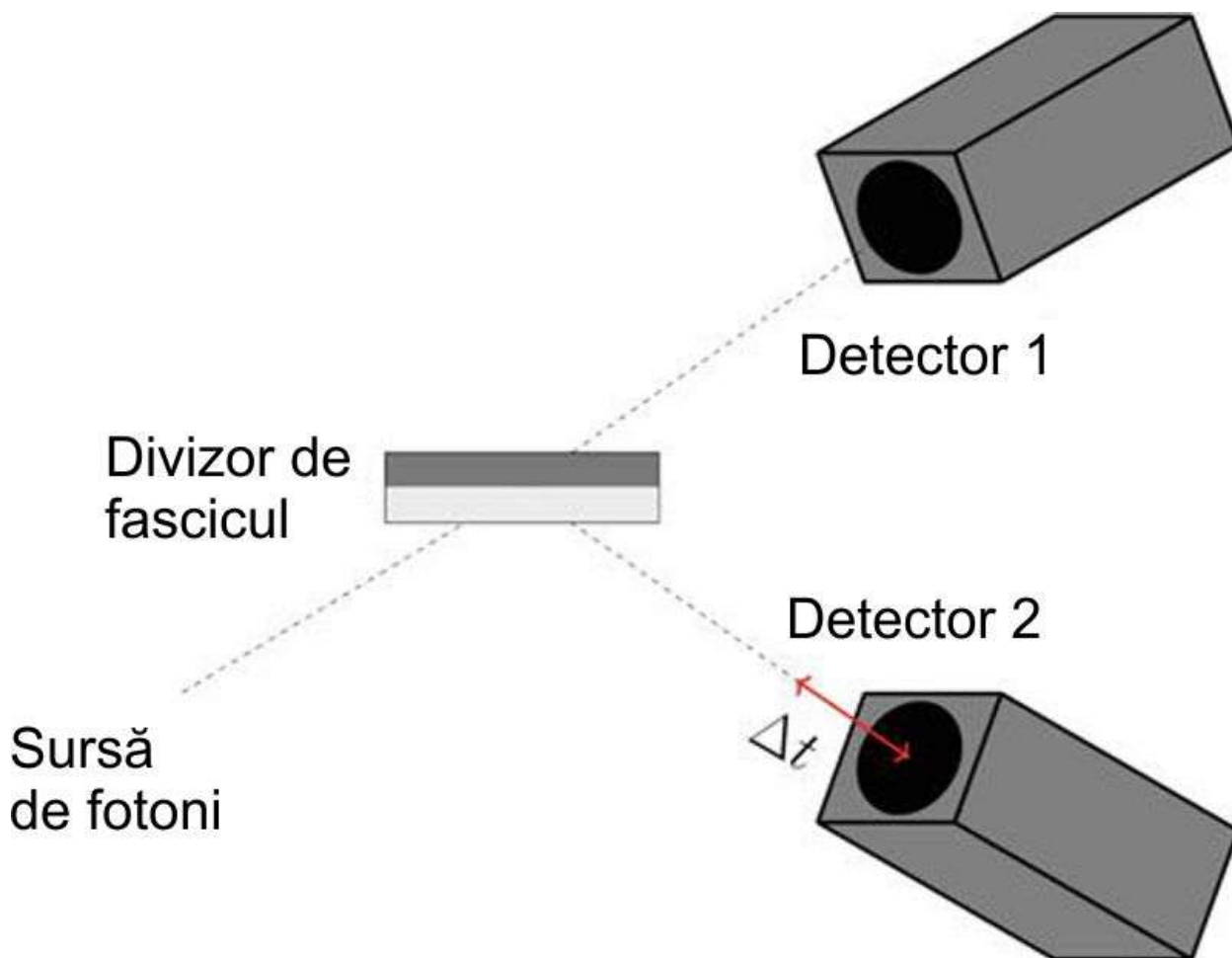


Fig. 3.10 Experimentul modifică poziția Detectorului 2 și înregistrează numărul de coincidențe, adică de câte ori ambele detectoare sunt declanșate simultan.

