



UNIVERSITATEA BABEŞ-BOLYAI
BABEŞ-BOLYAI TUDOMÁNYEGYETEM
BABEŞ-BOLYAI UNIVERSITAT
BABEŞ-BOLYAI UNIVERSITY
TRADITIO ET EXCELLENTIA

UBB TECH TRANSFER

NEWSLETTER NR. 8

QUANTUM
@ UBB

INTERVIU CU PROF. TOMMASO CALARCO

ARTICOL DE PROF. CORIOLAN TIUŞAN

Quprins

INTRO.....03

UBBStrategic

dr. Radu Ionicioiu

Proiectul QTSTRAT la final05

UBBNovator

Conf. univ. Mihai Suciu (*Facultatea de Matematică și Informatică a UBB*)

Programul Postuniversitar Quantum Computing and Communication

(Calcul cuantic și comunicații)10

UBBFrontier

Prof. univ. Coriolan Tiușan (*Facultatea de Fizică a UBB*)

Qubitul skyrmionic: materiale cuantice și nanostructuri ca și platforme

pentru tehnologii cuantice 14

UBB TechTransfer Interviews

Prof. univ. Tommaso Calarco

"It is still a big dream, but it is no longer a crazy dream"27

INCIPIT

Acest număr de Newsletter este unul deosebit pentru că tratează despre un subiect deosebit.

Ne aflăm în pragul unei revoluții tehnologice. Aplicațiile fizicii cuantice, la început postulate doar în teorie, încep să prindă tot mai accentuat contur și în practică. Unele sunt încă în stadiu embrionar, altele demonstrează rezultate promițătoare de pe acum. Ceea ce până nu demult păreau doar speculații science-fiction vor deveni, tot mai mult, parte a vieții noastre de fiecare zi. În conexiune cu Inteligența Artificială (care va face și ea obiectul unui proxim număr al **UBB TechTransfer Newsletter**), tehnologiile cuantice propulsează omenirea pe creasta unui val evolutiv fără precedent în istoria umanității, cu mutații profunde, atât calitative, cât și cantitative.

Ca universitate world-class, **Universitatea Babeș-Bolyai** este pregătită să abordeze provocările ridicate de progresul tehnologiilor cuantice. Prezentul număr de Newsletter prezintă diferite ipostaze ale acestei pregătiri, care se manifestă în mai multe direcții- cercetare, educație, acțiune strategică.

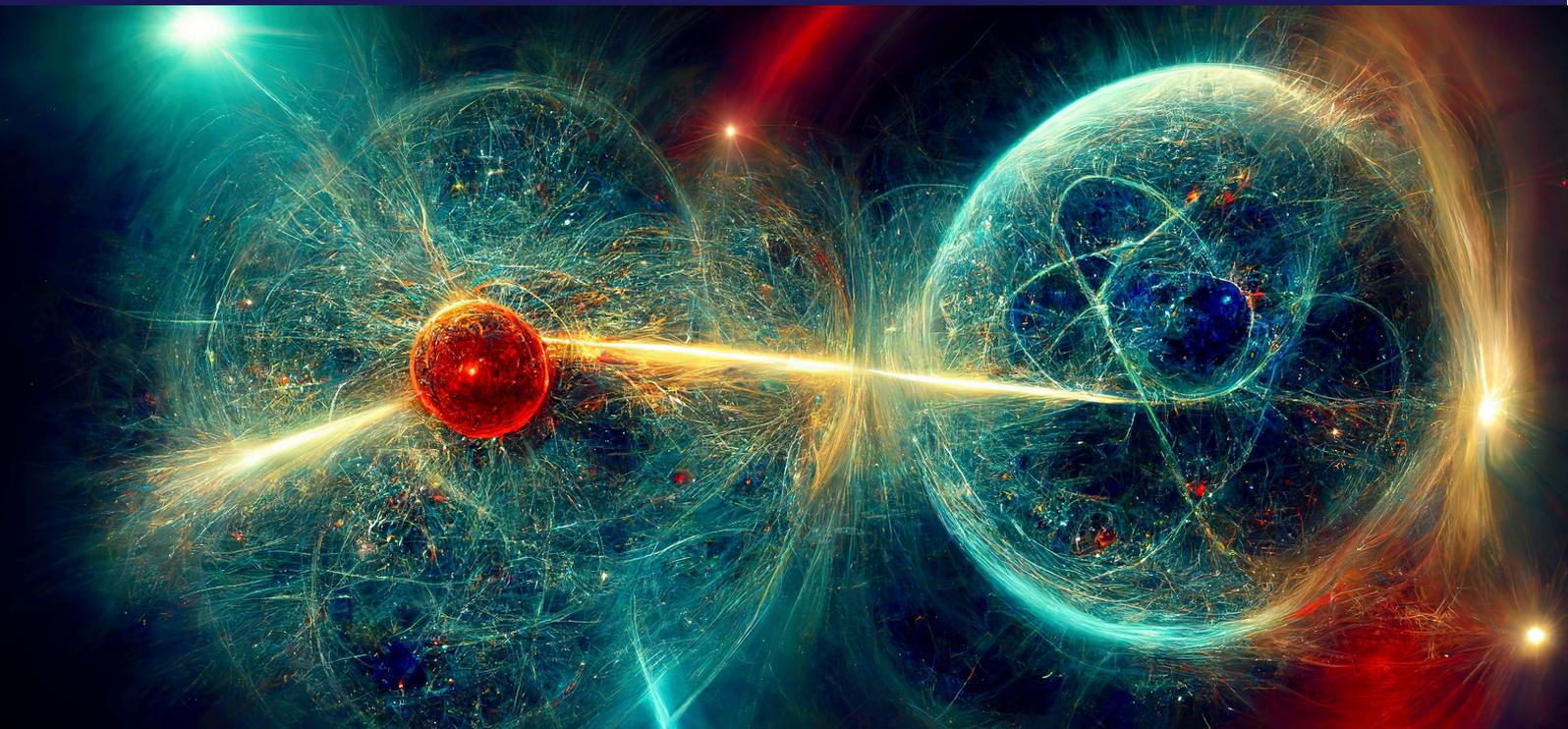
UBBStrategic Primul material, autorat de **dr. Radu Ionicioiu**, CS I al **Institutului Național de Fizică și Inginerie Nucleară „Horia Hulubei”** din București, director al proiectului, sintetizează participarea Universității noastre, în calitate de lider de parteneriat, în proiectul **„Elaborarea strategiei pentru dezvoltarea capacităților naționale în domeniul comunicațiilor cuantice (QTSTRAT)”**. În cadrul acestuia, împreună cu partenerul **Institutul Național de Fizica Materialelor din București**, UBB a elaborat și transmis beneficiarului, **Ministerul Cercetării, Inovării și Digitalizării**, prima strategie articulată pentru introducerea în practică a unei tehnologii cuantice emergente- în speță strategia pentru dezvoltarea sistemului național de comunicații cuantice.

UBBNovator UBB este și una dintre primele universități din România care întreprinde pașii necesari pentru a forma specialiștii în măsură să contribuie la dezvoltarea domeniului, introducând în oferta sa educativă cursuri de formare pe două piloane majore ale acestuia: comunicații cuantice și computere cuantice. Al doilea material- autor **conf. univ. Mihai Suciu (Facultatea de Matematică și Informatică a UBB)** - prezintă *Programul Postuniversitar Quantum Computing and Communication (Calcul cuantic și comunicații)* implementat în curriculum-ul **Universității Babeș-Bolyai** începând cu prezentul an universitar (2023-2024).

UBBFrontier Ca universitate de tip humboldtian, UBB desfășoară și o susținută activitate de cercetare. Materialul **prof. univ. Coriolan Tiușan (Facultatea de Fizică a UBB)** prezintă una dintre direcțiile de cercetare promițătoare în domeniul fizicii cuantice, direcție aprofundată de cercetătorii Universității noastre. Articolul se adresează atât specialiștilor cât și neofiților. El ilustrează perfect modul în care cercetarea fundamentală constituie premisa esențială a aplicațiilor practice; dar este și un exemplu despre cum cercetarea științifică devine, de la un anumit nivel, artă.

UBB TechTransfer Interviews Ultimul material reprezintă și un eveniment: interviul acordat de unul din cei mai titrați cercetători pe plan mondial în domeniul fizicii cuantice, **prof. univ. Tommaso Calarco**, inițiatorul **Quantum Flagship**, cu privire la provocările și perspectivele dezvoltării tehnologiilor cuantice, în România și în lume.

Vă dorim lectură plăcută!



Proiectul QTSTRAT la final

CS I dr. Radu Ionicioiu

**Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizică și Inginerie Nucleară
„Horia Hulubei” - București**

Proiectul QTSTRAT „Elaborarea strategiei pentru dezvoltarea capabilităților naționale în domeniul comunicațiilor cuantice” s-a încheiat prin conferința finală de prezentare a rezultatelor. Conferința a fost organizată de către liderul de proiect, Universitatea Babeș-Bolyai (UBB), și a avut loc în 30-31 octombrie 2023 în Cluj-Napoca.

În cadrul conferinței au fost prezentate rezultatele activității echipei de proiect, Strategia pentru dezvoltarea rețelei naționale de comunicații cuantice a României, precum și cele două documente-suport necesare implementării strategiei: (i) Masterplan și (ii) Roadmap.

Echipea de proiect a fost constituită din specialiști ai UBB și ai Institutului Național pentru Fizica Materialelor (INFM) București. Echipea a elaborat prima strategie națională de implementare a unei tehnologii cuantice în România, cea a comunicațiilor cuantice.

Provocări

Comunicațiile cuantice sunt tehnologii de suveranitate, esențiale atât pentru securitatea națională cât și a Uniunii Europene. Ca semnatară a Declarației EuroQCI, România trebuie să participe activ la dezvoltarea și implementarea infrastructurii europene de comunicații cuantice EuroQCI (European Quantum Communication Infrastructure). De asemenea, va contribui și la realizarea autonomiei tehnologice europene, printr-un efort coordonat la nivel național și corelat cu obiectivele europene.

Tranziția către comunicații cuantice este imperios necesară în perspectiva apariției computerelor cuantice. Un viitor computer cuantic va compromite securitatea comunicațiilor actuale care stau la baza economiei: internet, infrastructura critică, rețele 5G, online banking, semnături digitale etc. Astfel, la nivel mondial există o cursă (quantum race) de a trece la criptografia post-cuantică și la comunicații cuantice.

Viziune, misiune, obiective strategice

VIZIUNE (2040)

România va fi implicată activ în cea de-a doua revoluție cuantică, fiind o țară unde comunicațiile cuantice sunt utilizate și dezvoltate pentru a asigura securitatea națională, prosperitatea economică și bunăstarea socială.

Viziunea și misiunea sunt stabilite pentru un termen mai lung, însemnând orizontul 2040, în strânsă corelare cu obiectivele generale și tendințele existente, precum și bazat pe principalele probleme și provocări identificate cu implicarea actorilor relevanți.

Misiunea este strâns legată de viziunea menționată anterior, pe care o sprijină, precum și de atingerea obiectivelor generale strategice.

MISIUNE (2040)

Comunicațiile cuantice trebuie să fie asimilate, utilizate și dezvoltate printr-un efort comun al tuturor actorilor implicați, contribuind la securitatea națională, creșterea competitivității economice și crearea de valoare pentru societate.

Pentru atingerii viziunii sunt necesare patru obiective generale strategice (2023 - 2030):

OBIECTIVE STRATEGICE (2023 - 2030)

- 1. Cercetare: crearea unui ecosistem de cercetare performant, care contribuie în mod activ la dezvoltarea științifică și tehnologică în domeniul comunicațiilor cuantice și la atingerea unor rezultate de cercetare cu relevanță economică;**
- 2. Educație: dezvoltarea educației în domeniu și a unei forțe de muncă specializată în comunicații cuantice, precum și conștientizarea viitorilor utilizatori;**
- 3. Infrastructură: dezvoltarea infrastructurii naționale de comunicații cuantice interconectată la cea europeană EuroQCI, pentru a asigura securitatea datelor și informațiilor sensibile și protecția infrastructurilor critice și a serviciilor esențiale;**
- 4. Ecosistem industrial: dezvoltarea unei industrii de comunicații cuantice competitive.**

Fiecărui obiectiv general îi sunt subsumate o serie de obiective specifice și programe, precum și direcții de acțiune care contribuie la îndeplinirea viziunii.

S-a pornit de la premisa că România are specialiștii necesari pentru demararea unui efort consistent în domeniul comunicațiilor cuantice. Procesul de elaborare al strategiei a ținut seama de faptul că aceste tehnologii sunt de suveranitate națională. Ca atare, România trebuie: (a) să devină un producător și furnizor de echipamente în domeniu, capabilă să-și asigure necesarul propriu și să furnizeze eventualilor clienți soluții tehnologice în domeniu. De asemenea, strategia trebuie (b) să propună soluții de prevenire a unui brain-drain al specialiștilor formați pe plan intern. Este necesară punerea în aplicare a unui ecosistem CDI integrat cu industria de profil și beneficiarii tehnologiilor cuantice, care să permită atragerea și păstrarea cercetătorilor performanți.

În conturarea strategiei naționale în domeniu, echipa QTSTRAT și-a desfășurat activitatea impunându-și un imperativ: asigurarea participării active a comunității de profil, prin intermediul actorilor cheie (cercetători, autorități, specialiști în domeniu) în toate etapele realizării strategiei.

Elaborare

Rezultatul a fost atins la finalul unei activități susținute desfășurate timp de 24 de luni. Echipa proiectului a desfășurat o intensă muncă exploratorie, în multe cazuri de pionierat. Aceasta a presupus:

1. Cartarea ecosistemelor de cercetare, educație, industrial, autorități publice pentru identificarea specialiștilor care să poată sprijini procesul de elaborare a Strategiei naționale și a documentelor-suport aferente;
2. Maparea cât mai exhaustivă a ecosistemului industrial: actorii economici cu potențial de a furniza echipamente și servicii în domeniul cuantic;
3. Repertorierea potențialilor beneficiari ai tehnologiilor de comunicații cuantice: autorități și instituții publice, entități economice private, elemente ale sectorului de CDI.

După realizarea unei baze de date complexe incluzând entitățile de mai sus, s-a procedat la crearea a patru Grupuri de Lucru tematice: **Cercetare, Educație, Infrastructură și Ecosistem Industrial**. Au fost identificate 73 de entități posibil interesate de a participa în grupurile de lucru; 46 dintre ele au răspuns pozitiv demersurilor echipei de proiect.

Activitatea în cadrul proiectului s-a desfășurat pe mai multe paliere: discutarea și îmbunătățirea documentelor de lucru în urma consultării specialiștilor din Grupurile de Lucru; asigurarea unei cunoașteri cât mai granulare a domeniului și a actorilor săi; radiografierea problemelor concrete aferente domeniului; realizarea Strategiei și a documentelor suport pentru aceasta (Masterplan și Roadmap). Au fost realizate cercetări calitative, prin chestionare și interviuri cu principalii actori și personalități românești din domeniu. S-a realizat o schiță a contextului strategic european a

principalelor eforturi și direcții de acțiune la nivelul UE, precum și identificarea de surse europene de finanțare la nivel european. Ideile și documentele generate în proiect au fost dezbătute în workshop-uri, cu ocazia celor două conferințe organizate la Cluj. De asemenea, a fost inițiată o bursă de proiecte în domeniul tehnologiilor cuantice, axată pe tematica celor patru Grupuri de Lucru: proiecte cu relevanță în cercetare, educație, proiecte pentru industrie și proiecte de infrastructură.