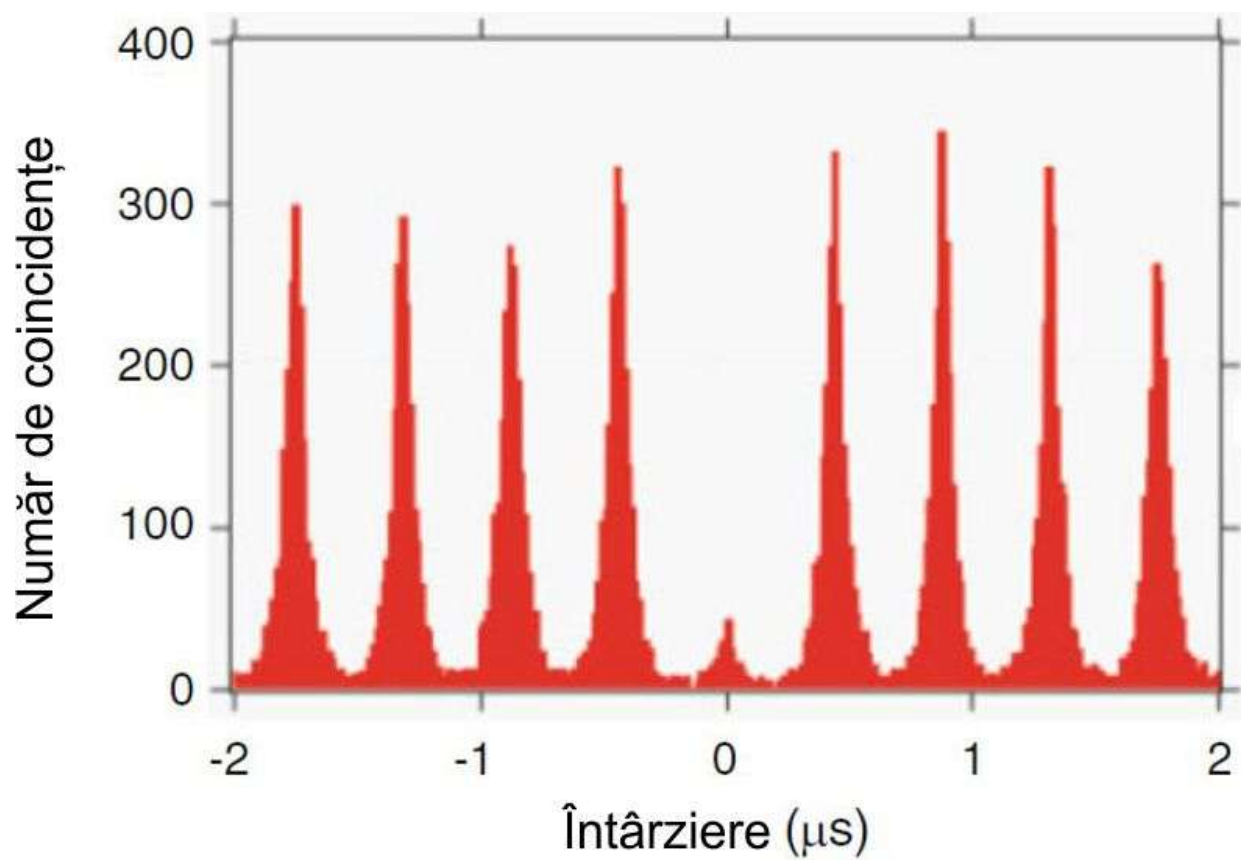


Fig. 3.11 Sunt prezentate mai sus datele pentru exploziile de lumină trimise de laser la fiecare 0,4 μs . Figura este reprodusă cu permisiunea lui Martin Laforest și a echipei de comunicare și inițiative strategice de la Institutul pentru Calcul Cuantic, departamentul de informare al Universității din Waterloo.