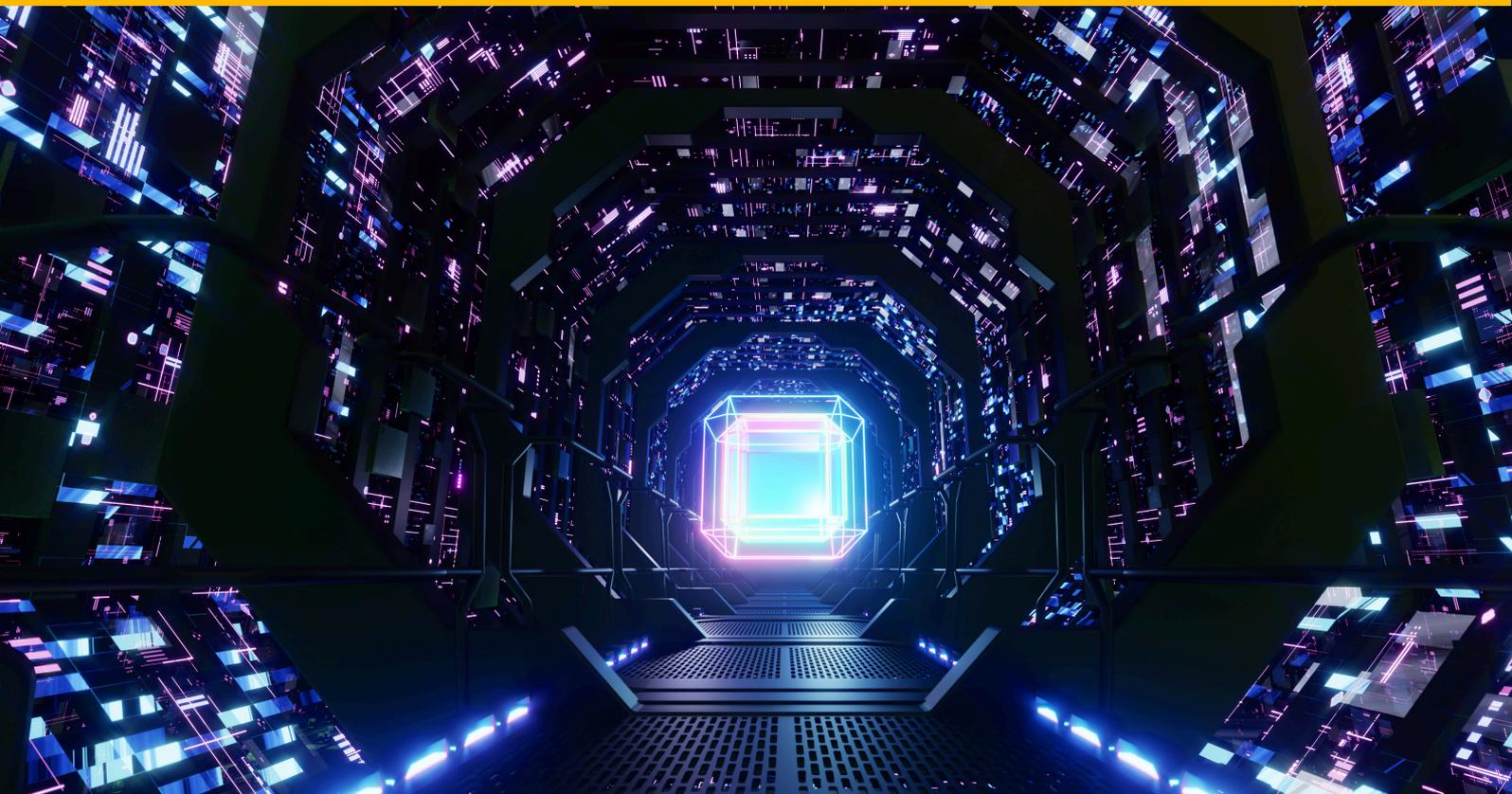
La finalul unei activități de doi ani, echipa proiectului a livrat Strategia pentru dezvoltarea capacităților naționale în domeniul comunicațiilor cuantice. Aceasta prevede un plan de acțiune, etapizarea pe faze concrete de realizare în timp, stabilește prioritățile în dezvoltarea sistemului național de comunicații cuantice, indicatorii de realizare, un sistem de monitorizare a îndeplinirii acestora, un blueprint al organizării efortului guvernamental în implementarea Strategiei, precum și un repertor al surselor de finanțare a implementării Strategiei.

Pentru o informare detaliată cu privire la proiect și tematica acestuia, cei interesați pot accesa site-ul proiectului QTSTRAT la link-ul: <https://qtstrat.granturi.ubbcluj.ro/>. Site-ul va rămâne un hub informațional în domeniul comunicațiilor cuantice și al tehnologiilor cuantice în general.

Update 1: Printr-o hotărâre din 8 decembrie 2023, Guvernul României a introdus tehnologiile cuantice în Planul Național de Cercetare, Dezvoltare, Inovare IV (PNCDI IV) ca tehnologii de importanță deosebită în contextul geopolitic actual, alături de tehnologii ca: securitate cibernetică, inteligență artificială, sistemele autonome.

Update 2: Proiectul QTSTRAT este menționat în Raportul pe 2023 al QuantERA dedicat politicilor publice în domeniul tehnologiilor cuantice în Europa. QuantERA este o rețea europeană a finanțatorilor publici în domeniul tehnologiilor cuantice, din care UEFISCDI face parte.

** Proiectul „Elaborarea strategiei pentru dezvoltarea capacităților naționale în domeniul comunicațiilor cuantice (QTSTRAT)” a fost implementat de către un consorțiu format din Universitatea Babeș-Bolyai Cluj-Napoca (UBB- coordonator) împreună cu Institutul Național pentru Fizica Materialelor (INFM București-partener), contract 2 PS / 11.11.2021, finanțator Ministerul Cercetării, Inovării și Digitalizării (MCID)*



Programul postuniversitar QUANTUM COMPUTING AND COMMUNICATION

Conf. univ. dr. Mihai Suciu, Facultatea de Matematică și Informatică

Introducere

Facultatea de Matematică și Informatică din cadrul Universității Babeș-Bolyai, în colaborare cu Facultatea de Fizică, organizează începând cu anul universitar 2023-2024, Programul Postuniversitar Quantum Computing and Communication (Calcul cuantic și comunicații), program cu predare în limba engleză.

Acest program este acreditat de către Ministerul Educației Naționale și este organizat pe baza legislației în vigoare și a Regulamentului Universității Babeș-Bolyai privind organizarea și funcționarea programelor postuniversitare de formare și dezvoltare continuă.

Programul reprezintă o oportunitate pentru persoanele care au obținut diploma de licență în domeniile informatică, matematică, fizică sau științe ingineresti și care doresc o inițiere în domeniul emergent al informaticii cuantice și al comunicațiilor cuantice, domenii care pe termen mediu și lung vor reforma industria informației și a comunicațiilor.

Cursanții vor lua parte la un program educațional de nivel înalt, oferit de cadre didactice de la Facultatea de Matematică și Informatică, de la Facultatea de Fizică alături de invitați externi de la institute de cercetare din domeniul informaticii cuantice.

După parcurgerea programului cursanții:

- Vor înțelege conceptele din mecanică cuantică (superpoziție, interferență, rolul măsurătorilor, teleportare cuantică, etc.) pe care informatică cuantică și comunicația cuantică este construită. Însușirea acestor concepte va fi ușurată prin experimente demonstrative și prin lucrări practice experimentale
- Vor înțelege modul de transmitere securizată a informației prin canale cuantice
- Vor avea abilități practice în manipularea și măsurarea stărilor cuantice a fotonilor (abilități necesare în construirea / folosirea canalelor cuantice de transmite a informației)
- Vor înțelege paradigma de programare prin circuite cuantice
- Vor fi capabili să construiască circuite cuantice pentru rezolvarea problemelor computaționale și vor fi capabili să ruleze aceste circuite pe calculatoare cuantice accesibile prin cloud
- Vor înțelege paradigma de programare „adiabatic quantum computing”
- Vor fi capabili să transforme probleme de optimizare multidimensională în probleme care pot fi rezolvate în cadrul paradigmei de programare „adiabatic quantum computing”
- Vor avea o privire de ansamblu asupra tehnologiilor actuale care sunt candidați viabili pentru realizarea practică a calculatoarelor cuantice

Durata programului de studiu este de 20 de săptămâni și se va desfășura pe o structură de 4 module, cu un cost total de 5000 RON. Numărul de locuri scoase la concurs pentru sesiunea de admitere: 100.

Planul de învățământ al Programului Postuniversitar Quantum Computing and Communication

Cursurile vor fi susținute la sfârșit de săptămână conform structurii anului universitar care va fi afișată la începutul acestuia pe site-ul facultății.

Modul 1

Introducere în matematica calculului cuantic
Introducere în optică și mecanică cuantică

Modul 2

Comunicații clasice și cuantice
Bazele calculului cuantic

Modul 3

Noțiuni avansate în calcul cuantic și tehnologii cuantice
Tehnologiile cuantice în tehnicile moderne de calcul al inteligenței artificiale

Modul 4

Proiect

Prezentarea cursurilor

Introducere în matematica calculului cuantic

Cursul își propune dobândirea (și/sau revizuirea) principalelor noțiuni matematice necesare în procesul de studiu al calculului cuantic. Pe parcursul cursului candidații vor aborda următoarele teme: noțiuni introductive, numere complexe, matrici și vectori, grupuri, algebră liniară, spații Hilbert.

Introducere în optică și mecanică cuantică

Obiectivul este dobândirea înțelegerii de bază asupra modului în care lumina se propagă în diferite medii de propagare. Înțelegerea conceptului stării de polarizare a luminii, înțelegerea principiilor de bază ale mecanicii cuantice. La absolvirea acestui curs studenții ar trebui să fie capabili să:

- prezică comportamentul fasciculelor de lumină în diferite medii de propagare,
- să măsoare și să manipuleze stările de polarizare ale luminii;
- să facă o distincție între comportamentul mecanic clasic și cel cuantic,
- să utilizeze setul de instrumente ale mecanicii cuantice pentru a descrie/modeliza sisteme microscopice,
- să combine seturile de instrumente ale opticii și mecanicii cuantice pentru a proiecta și executa experimente care testează conceptele fundamentale ale mecanicii cuantice.

Comunicații clasice și cuantice

Cursul prezintă algoritmilor utilizați în comunicare și criptografie dintr-o perspectivă clasică și cuantică.