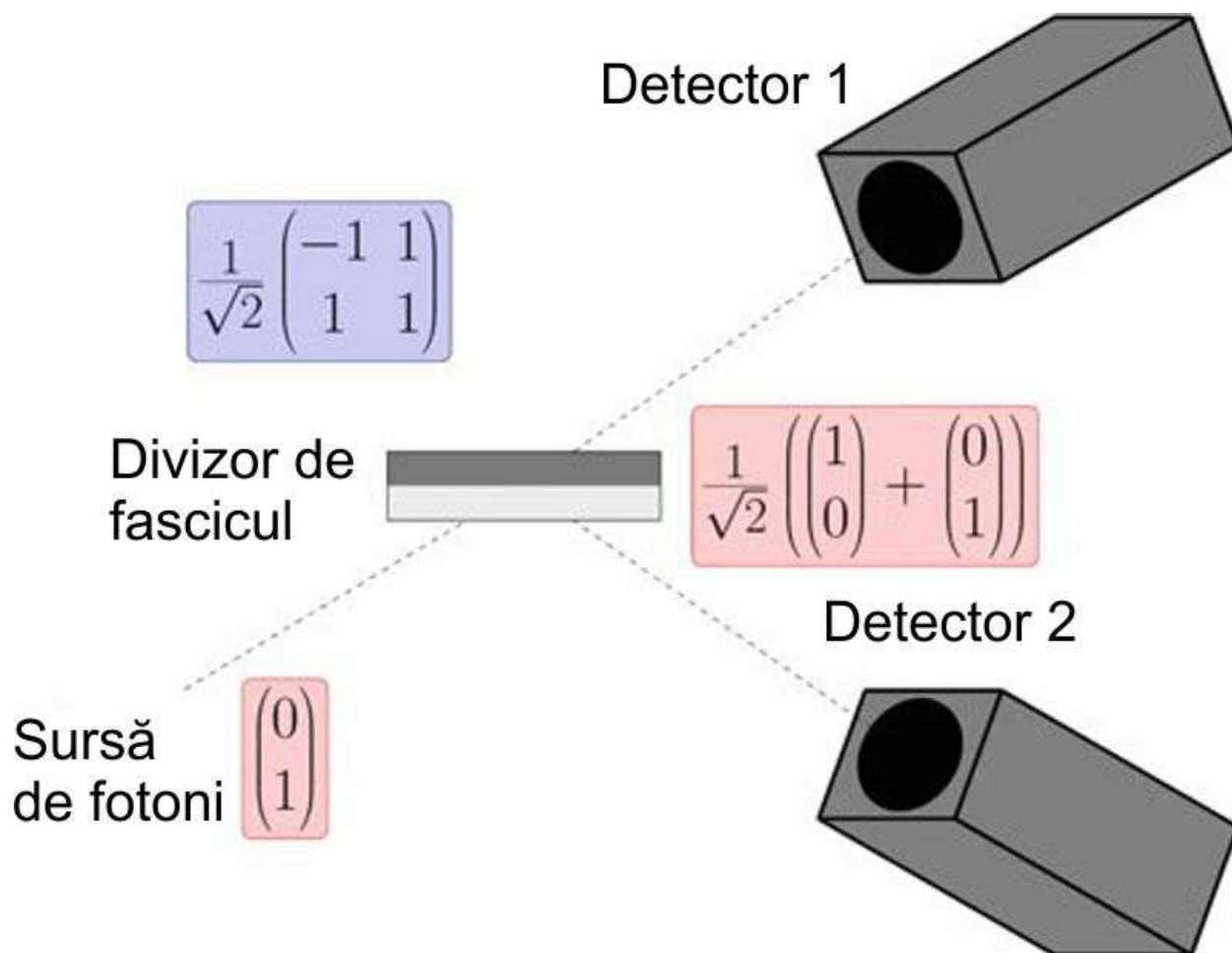


Fig. 3.12 Formularea matriceală a aparatului Mach-Zehnder.

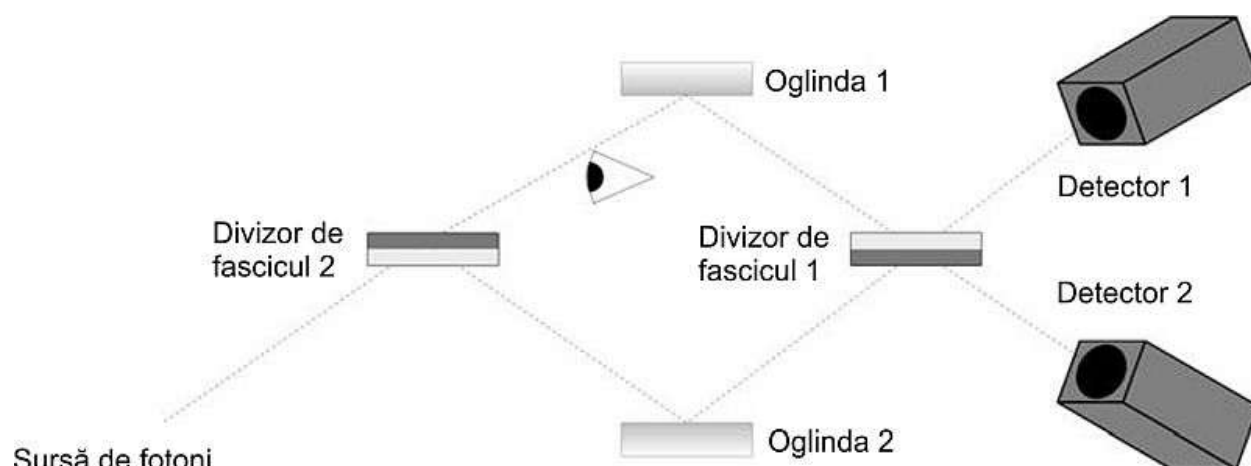


Fig. 3.13 Un al treilea detector (ochiul dumneavoastră) este adăugat la aparatul Mach-Zehnder.

(b) De ce există un număr mare de coincidențe când $\Delta t = 0$? (Indiciu: Observați distanța dintre vârfuri.)

4. Folosind matricele date în Fig. 3.12, arătați cum se creează starea de superpoziție prin înmulțirea matricei divizorului de fascicul cu starea inițială a fotonului.

5. Construiți reprezentarea matricială pentru un divizor de fascicul 30/70.

6. Deranjat de interferometrul Mach-Zehnder, decideți să determinați odată pentru totdeauna ce traiectorie urmează fotonul după primul divizor de fascicul. Plasați un alt detector (indicat de globul ocular) pe traiectoria superioară, așa cum se arată în Fig. 3.13. Dacă globul ocular vede un foton, ce s-ar vedea la detectoarele 1 și 2?

Bibliografie

- ANC. 2024. „Strategia Națională în Domeniul Tehnologiilor Cuantice 2024-2029 – Autoritatea Națională pentru Cercetare :: www.research.gov.ro”.
<https://www.research.gov.ro/programe-nationale/strategia-nationala-in-domeniul-tehnologiilor-cuantice-2024-2029-2/>.
- Bennett, Charles H., și Gilles Brassard. 2014. „Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing”. *Theoretical Computer Science* 560 (decembrie): 7-11.
<https://doi.org/10.1016/j.tcs.2014.05.025>.
- Birkl, G., S. Kassner, și H. Walther. 1992. „Multiple-Shell Structures of Laser-Cooled $^{24}\text{Mg}^+$ Ions in a Quadrupole Storage Ring”. *Nature* 357 (6376): 310-13.
<https://doi.org/10.1038/357310a0>.
- Blackbird. 2022. „Blackbird Quantum Assembly Language — Blackbird 0.6.0-dev documentation”. <https://quantum-blackbird.readthedocs.io/en/latest/>.
- Bloch, Immanuel, Jean Dalibard, și Sylvain Nascimbène. 2012. „Quantum Simulations with Ultracold Quantum Gases”. *Nature Physics* 8 (4): 267-76.
<https://doi.org/10.1038/nphys2259>.
- Bobier, Jean-François, Matt Langione, Cassia Naudet-Baulieu, Zheng Cui, și Eitoku Watanabe. 2024. „The Long-Term Forecast for Quantum Computing Still Looks Bright”. BCG Global, iulie 3. <https://www.bcg.com/publications/2024/long-term-forecast-for-quantum-computing-still-looks-bright>.
- Bub, Jeffrey. 2016. „Bananaworld”. În *Bananaworld: Quantum Mechanics for Primates*, ediție de Jeffrey Bub. Oxford University Press.
<https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198718536.003.0003>.
- Buchholz, Scott, și Beena Ammanath. 2022. „Quantum Computing May Create Ethical Risks for Businesses. It’s Time to Prepare”. Deloitte Insights.
<https://www.deloitte.com/us/en/insights/topics/risk-management/quantum-computing-ethics-risks.html>.
- Busch, Paul. 2002. „The Time-Energy Uncertainty Relation”. În *Time in Quantum Mechanics*, ediție de J. G. Muga, R. Sala Mayato, și I. L. Egusquiza. Springer.
https://doi.org/10.1007/3-540-45846-8_3.
- Bužek, V., și M. Hillery. 1996. „Quantum copying: Beyond the no-cloning theorem”. *Physical Review A* 54 (3): 1844-52. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.54.1844>.
- Campbell, Joe C. 2007. „Recent Advances in Telecommunications Avalanche Photodiodes”. *Journal of Lightwave Technology* 25 (ianuarie): 109-21.
<https://doi.org/10.1109/JLT.2006.888481>.