Bazele calculului cuantic

Acest curs introduce noțiunile necesare calculului cuantic. Temele abordate în cadrul cursului sunt: qubiți, porți și circuite cuantice, phase kickback, Quantum Teleportation, introducere în algoritmi cuantici, transformata Fourier cuantică, algoritmul lui Grover, QML.

Noțiuni avansate în calcul cuantic și tehnologii cuantice

Cursul prezintă algoritmii utilizați și metode avansate utilizate în calculul cuantic.

Tehnologiile cuantice în tehnicile moderne de calcul al inteligenței artificiale

Obiectivul cursului este prezentarea dintr-o perspectivă cuantică a principalelor tehnici moderne de calcul. Astfel tematicile atinse sunt: materiale și dispozitive cuantice, clustering structure and quantum computing, quantum patern recognition, quantum classification, boosting and adiabatic quantum computing, quantum annealing etc.

Pentru informații suplimentare puteți contacta responsabilul programului, conf. univ. dr. Mihai SUCIU și Lect. univ. dr. Borbély Sándor la adresa de e-mail quantum.cs@ubbcluj.ro.

QUBITUL SKYRMIONIC: MATERIALE CUANTICE SI NANOSTRUCTURI CA ȘI PLATFORME PENTRU TEHNOLOGII CUANTICE

Coriolan Viorel TIUSAN^{1,2}

¹Departamentul de Fizica Stării Condensate și a Tehnologiilor Avansate, Facultatea de Fizică, Universitatea Babeș-Bolyai, Cluj-Napoca

²Centrul Național al Cercetării Științifice, Franța

Acum o sută de ani, fizica se afla în fața unei efervescente ideologice fără precedent. Temeliile lumii clasice, clădite pe o bază complet deterministă, încep să se „clatine” și, într-un proces de aproximativ 30 de ani, se clădește progresiv edificiul formal al fizicii cuantice [G30]. La construcția acestei „noi fizici” își aduc rând pe rând contribuția fizicieni de renume. *Max Planck* (premiu Nobel 1918) introduce conceptul de cuante în încercarea de a explica radiația emisă de corpurile incandescente. *Albert Einstein* (premiu Nobel 1921) readuce în scenă conceptul corpuscular al fotonului pentru explicarea efectului fotoelectric. *Niels Bohr* (premiul Nobel 1922) propune un model planetar al atomului și explică pe baza unor postulate spectrele discrete de emisie și absorbție ale atomilor, introduce principiul complementarității. *Louis de Broglie* (premiu Nobel 1929) postulează caracterul ondulatoriu al particulelor. *Werner Heisenberg* (premiu Nobel 1932) realizează prima formulare a mecanicii cuantice în formă matricială și introduce relațiile de incertitudine. *Erwin Schrödinger* (premiu Nobel 1933) propune o formulare ondulatorie a realității cuantice printr-o ecuație a undelor de probabilitate. *Max Born* (premiu Nobel 1954) introduce natura probabilistă a mecanicii cuantice. *Paul Dirac* (premiu Nobel 1933 împreună cu E. Schrödinger) unifică descrierea corpuscular-ondulatorie a luminii și dezvoltă mecanica cuantică relativistă. Conceptele aduse de această primă revoluție cuantică au permis toată dezvoltarea tehnologică pe care o cunoaștem astăzi, de la inventarea în 1956 a tranzistorului, la micro și nano-tehnologiile care par acum a fi integrate ireversibil cotidianului. Prima revoluție cuantică a contribuit însă și la dezvoltarea teoriei atomice care, într-un context politic favorizat de cel de-al doilea conflict mondial, a culminat cu dezvoltarea primei bombe atomice și ulterior a bombei cu hidrogen [OPP].

După aproape un secol, revoluția cuantică încă continuă. Prin interpretarea de la Copenhaga, *Bohr*, *Heisenberg* și *Born* prezintă realitatea cuantică într-un mod probabilistic, absolut contra-intuitiv viziunii clasice deterministe cu care eram obișnuiți. Un obiect cuantic există simultan în toate stările sale posibile și doar observația îl poate proiecta într-una dintre ele. Realitatea este determinată de măsurătoare, idee pe care însuși Einstein nu a reușit să o accepte până la sfârșitul existenței sale. El a avut o serie de „dispute” ideologice cu Bohr pe această temă, a propus existența unor „variabile ascunse” pe care mecanica cuantică, în opinia sa o teorie incompletă, nu le deține și care ar putea readuce realitatea fenomenelor cuantice în sfera determinismului [EPR]. În 1964, pe baza experimentului mental propus în 1935 de către *Einstein*, *Podolski* și *Rosen* pentru demonstrarea existenței variabilelor ascunse (paradoxul EPR), *John Steward Bell* formulează o inegalitate matematică pe care ar trebui să o satisfacă orice teorie a cărei ingrediente de bază sunt realitatea și localitatea [BEL]. Această inegalitate implica mărimi fizice măsurabile experimental și oferea posibilitatea testării experimentale a naturii locale-deterministe sau non-locale-probabilistice a realității cuantice. În 2022, premiul Nobel pentru fizică este decernat unui grup de trei cercetători: *Alain Aspect*, *John F. Klauser* și *Anton Zeilinger* pentru experimente efectuate care demonstrează violarea inegalităților lui Bell și demonstrează natura non-locală a realității dominate de fascinantul univers al fenomenelor de intercorelație cuantică (Eng. „entanglement”) [ZEL].

Astăzi, o nouă direcție științifică prinde contur din ce în ce mai clar sub forma celei de a doua revoluții cuantice [DRC] care are la bază manipularea informației cuantice. Noi domenii

de cercetare emergente se dezvoltă astăzi într-o efervescență oarecum similară cu cea care a condus la realizarea primei bombe atomice prin proiectul Manhattan. Criptografia și comunicațiile cuantice [CRY] sunt menite să securizeze schimbul de informație de orice tip la scară planetară atât în domeniul civil cât și militar. Conceptele privind teleportarea cuantică [TEL] avansează de asemenea. Metrologia cuantică [SQI] permite realizarea unor senzori ultrasensibili cu aplicații în detectarea unor câmpuri de intensitate extrem de mică, imagistică, radare, etc. Și nu în ultimul rând, manipularea informației cuantice conduce la o nouă paradigmă computațională ce converge înspre o provocare majoră privind realizarea calculatorului cuantic care ar exploata direct fenomenele cuantice în algoritmi pentru efectuarea calculelor și ar folosi proprietățile cuantice ale materiei, cum ar fi superpoziția cuantică a stărilor și inseparabilitatea lor, pentru a efectua operațiuni de date [SHO]. Prin conceptul de calculator cuantic modular, domeniul comunicațiilor cuantice și cel al calculului cuantic încep să se întrepătrundă.

Biți cuantici sau qubiți

În esență, elementul central al aplicațiilor bazate pe cea de a doua revoluție cuantică îl constituie exploatarea directă a fenomenelor de intercorelație cuantică sau „*entanglement*” și a conceptului de unitate cuantică a informație sau *qubit*. Spre deosebire de bitul clasic, ce permite stocarea informație doar în mod binar, $|0\rangle$ și $|1\rangle$, un *qubit* reprezintă o stare de superpoziție cuantică descrisă matematic printr-o funcție de undă $|\psi\rangle = \cos \frac{\theta}{2} |0\rangle + \sin \frac{\theta}{2} e^{i\varphi} |1\rangle$.

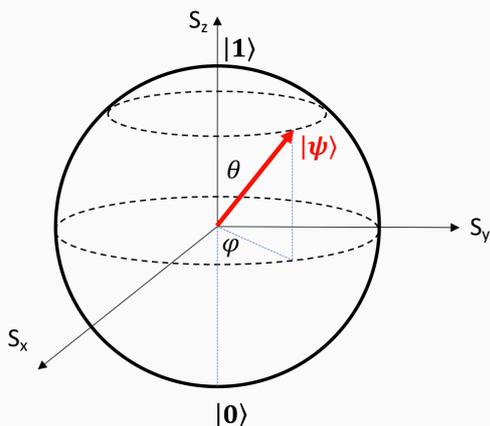


Fig. 1 Sfera Bloch. Fiecare punct de pe această sferă corespunde unei stări cuantice $|\psi\rangle$; în particular polii Sud și Nord corespund stărilor bazei formată din $|0\rangle$ și $|1\rangle$.

Fizic, aceasta corespunde unui sistem cuantic cu două nivele a cărui stare poate fi descrisă de un vector unitar ce se rotește de la polul Nord, corespunzător stării $|1\rangle$ la polul Sud, corespunzător stării $|0\rangle$ pe sfera Bloch, a cărei puncte pe suprafață corespund stării cuantice $|\psi\rangle$ (Fig. 1). Manipularea unor astfel de *qubiți* prin algoritmi specifici dedicați operațiunilor de date, reprezintă provocarea calculatoarelor cuantice care se estimează că ar putea rezolva cu o eficiență net superioară calculatoarelor clasice probleme complexe implicând fenomene de tip interferență, eșantionare statistică, optimizare și minimizare, logică inversabilă etc. Exploatarea conceptului de *qubit* în aplicații implică mai multe etape, deloc triviale, ce reprezintă încă provocări fundamentale și tehnologice în vederea realizării unui calculator cuantic. Ele privesc în special realizarea efectivă a unor *qubiți* stabili funcțional ce pot fi operați în mod fidel și manipulați ca și părți integrante a unor arhitecturi de porți logice care implică cuplaj (interacțiuni). Fidelitatea impune stabilitatea pe sfera Bloch a stării $|\psi\rangle$ care codează informația, în competiție cu factorii generatori de zgomot din mediul înconjurător *qubit*-ului ce cauzează fluctuații atât în amplitudine cât și în fază, conducând la decoerență și relaxare. Cercetări intense actuale privesc proiectarea *qubiților* pe baza a diferitor concepte. Pentru limitarea efectelor responsabile de decoerență și relaxare, la ora actuală utilizarea porților

logice cuantice impune condiții de temperatură criogenice, dificil de atins și care trebuie menținute cu un consum energetic semnificativ. În cele din urmă, implementarea practică tehnologică a *qubiților* implică în primul rând capacitatea de a fabrica materiale cuantice și nanostructuri aferente în care diversele concepte, tipuri și arhitecturi de *qubiți* să poată fi realizate, stabilizate, implementate și manipulate în condiții cât mai eficiente energetic, la temperaturi cât mai aproape de temperatura camerei.

Qubit-ul supraconductor

Una dintre abordările actuale în realizarea calculatorului cuantic are la bază utilizarea materialelor, dispozitivelor și circuitelor supraconductoare [SQU]. Ele permit realizarea unor *qubiți* în care informația poate fi codată prin *flux* (*qubit* de flux), *sarcină* (*qubit* de sarcină) respectiv *fază* (*qubit* de fază). Cele trei denumiri sunt direct corelate cu mărimea fizică pe a cărei cuantificare se bazează realizarea *qubitului* supraconductor respectiv. În continuare vom detalia succint doar qubitul de flux și cel de sarcină, aceștia găsimu-și echivalenți fideli în versiunea lor magnetică bazată pe skyrmioni.

Qubitul supraconductor de sarcină

Primul qubit supraconductor realizat în 1999 de către o echipă de cercetare din Japonia a fost qubitul de sarcină. Elementul central îl constituie o „insulă” subțire supraconductoare (Cooper-pair box), suficient de mică astfel încât energia electrostatică Coulombiană necesară plasării unei sarcini $2e$ la tensiune nulă, $E_C = (2e)^2/2C$ să fie mai mare decât energia termică $k_B T$ (la $T=1K$, aceasta implică o capacitate totală a insulei $C < 1fF$). Aceasta „cutie” care poate găzdui perechi Cooper este conectată la pământ printr-o capacitate C_g în serie cu un potențial V_g și o joncțiune Josephson a cărei energie E_J , ce caracterizează amplitudinea cuplajului prin joncțiune, este semnificativ inferioară energie electrostatice Coulombiene ($E_J \ll E_C$). Datorită conexiunii slabe cu mediul înconjurător, numărul de perechi Cooper din insulă va fi cuantificat. Stările qubit-ului corespund stărilor Cooper adiacente $|n\rangle$, $|n + 1\rangle$. Numărul de perechi Cooper din insulă (cutie) este controlat prin tensiunea de polarizare V_g . Tunelarea prin joncțiunea Josephson poate conduce la tranziții între stări corespunzătoare unor numere diferite de perechi Cooper. Aceasta combinație determină qubitul de sarcină.

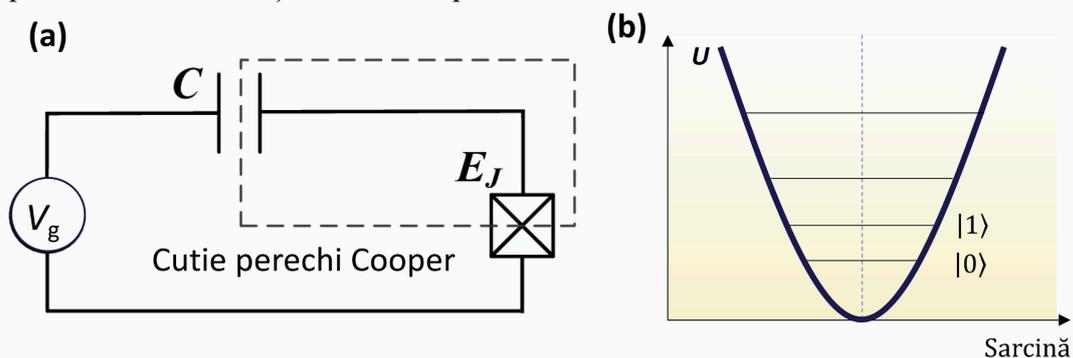


Fig. 2. (a) Reprezentare schematică a qubitului supraconductor de sarcină (b) Diagramă de energie corespunzătoare qubitului supraconductor de sarcină.

Qubit-ul supraconductor de flux

Un *qubit de flux*, constă într-o buclă supraconductoare (structurată prin tehnici de litografie), întreruptă local printr-o joncțiune de tip Josephson (Fig. 3). Cele două stări cuantice ale *qubit*-ului corespund fluxului magnetic ce străbate bucla cu orientare în sus $|\uparrow\rangle$ respectiv cu orientare în jos $|\downarrow\rangle$: $|\psi\rangle = \alpha|\uparrow\rangle \pm \beta|\downarrow\rangle$, sau în mod echivalent direcției orară/anti-orară a supracurentului I_q care străbate bucla (Fig.3(a)). Potențialul ce descrie qubit-ului de flux prezintă două minime (Fig. 3(b)) separate de o barieră δ . Fiecare minim corespunde uneia

dintre stările $|\uparrow\rangle$ și $|\downarrow\rangle$, clasic separate de bariera δ dar cuantic cuplate prin efect tunel: există o probabilitate diferită de zero ca starea sistemului să nu fie nici $|\uparrow\rangle$ nici $|\downarrow\rangle$, ci un amestec între acestea. Acest „cuplaj” prin efect tunel conduce la apariția unor stări proprii cuantificate $|0\rangle$, $|1\rangle$, ... $|n\rangle$,... pe care se bazează funcționarea qubitului de flux.