- Caves, Carlton M., Christopher A. Fuchs, și Rüdiger Schack. 2002. „Quantum probabilities as Bayesian probabilities”. *Physical Review A* 65 (2): 022305. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.65.022305>.
- Childs, Andrew M., și Wim van Dam. 2010. „Quantum algorithms for algebraic problems”. *Reviews of Modern Physics* 82 (1): 1-52. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.1>.
- Cirac, J. I., și P. Zoller. 1995. „Quantum Computations with Cold Trapped Ions”. *Physical Review Letters* 74 (20): 4091-94. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.74.4091>.
- Dam, Samudrapom. 2019. „What Is Quantum Cryptography?” AZoQuantum, iulie 10. <https://www.azoquantum.com/Article.aspx?ArticleID=117>.
- Dawson, C.M., și M.A. Nielsen. 2006. „The Solovay-Kitaev algorithm”. *Quantum Information and Computation* 6 (1): 81-95. <https://doi.org/10.26421/QIC6.1-6>.
- Degen, C. L., F. Reinhard, și P. Cappellaro. 2017. „Quantum sensing”. *Reviews of Modern Physics* 89 (3): 035002. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.89.035002>.
- Dowling, Jonathan P., și Gerard J. Milburn. 2003. „Quantum technology: the second quantum revolution”. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 361 (1809): 1655-74. <https://doi.org/10.1098/rsta.2003.1227>.
- Einstein, A., B. Podolsky, și N. Rosen. 1935. „Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?” *Physical Review* 47 (10): 777-80. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.47.777>.
- Ekert, Artur K. 1991. „Quantum cryptography based on Bell’s theorem”. *Physical Review Letters* 67 (6): 661-63. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.67.661>.
- European Commission. 2025. „Quantum Europe Strategy | Shaping Europe’s Digital Future”. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/quantum-europe-strategy>.
- European Quantum Flagship. 2020. „Strategic Research Agenda”. https://qt.eu/media/pdf/Strategic_Research-_Agenda_d_FINAL.pdf.
- Feenberg, Andrew. 2005. „Critical Theory of Technology: An Overview”. <https://www.sfu.ca/~andrewf/books/critbio.pdf>.
- Feynman, Richard P. 1982. „Simulating Physics with Computers”. *International Journal of Theoretical Physics* 21 (6): 467-88. <https://doi.org/10.1007/BF02650179>.
- Folland, Gerald B., și Alladi Sitaram. 1997. „The Uncertainty Principle: A Mathematical Survey”. *Journal of Fourier Analysis and Applications* 3 (3): 207-38. <https://doi.org/10.1007/BF02649110>.

- Gisin, Nicolas, Grégoire Ribordy, Wolfgang Tittel, și Hugo Zbinden. 2002a. „Quantum cryptography”. *Reviews of Modern Physics* 74 (1): 145-95. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.74.145>.
- Gisin, Nicolas, Grégoire Ribordy, Wolfgang Tittel, și Hugo Zbinden. 2002b. „Quantum cryptography”. *Reviews of Modern Physics* 74 (1): 145-95. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.74.145>.
- Green, Alexander S., Peter LeFanu Lumsdaine, Neil J. Ross, Peter Selinger, și Benoît Valiron. 2013. *An Introduction to Quantum Programming in Quipper*. Vol. 7948. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38986-3_10.
- Häner, Thomas, Damian S. Steiger, Krysta Svore, și Matthias Troyer. 2018. „A Software Methodology for Compiling Quantum Programs”. *Quantum Science and Technology* 3 (2): 020501. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/aaa5cc>.
- Hardy, Lucien. 2002. „Why Quantum Theory?” În *Non-Locality and Modality*, ediție de Tomasz Placek și Jeremy Butterfield. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-010-0385-8_4.
- Harrow, Aram W., Avinatan Hassidim, și Seth Lloyd. 2009. „Quantum Algorithm for Linear Systems of Equations”. *Physical Review Letters* 103 (15): 150502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.150502>.
- Heidegger, Martin. 1977. „The Question Concerning Technology”. <https://www2.hawaii.edu/~freeman/courses/phil394/The%20Question%20Concerning%20Technology.pdf>.
- Huang, Dazu, Zhigang Chen, Ying Guo, și Moon Ho Lee. 2007. „Quantum Secure Direct Communication Based on Chaos with Authentication”. *Journal of the Physical Society of Japan* 76 (12): 124001. <https://doi.org/10.1143/JPSJ.76.124001>.
- IBM. 2025. „Introduction to OpenQASM”. IBM Quantum Documentation. <https://quantum.cloud.ibm.com/docs/en/guides/quantum.cloud.ibm.com/docs/en/guides/introduction-to-qasm>.
- Ihde, Don. 1990. „Technology and the Lifeworld”. *Indiana University Press*. <https://iupress.org/9780253205605/technology-and-the-lifeworld/>.
- Johnson, T. H., S. R. Clark, și D. Jaksch. 2014. „What is a quantum simulator?” Preprint, mai 12. <https://doi.org/10.1186/epjqt10>.
- Kennard, E. H. 1927. „Zur Quantenmechanik einfacher Bewegungstypen”. *Zeitschrift für Physik* 44 (4): 326-52. <https://doi.org/10.1007/BF01391200>.
- Kent, Adrian, William J. Munro, și Timothy P. Spiller. 2011. „Quantum tagging: Authenticating location via quantum information and relativistic signaling constraints”. *Physical Review A* 84 (1): 012326. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.84.012326>.

- Khammassi, N., G. G. Guerreschi, I. Ashraf, J. W. Hogaboam, C. G. Almudever, și K. Bertels. 2018. „cQASM v1.0: Towards a Common Quantum Assembly Language”. arXiv:1805.09607. Versiunea 1. Preprint, arXiv, mai 24. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1805.09607>.
- Kimble, H. J. 2008. „The Quantum Internet”. *Nature* 453 (7198): 1023-30. <https://doi.org/10.1038/nature07127>.
- Konig, Robert, Stephanie Wehner, și Jürg Wullschleger. 2012. „Unconditional Security From Noisy Quantum Storage”. *IEEE Transactions on Information Theory* 58 (3): 1962-84. <https://doi.org/10.1109/TIT.2011.2177772>.
- Lee, Jane, și Jane Lee. 2022. „IBM Launches Its Most Powerful Quantum Computer with 433 Qubits”. Technology. *Reuters*, noiembrie 9. <https://www.reuters.com/technology/ibm-launches-its-most-powerful-quantum-computer-with-433-qubits-2022-11-09/>.
- Li, Dong, Bryan T. Gard, Yang Gao, et al. 2016. „Phase sensitivity at the Heisenberg limit in an SU(1,1) interferometer via parity detection”. *Physical Review A* 94 (6): 063840. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.94.063840>.
- Lloyd, Seth. 1996. „Universal Quantum Simulators | Science”. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.273.5278.1073>.
- Luis, Alfredo. 2017. „Breaking the weak Heisenberg limit”. *Physical Review A* 95 (3): 032113. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.95.032113>.
- Lund, Brady D., Sakib Shahriar, Brady D. Lund, și Sakib Shahriar. 2025. „Quantum Computing: A Concise Introduction”. *Encyclopedia* 5 (4). <https://doi.org/10.3390/encyclopedia5040173>.
- Main, D., P. Drmota, D. P. Nadlinger, et al. 2025. „Distributed Quantum Computing across an Optical Network Link”. *Nature* 638 (8050): 383-88. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08404-x>.
- Microsoft. 2023. „Introduction to the Quantum Programming Language Q# - Azure Quantum”. <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/quantum/qsharp-overview>.
- Moll, Nikolaj, Panagiotis Barkoutsos, Lev S Bishop, et al. 2018. „Quantum Optimization Using Variational Algorithms on Near-Term Quantum Devices”. *Quantum Science and Technology* 3 (3): 030503. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/aab822>.
- Monroe, C., W. C. Campbell, L.-M. Duan, et al. 2021. „Programmable Quantum Simulations of Spin Systems with Trapped Ions”. *Reviews of Modern Physics* 93 (2): 025001. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.93.025001>.
- Nielsen, Michael A., și Isaac L. Chuang. 2010. „Quantum Computation and Quantum Information: 10th Anniversary Edition”. Cambridge Aspire Website, Cambridge University Press, decembrie 9. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511976667>.