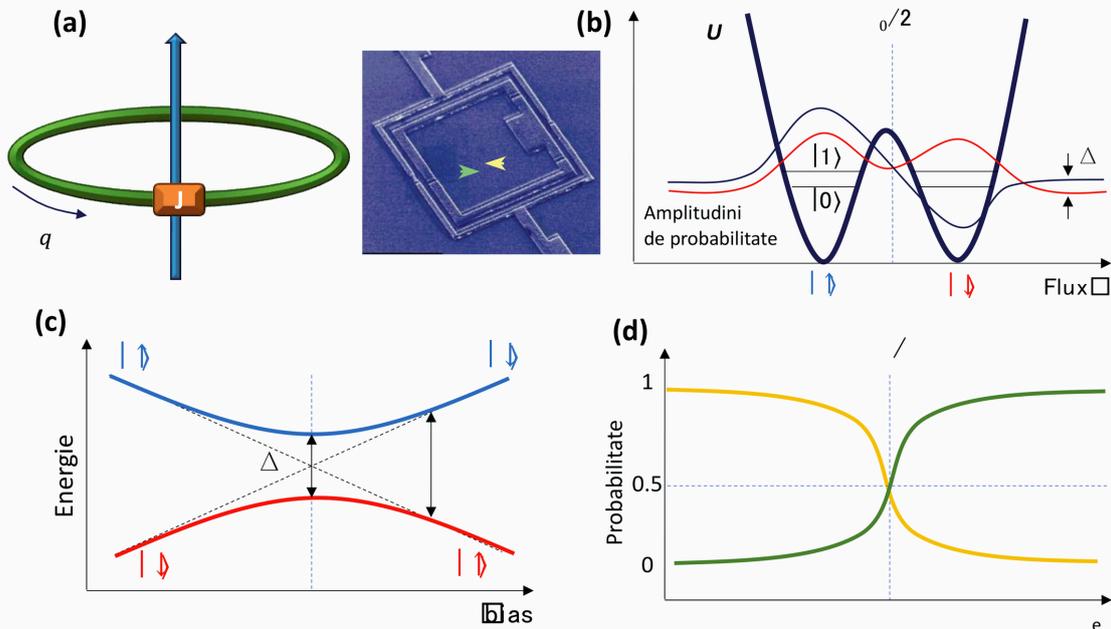


Fig. 3 (a) Qubit supraconductor de flux constituit dintr-o buclă supraconductoare (verde) întreruptă printr-o joncțiune Josephson (portocaliu). (b) Groapă dublă de potențial (negru) versus flux total ϕ conținut într-un qubit de flux. Potențialul, în general asimetric, devine simetric dacă fluxul magnetic extern aplicat este: $\phi_e = \left(n + \frac{1}{2}\right) \phi_0$, $\phi_0 = h/2e \approx 2.07 \cdot 10^{-15} \text{Tm}^2$ reprezintă *cuanta de flux*, aici $n=0$. Curbele colorate corespund densităților de probabilitate (stărilor proprii): stare fundamentală (simetrică)=curbă roșie, stare excitată (antisimetrică)=curba neagră subțire. (c) Energia E a stărilor de superpoziție reprezentate în **b** versus energia de bias $\varepsilon = 2I_q/(\phi_e - \frac{\phi_0}{2})$. Liniile punctate diagonale reprezintă energia clasică. Despicarea Δ în punctul de degenerare $\varepsilon = 0$ devine γ pentru $\varepsilon \neq 0$. (d) Probabilitatea ca fluxul qubitului să fie orientat în sus (verde) respectiv în jos (galben) în starea fundamentală, în funcție de fluxul magnetic ϕ_e aplicat.

Qubiți supraconductori: provocări și perspective

În ciuda ideii conceptual simple, realizarea experimentală a *qubiților* supraconductori reprezintă încă o provocare [CLA]. Buclele Josephson de dimensiuni nanometrice (pentru a asigura o self-capacitate de aproximativ 1pf) sunt realizate practic prin tehnici ce implică utilizarea litografiei electronice, manipularea *qubiților* și a porților logice aferente impun condiții de temperatură în gama mili-Kelvinului și un mediu de izolare a zgomotului ultra-performant. Aceste condiții extreme sunt realizate și menținute cu costuri energetice ridicate impuse de tehnologiile criogenice avansate ce trebuie implicate. În acest context, dincolo de optimizarea continuă a proprietăților materialelor utilizate, căutăm în continuare alte alternative și concepte care urmăresc realizarea unor *qubiți* operabili în condiții de temperatură superioare, cu reziliență la zgomot și mecanisme de decoerență și relaxare mai bine controlate în vederea creșterii stabilității, a timpului de viață și a temperaturii de operare efectivă.

Perspective în „Quantum Computing”

O primă fază în dezvoltarea calculatoarelor cuantice a fost marcată de o serie de provocări: realizarea unor qubiți funcționali și a unor porți logice cuantice, menținerea coerenței-deocamdată în condiții de exploatare criogenice, reducerea zgomotului, corectarea

erorilor pe diverse căi, inclusiv utilizarea de qubiți dedicați în acest scop, toate acestea într-o paradigmă în care competiția între diversele companii (IBM, Google, Microsoft, AWS, Intel etc.) urmărește creșterea continuă a numărului de qubiți dintr-un procesor. Astăzi, companiile trec la o schimbare de paradigmă: cursa pentru un număr cât mai mare de qubiți într-un procesor cuantic lasă treptat locul dezvoltării de inter-comunicare între cipuri [MIT]. După procesorul *Osprey* cu 433-qubiți (noiembrie 2021) și procesorul *Condor* cu 1121 qubiți (2023), IBM va trece la procesorul *Heron* care va avea doar 133 Qubiți. Acesta nu reprezintă însă un regres ci un salt calitativ, cu atât mai mult cu cât procesoarele *Heron* vor putea comunica între ele deschizând un nou orizont: cipurile cuantice singulare vor deschide progresiv calea spre calculatorul cuantic „modular”, alcătuit din mai multe procesoare cuantice interconectate. Calculatorul cuantic modular este însă abia la început, interconectarea în proiectul *Heron* se va face convențional, folosind circuite electronice clasice, informația cuantică nefiind astfel transferabilă de la un procesor la altul. Alături de provocările deja convenționale legate de reducerea zgomotului și de perfecționarea algoritmilor de corectare a erorilor, o provocare viitoare majoră va fi interconectarea coerentă, aproape sau la distanță, a procesoarelor cuantice modulare. Aceasta s-ar putea face prin rețele de fibre optice sau rețele sateliți cu repetitoare cuantice intercalate, la nevoie. Acesta este punctul în care domeniul comunicațiilor cuantice se va întrepătrunde cu cel al calculului cuantic, până recent, ele având o dezvoltare oarecum paralelă, cu un avans semnificativ pe zona de comunicații cuantice dezvoltată pe baza opticii cuantice. În această nouă paradigmă, a calculatorului cuantic modular, cercetările de avangardă privind noi concepte sau concepte alternative de qubiți care să funcționeze în condiții de zgomot cât mai redus la temperaturi cât mai departe de condițiile criogenice, să asigure o scalabilitate, interconectabilitate și adresabilitate superioare constituie încă provocări fundamentale și tehnologice majore.

Qubit-ul skyrmionic: o alternativă provocatoare recentă

Pe această linie se înscriu o serie restrânsă de rezultate teoretice, recent dezbătute în literatura de specialitate [PRL], [PRE], privind perspectiva unor qubiți ce au la bază o clasă specială de texturi magnetice la scară nanoscopică, și anume skyrmionii sau alte structuri solitonice chirale de tip meronic [MQB].

Un skyrmion magnetic, este o structură solitonice de tip vortex (Fig.4) ce poate fi stabilizată topologic într-o clasă specială de materiale inteligente a căror studiere constituie astăzi una dintre preocupările majore în fizica și tehnologia materialelor avansate cu proprietăți predefinite. Pe de altă parte, interesul skyrmionilor constă în posibilitatea codării și manipularii cu eficiență energetică extremă a informației atât în mod clasic cât și neuromorfic și cuantic. Rămânând în sfera aplicațiilor cuantice, un skyrmion poate coda informația în gradul cuantic de helicitate, unul dintre gradele de libertate internă a texturii solitonice alături de sarcina topologică și vorticitate [NAN]. Proprietățile fundamentale ale unui skyrmion magnetic sunt: *sarcina topologică* Q , *polarizarea* P , *vorticitatea* ω , *helicitatea* η . *Sarcina topologică* $Q = \frac{1}{4\pi} \int d^2x \vec{m} \cdot \left(\frac{d\vec{m}}{dx} \times \frac{d\vec{m}}{dy} \right)$ reprezintă numărul ce cuantifică de câte ori vectorul de spin se rotește cu o rotație completă (2π) la o deplasare completă pe sfera Bloch de la nord la nord; $Q=|1|$ pentru un skyrmion. *Polarizarea*, a cărei semn $P = \pm 1$ este definit de orientarea miezului (zonei centrale) a skyrmionului și este utilizată în aplicații legate de codarea clasică a informației, sub formă de biți $|0\rangle$ și $|1\rangle$. Morfologia unui skyrmion magnetic este determinată de două grade de libertate internă: *vorticitate (chiralitate)* și *helicitate*. Dacă folosim ca și reprezentare pentru centrul simetric al texturii fixată ca și origine, vectorul de spin ce descrie skyrmionul este : $\mathbf{S}(r, \phi) = (\sin \theta(r) \cos \phi(\varphi), \sin \theta(r) \sin \phi(\varphi), \cos \theta(r))$, $\theta = \theta(r)$ depinzând doar de r (distanța față de origine); $\phi = \omega\varphi + \eta$, ω reprezintă vorticitatea iar η helicitatea: pentru un skyrmion: $\omega=1$ și $\eta = 0$ sau π (skyrmion de tip Neel) respectiv $\eta =$

$-\pi/2$ sau $\pi/2$ (skyrmion de tip Bloch). Această reprezentare permite ilustrarea analogiei topologice între un skyrmion și un *qubit de helicitate*: proiecția stereografică a câmpului vectorial al magnetizării arată că stările de spin populează în întregime toată sfera Bloch.

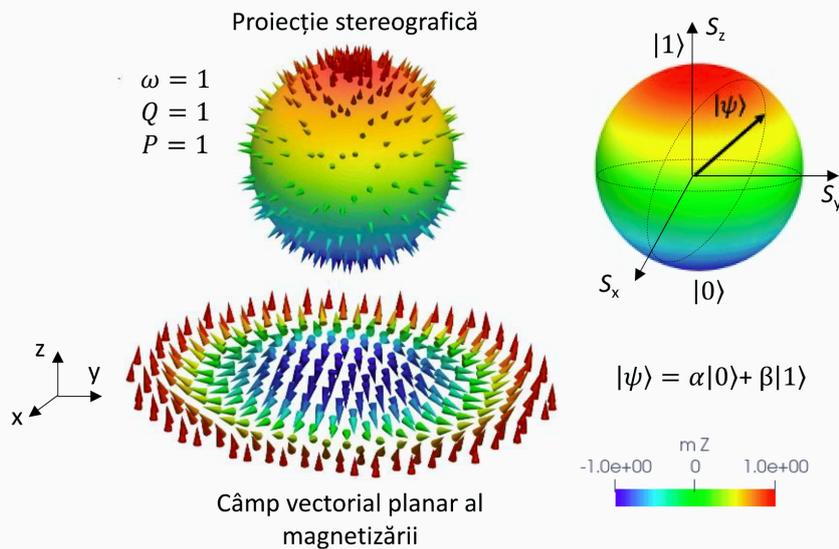


Fig. 4 Stânga: Reprezentare de tip „Hedgehog” – proiecție stereografică pe sfera Bloch – a câmpului vectorial al magnetizării unui skyrmion de tip Néel (jos -reprezentare planară vectorială în spațiul real). **Dreapta:** Sfera Bloch și qubit de helicitate, informația este codată prin superpoziția cuantică a stărilor $|0\rangle$: $m_z = +1$ și $|1\rangle$: $m_z = -1$: $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$.

Manipularea stărilor logice ale qubitului skyrmionic se poate realiza cu ajutorul unor câmpuri electrice și magnetice care oferă un câmp de operare larg cu un înalt grad de anarmonicitate.

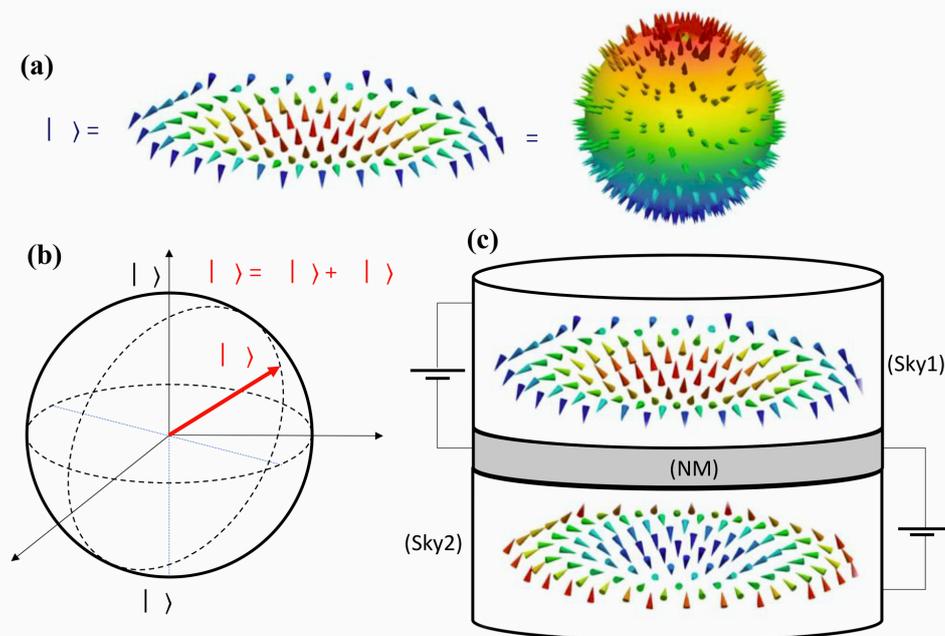


Fig. 5 (a) O stare cuantică $|\psi\rangle$ este o superpoziție cuantică arbitrară a unor configurații skyrmionice cu helicități distincte η . (b) Reprezentare pe sfera Bloch a stării $|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, cu $|0\rangle$ și $|1\rangle$ desemnând nivelele de energie cele mai joase ale operatorului cuantic \hat{H} . (c) Sistem antiferomagnetic artificial în care două filme subțiri care găzduiesc skyrmioni (Sky1) și (Sky2) sunt cuplate antiferomagnetic prin intermediul unui film separator nemagnetic (NM). Imagine adaptată după [PRL].

Mai mult, posibilitatea experimentală de a stabili structuri skyrmionice în arhitecturi magnetice multistrat cuplate antiferomagnetice permite obținerea unei scheme de cuplaj necesare implementării în porți logice cuantice (Fig. 5).

Qubitul skyrmionic are la bază cuantificarea nivelelor de energie corespunzătoare helicitații acestuia. Conform estimărilor teoretice, el ar putea avea avantaje în raport cu qubitul supraconductor relativ la aspecte ce privesc: scalabilitatea, posibilitatea de inițializare într-o stare arbitrară simplă, timpi superiori de decoerență (determinați de mecanismele de zgomot și relaxare a magnetizării ce pot fi controlate prin proprietățile materialelor skyrmionice), implementabilitate facilă în porți cuantice și capacitatea de a putea efectua măsurători specifice qubit-ului prin tehnici deja existente în spintronica convențională (ex. citirea stării magnetice folosind structuri de tip joncțiuni magnetice tunel, dispozitive deja existente în capetele de lectură ale hard-disk-urilor de densitate înaltă convenționale). Analitic, descrierea cuantică simplificată a qubitului skyrmionic are echivalenți fideli în cazul celor supraconductori și practic întreaga teorie dezvoltată pentru aceștia poate fi relativ simplu adaptată qubitului skyrmionic.

Qubitul skyrmionic de spin

În prezența unui câmp magnetic și a unui câmp electric uniforme perpendiculare la planul unui film subțire magnetic cu anizotropie uniaxială, skyrmionul este descris de un Hamiltonian de spin S_z de tipul: $H_{S_z} = \kappa(\hat{S}_z - \hbar/\kappa)^2 - E_z \cos \hat{\eta}$ are ca și echivalent pe cel al qubitului supraconductor de sarcină [QUS], pentru care κ desemna energia de încărcare, \hbar/κ „offsetul” de sarcină și E_z energia Josephson. Aici κ și \hbar desemnează anizotropia magnetică și cuplajul Zeeman cu un câmp magnetic extern (în unități reduse), $\hat{\eta}$ operator cuantic corespunzător helicitații. Textura de spin non-colineară a skyrmionului este cuplată cu un câmp electric extern $E_z \ll \kappa$ ce permite controlul stării cuantice skyrmionice (Fig. 6). Schematic, nivelele de energie cuantificate a acestui qubit sunt reprezentate în Fig. 6 (starea fundamentală și prima stare excitată).

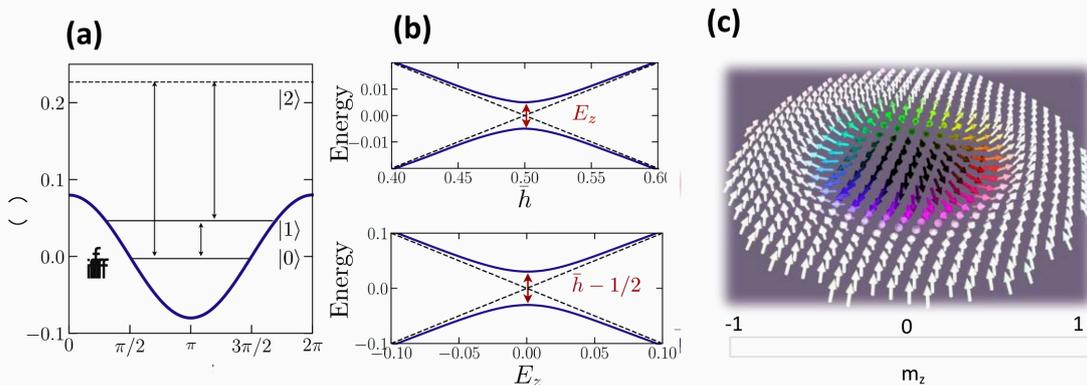


Fig. 6 Qubit de spin S_z . (a) Profil de potențial și nivele de energie non-echidistante. Stările qubitului reprezentate sunt starea fundamentală $|0\rangle$ și stările excitate $|1\rangle$ și $|2\rangle$. (b) Diagrame de energie; degenerarea în punctul de încrucișare clasic este ridicată prin aplicarea unui câmp electric E_z sau magnetic $\hbar > 1/2$. În punctul de degenerare, stările proprii de energie sunt suprapuneri simetrice și antisimetrice ale stărilor qubitului skyrmionic: $1/\sqrt{2}(|0\rangle + |1\rangle)$. (c) Skyrmion magnetic de tip Néel stabilizat în nanodisc circular. – Adaptat după [PRL].

Qubitul skyrmionic de helicitate este fidel inspirat din qubitul supraconductor de flux care are la bază un model energetic de tip groapă de potențial dublă, de data aceasta asociată helicitații η . Pentru implementarea experimentală a conceptului este nevoie de utilizarea unui material magnetic skyrmionic sub formă de film subțire care să aibă o anizotropie în planul

filmului κ_x și un profil spațial al skyrmionului de tip eliptic ce poate fi obținut prin ingineria defectelor.