- OpenQASM. 2025. „OpenQASM · GitHub”. <https://github.com/openqasm>.
- Paraoanu, G. S. 2014. „Recent progress in quantum simulation using superconducting circuits”. *Journal of Low Temperature Physics* 175 (5-6): 633-54. <https://doi.org/10.1007/s10909-014-1175-8>.
- Pezzè, Luca, Augusto Smerzi, Markus K. Oberthaler, Roman Schmied, și Philipp Treutlein. 2018. „Quantum metrology with nonclassical states of atomic ensembles”. *Reviews of Modern Physics* 90 (3): 035005. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.90.035005>.
- Pirandola, S., U. L. Andersen, L. Banchi, et al. 2020. „Advances in Quantum Cryptography”. *Advances in Optics and Photonics* 12 (4): 1012-236. <https://doi.org/10.1364/AOP.361502>.
- Pirandola, Stefano, Bhaskar Roy Bardhan, Tobias Gehring, Christian Weedbrook, și Seth Lloyd. 2018. „Advances in Photonic Quantum Sensing”. *Nature Photonics* 12 (12): 724-33. <https://doi.org/10.1038/s41566-018-0301-6>.
- Possati, Luca M. 2023. „Ethics of Quantum Computing: An Outline”. *Philosophy & Technology* 36 (3): 48. <https://doi.org/10.1007/s13347-023-00651-6>.
- Preskill, John. 2018. „Quantum Computing in the NISQ Era and Beyond”. *Quantum* 2 (august): 79. <https://doi.org/10.22331/q-2018-08-06-79>.
- Renner, Renato, și Ramona Wolf. 2023. „Quantum Advantage in Cryptography”. *AIAA Journal* 61 (5): 1895-910. <https://doi.org/10.2514/1.J062267>.
- Rep. Smith, Lamar [R-TX-21. 2018. „Text - H.R.6227 - 115th Congress (2017-2018): National Quantum Initiative Act”. Legislation. decembrie 21. 2018-06-26. <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/6227/text>.
- Ritter, Stephan, Christian Nölleke, Carolin Hahn, et al. 2012. „An Elementary Quantum Network of Single Atoms in Optical Cavities”. *Nature* 484 (7393): 195-200. <https://doi.org/10.1038/nature11023>.
- Sangouard, Nicolas, Christoph Simon, Hugues de Riedmatten, și Nicolas Gisin. 2011. „Quantum repeaters based on atomic ensembles and linear optics”. *Reviews of Modern Physics* 83 (1): 33-80. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.83.33>.
- Sasaki, Masahide. 2017. „Quantum Networks: Where Should We Be Heading?”. *Quantum Science and Technology* 2 (2): 020501. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/aa6994>.
- Scarani, Valerio, Helle Bechmann-Pasquinucci, Nicolas J. Cerf, Miloslav Dušek, Norbert Lütkenhaus, și Momtchil Peev. 2009. „The security of practical quantum key distribution”. *Reviews of Modern Physics* 81 (3): 1301-50. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.1301>.
- Schlosshauer, Maximilian. 2019. „Quantum decoherence”. *Physics Reports, Quantum decoherence*, vol. 831 (octombrie): 1-57. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2019.10.001>.

- Schneider, John, și Ian Smalley. 2025. „What Is Quantum Computing? | IBM”. iunie 10. <https://www.ibm.com/think/topics/quantum-computing>.
- Schrödinger, E. 1935. „Discussion of Probability Relations between Separated Systems”. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 31 (4): 555-63. <https://doi.org/10.1017/S0305004100013554>.
- Shor, Peter W. 1999. „Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer”. *SIAM Review* 41 (2): 303-32. <https://doi.org/10.1137/S0036144598347011>.
- Smith, Robert S., Michael J. Curtis, și William J. Zeng. 2017. „A Practical Quantum Instruction Set Architecture”. arXiv:1608.03355. Preprint, arXiv, februarie 17. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1608.03355>.
- Soller, Henning. 2025. „Quantum Technology Monitor 2025 | McKinsey”. <https://www.mckinsey.com/capabilities/tech-and-ai/our-insights/the-year-of-quantum-from-concept-to-reality-in-2025>.
- Stray, Ben, Andrew Lamb, Aisha Kaushik, et al. 2022. „Quantum Sensing for Gravity Cartography”. *Nature* 602 (7898): 590-94. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04315-3>.
- Takeoka, Masahiro, Saikat Guha, și Mark M. Wilde. 2014. „Fundamental Rate-Loss Tradeoff for Optical Quantum Key Distribution”. *Nature Communications* 5 (1): 5235. <https://doi.org/10.1038/ncomms6235>.
- Timpson, Chris. 2013. „THE PHILOSOPHY OF QUANTUM INFORMATION”. <https://users.ox.ac.uk/~bras2317/The%20Philosophy%20of%20Quantum%20Information.pdf>.
- Viola, Lorenza, și Seth Lloyd. 1998. „Dynamical suppression of decoherence in two-state quantum systems”. *Physical Review A* 58 (4): 2733-44. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.58.2733>.
- Watrous, John. 2018. *The Theory of Quantum Information*. Cambridge University Press.
- Williams, Colin P., și Scott H. Clearwater. 1998. *Explorations in Quantum Computing*. TELOS.
- Winner, Langdon. 1980. „Do Artefacts Have Politics?”. <https://faculty.cc.gatech.edu/~beki/cs4001/Winner.pdf>.
- Wootters, W. K., și W. H. Zurek. 1982. „A Single Quantum Cannot Be Cloned”. *Nature* 299 (5886): 802-3. <https://doi.org/10.1038/299802a0>.
- Yin, Juan, Yuan Cao, Hai-Lin Yong, et al. 2013. „Lower Bound on the Speed of Nonlocal Correlations without Locality and Measurement Choice Loopholes”. *Physical Review Letters* 110 (26): 260407. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.260407>.

- Yu, Haocun, L. McCuller, M. Tse, et al. 2020. „Quantum correlations between the light and kilogram-mass mirrors of LIGO”. *Nature* 583 (7814): 43-47. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2420-8>.
- Zeilinger, Anton. 1999. „Experiment and the foundations of quantum physics”. *Reviews of Modern Physics* 71 (2): S288-97. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.71.S288>.
- Zurek, Wojciech Hubert. 2003. „Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical”. *Reviews of Modern Physics* 75 (3): 715-75. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.75.715>.

Cuprins

Tehnologii cuantice pentru informatică și securitate

- Introducere
- Bazele fizicii cuantice relevante pentru tehnologiile cuantice
- Calculul cuantic: concepte, algoritmi, hardware și starea actuală
- Criptografia cuantică: QKD, protocoale (BB84), avantaje și provocări
- Aplicații actuale și viitoare ale tehnologiilor cuantice
- Provocări tehnologice și etice
- Uniunea Europeană: Strategia UE în domeniul tehnologiilor cuantice
- România: Strategia națională în domeniul tehnologiilor cuantice
- Concluzii
- Resurse

Calculul cuantic

- 1 Introducere în superpoziție
- 2 Ce este un qubit?
- 3 Crearea superpoziției: Divizorul de fascicul
- 4 Crearea superpoziției: Stern-Gerlach
- 5 Criptografia cuantică
- 6 Porți cuantice
- 7 Inseparabilitatea
- 8 Teleportarea cuantică
- 9 Algoritmi cuantici

- Răspunsuri

Criptografia cuantică

1. Introducere
2. Fundamentele criptografiei cuantice
3. Distribuția cuantică a cheilor
4. Securitatea QKD
5. Partajarea secretelor cuantice

- Referințe

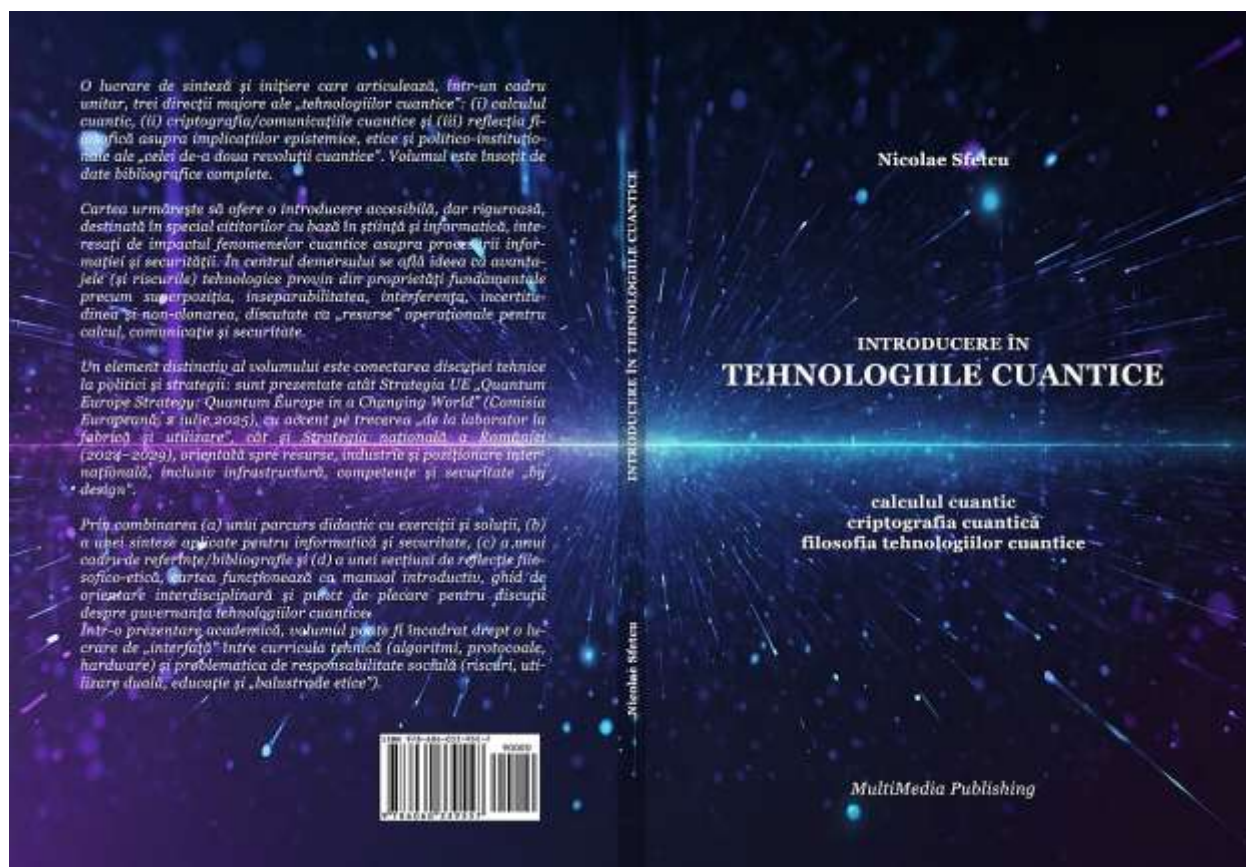
Filosofia tehnologiilor cuantice: informație, control și responsabilitate în „a doua revoluție cuantică”

1. Introducere: de la „prima” la „a doua” revoluție cuantică
2. Cadru filosofic: ce înseamnă „tehnologie” când obiectul este cuantic?
3. Ontologia dispozitivelor cuantice: „stare”, „resursă”, „eroare”
4. Epistemologia informațională: probabilitate, inferență, reconstrucții
5. Tehnologia ca experiment filosofic: criptografie, non-localitate, certificare
6. Metafizica „informației”: de la slogan la program de cercetare
7. Etică, politică și guvernanță: infrastructuri cuantice și putere
8. Concluzii

- Resurse

Bibliografie

Cartea



Tehnologiile cuantice schimbă regulile jocului în informatică și securitate: de la **qubiți** și algoritmi care promit accelerări spectaculoase, până la **distribuția cuantică a cheilor (QKD)**, unde orice interceptare lasă urme detectabile. Această carte oferă o introducere **accesibilă, dar riguroasă**, construită pe surse academice, cu accent pe înțelegere clară și aplicabilitate.

Ce vei învăța din carte

Calcul cuantic, explicat pe înțelesul tău

- concepte fundamentale (qubit, superpoziție, inseparabilitate, interferență, decoerență)
- porți cuantice, circuite și noțiuni de programare cuantică
- algoritmi reprezentativi (inclusiv Shor/Grover ca repere, plus Deutsch–Jozsa în partea de exercițiu)

Criptografie cuantică și QKD (BB84, EPR și nu numai)

- distribuția cuantică a cheilor (QKD) și protocoale de bază (BB84, EPR, CV-QKD, „stare capcană”)
- securitatea QKD, atacuri și dovezi/condiții de securitate
- conexiuni cu **criptografia post-cuantică**

Filosofia tehnologiilor cuantice: ce înseamnă „a doua revoluție cuantică”

O secțiune aparte, care pune în context implicațiile de **control, responsabilitate, guvernanta și putere** ale infrastructurilor cuantice.

Pentru cine este cartea

- **Studenti și autodidacți** cu bazele științei și informaticii, care vor o hartă coerentă a domeniului
- **Profesioniști IT / security** care vor să înțeleagă impactul cuantic asupra securității și direcțiile (QKD + post-cuantic)
- **Manageri tehnici / decidenți** care au nevoie de context (aplicații, limitări, riscuri, etică)

De ce merită

- **Structură completă:** fundamente → aplicații → provocări tehnologice și etice
- **Învățare activă:** capitole cu **exerciții** + secțiune de **răspunsuri/soluții**
- **Actualitate declarată în text:** include „starea actuală (2026)” și teme de strategie (UE, România)

Ce include (pe scurt)

- Tehnologii cuantice pentru informatică și securitate (introducere amplă)
- „Calculul cuantic” (capitole didactice: qubit, porți, inseparabilitate, teleportare, algoritmi)
- „Criptografia cuantică” (QKD, securitate, atacuri, post-cuantic)
- „Filosofia tehnologiilor cuantice” (cadru conceptual și etic-politic)

FAQ

Cartea e pentru începători?

Este o introducere „accesibilă, dar riguroasă”, adresată celor cu cunoștințe de bază în știință și informatică.

Acoperă și securitatea, nu doar calculul cuantic?

Da — include criptografie cuantică, QKD (BB84 etc.), securitate, atacuri și legături cu post-cuantic.

Există exerciții și soluții?

Da — sunt incluse exerciții și o secțiune de răspunsuri/soluții.

O lucrare de sinteză și inițiere care articulează, într-un cadru unitar, trei direcții majore ale „tehnologiilor cuantice”: (i) calculul cuantic, (ii) criptografia/comunicațiile cuantice și (iii)

reflecția filosofică asupra implicațiilor epistemice, etice și politico-instituționale ale „celeia de-a doua revoluții cuantice”. Volumul este însoțit de date bibliografice complete.

Cartea urmărește să ofere o introducere accesibilă, dar riguroasă, destinată în special cititorilor cu bază în știință și informatică, interesați de impactul fenomenelor cuantice asupra procesării informației și securității. În centrul demersului se află ideea că avantajele (și riscurile) tehnologice provin din proprietăți fundamentale precum **superpoziția**, **inseparabilitatea**, **interferența**, **incertitudinea** și **non-clonarea**, discutate ca „resurse” operaționale pentru calcul, comunicație și securitate.

Structura este stratificată: începe cu o secțiune de orientare („Tehnologii cuantice pentru informatică și securitate”), apoi aprofundează prin două blocuri didactic-tehnice (calcul cuantic; criptografie cuantică) și se încheie cu un modul filosofic dedicat implicațiilor conceptuale și normative. Cuprinsul indică o progresie de la fundamente (QIS și noțiuni de mecanică cuantică relevante) către aplicații, limitări și guvernanta (UE și România), urmate de resurse/bibliografie.

Un element distinctiv al volumului este conectarea discuției tehnice la politici și strategii: sunt prezentate atât **Strategia UE „Quantum Europe Strategy: Quantum Europe in a Changing World” (Comisia Europeană, 2 iulie 2025)**, cu accent pe trecerea „de la laborator la fabrică și utilizare”, cât și **Strategia națională a României (2024–2029)**, orientată spre resurse, industrie și poziționare internațională, inclusiv infrastructură, competențe și securitate „by design”.

Prin combinarea (a) unui parcurs didactic cu exerciții și soluții, (b) a unei sinteze aplicate pentru informatică și securitate, (c) a unui cadru de referințe/bibliografie și (d) a unei secțiuni de reflecție filosofico-etică, cartea funcționează ca **manual introductiv**, **ghid de orientare interdisciplinară** și **punct de plecare pentru discuții despre guvernanta tehnologiilor cuantice**.

Într-o prezentare academică, volumul poate fi încadrat drept o lucrare de „interfață” între curricula tehnică (algoritmi, protocoale, hardware) și problematica de responsabilitate socială (riscuri, utilizare duală, educație și „balustrade etice”).

MultiMedia Publishing <https://www.telework.ro/ro/e-books/introducere-in-tehnologiile-cuantice/>

- Digital: EPUB (ISBN 978-606-033-956-4), Kindle (ISBN 978-606-033-957-1), PDF (ISBN 978-606-033-958-8)

- Tipărit: Format B5, ISBN: 978-606-033-955-7

[DOI: 10.58679/MM31480](https://doi.org/10.58679/MM31480)

Data publicării: 15.01.2026