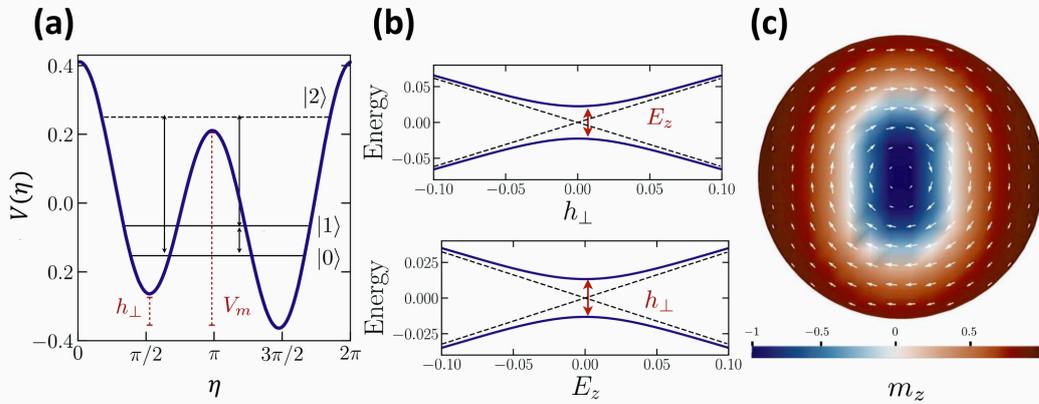


Fig. 7 (a) Qubit de helicitate. Profil de potențial de tip groapă dublă de potențial și nivele de energie non-echidistante. Stările cuantificate reprezentate ale qubitului sunt starea fundamentală $|0\rangle$ și stările excitate $|1\rangle$ și $|2\rangle$. Bariera de potențial V_m este controlată de către E_z iar asimetria profunzimii gropilor de către h_{\perp} . **(b)** Diagrame de energie; degenerarea în punctul de încrucișare clasic este ridicată prin aplicarea unui câmp electric E_z (panou superior) sau gradient de câmp magnetic (panou inferior). **(c)** Skyrmion magnetic cu profil eliptic stabilizat în nanodisc prin defecte; profilul eliptic este esențial pentru realizarea unui profil de potențial de tip groapă dublă. Adaptat după [PRL].

Hamiltonianul acestui tip de qubit este descris de ecuația: $\mathbf{H}_{\eta} = \kappa \hat{\mathbf{S}}_z - h_{\perp} \hat{\mathbf{S}}_z + V(\hat{\boldsymbol{\eta}})$, unde $V(\hat{\boldsymbol{\eta}})$ reprezintă un potențial cu două minime descris de ecuația:

$V(\hat{\boldsymbol{\eta}}) = k_x \cos 2\hat{\boldsymbol{\eta}} - E_z \cos \hat{\boldsymbol{\eta}} + h_{\perp} \sin \hat{\boldsymbol{\eta}}$; în care primii doi termeni determină un potențial simetric iar al treilea descrie diferența de adâncime între gropi ce poate fi realizată prin aplicarea unui câmp magnetic perpendicular h_{\perp} ; vezi Fig. 7 ce ilustrează schematic proprietățile unui qubit skyrmionic de helicitate. Studii teoretice de ultimă oră [PRE] ilustrează posibilitatea realizării unui computer skyrmionic universal bazat pe qubiți de helicitate nanometrici stabilizați în sisteme de tip magneți frustrați în care skyrmioni de tip Bloch dublu degenerați sunt favorizați energetic de interacțiunea dipol-dipol magnetic.

Controlul qubit-ului skyrmionic în vederea implementării calculului cuantice implică manipularea gradelor de libertate cuantice interne ale acestuia. Aceasta se poate face prin aplicarea unor câmpuri externe (electric, magnetic sau combinat). În literatură, au fost deja propuse scheme de manipulare posibile. Una dintre ele [PRL] este bazată pe aplicarea unui câmp de microunde ce implică matematic adăugarea în Hamiltonianul qubitului skyrmionic a unui termen suplimentar: $\mathbf{H}_{ext}(t) = \mathbf{b}f(t) \cos(\omega t + \phi_{ext}) \cos \hat{\boldsymbol{\eta}}$ cu $f(t)$ o funcție dependentă de timp. O altă schemă alternativă de manipulare deja discutată în literatură, pe care am analizat-o la rândul nostru din punct de vedere teoretic, presupune controlul proprietăților magnetice în nanostructuri prin aplicarea unor câmpuri electrice perpendiculare care modulează anizotropia perpendiculară a discului [VCM].

Scheme de cuplaj între qubiți

O componentă esențială a filozofiei realizării unui calculator cuantic scalabil o reprezintă interacțiunea între mai mulți qubiți. O opțiune absolut abordabilă experimental constă în exploatarea interacțiunilor antiferomagnetice ce apare în arhitecturi magnetice multistrat în care două filme magnetice sunt separate de un film nemagnetic cu grosime judicios aleasă sau în materiale ferimagnetice. Analitic, termenul de interacțiune este de tip: $F_{int} = J_{int} \int \mathbf{m}_1 \cdot \mathbf{m}_2$ sau, în raport cu helicitatea: $H_{int} = -J_{int} \cos(\eta_1 - \eta_2)$. Intensitatea cuplajului

J_{int} poate fi experimental controlată prin proprietățile intrinseci ale materialelor magnetice, grosimea stratului nemagnetic într-o arhitectura multistrat (Fig. 5). Manipularea propriu-zisă a qubitului poate fi realizată prin „stimulii” externi asociați câmpurilor magnetice h , E_z , h_z ce permit manipularea interacțiunilor atât longitudinale cât și transversale necesare, de exemplu, implementării unei scheme de tip „quantum annealing” [QUA].

Zgomot și decoerență

În cazul qubitului skyrmionic, acestea sunt determinate de interacțiunea cu gradele de libertate ale vecinătății acestuia. Trebuie luate în considerare efectele termice, ce pot fi modelate sub forma unui câmp termic în regim de fluctuații statistice aleatorii, diverse mecanisme de relaxare de spin în nanostructurile reale, etc. O modalitate teoretică simplă ce poate fi utilizată în descrierea acestor aspecte dinamice are la bază introducerea în Hamiltonianul qubitului a unor termeni ce descriu forțe fluctuante aleatorii ξ_i ce pot determina zgomot în helicitate și spin S_z , și anume: $\hat{H} \rightarrow \hat{H} + \xi_\eta \hat{\eta} + \xi_{S_z} \hat{S}_z$ cu o distribuție și origine fenomenologică ce pot fi introduse în calcule sub forma unor parametri corelați cu mecanisme și proprietăți de material controlabile experimental. În cele din urmă, mecanisme care determină zgomotul și coerența vor controla timpul de viață al qubitului.

Calcul teoretic preliminar [PRL], dezvoltat într-un model cuantic analitic, arată că acesta poate fi adus în gama microsecundelor, pentru a asigura compatibilitatea cu schemele de citire convențional disponibile, însă în condiții încă criogenice de exploatare a qubitului skyrmionic. Totuși, modelul cuantic folosit în studiul fenomenelor de decoerență și relaxare (descriș mai sus) este relativ simplu și eventual poate să conducă la rezultate cantitativ diferite de realitate. El este construit pe baza unui model de tip Hamiltonian Heisenberg cu interacțiuni în competiție [LIN] care nu ia în considerare în mod explicit interacțiunea Dzyaloshinskii-Moriya (DMI) în competiție cu anizotropia perpendiculară și energia demagnetizantă în structuri nanoscopice realiste de dimensiuni nanometrice, principalii promotori ai configurațiilor skyrmionice în arhitecturi convenționale de filme subțiri. Mai mult, în arhitecturi de filme subțiri ingenios proiectate, intensitatea interacțiunii de schimb asimetric DMI care controlează stabilitatea și dimensiunea skyrmionului poate fi net amplificată prin efecte aditive legate de interfețe [LUC] ceea ce permite astăzi stabilizarea unor structuri skyrmionice la temperatura camerei.

Pentru a răspunde provocărilor teoretice ridicate de această problemă, o direcție importantă de cercetare dezvoltată în grupul nostru privește studiul influenței proprietăților magnetice ale materialelor skyrmionice: amortizarea Gilbert, intensitatea interacțiunilor de schimb asimetric Dzyaloshinskii-Moriya, anizotropia magnetică perpendiculară (PMA) și magnetizarea la saturație, în filme subțiri magnetice, asupra stabilizării skyrmionilor în nanostructuri de dimensiuni variabile. În vederea aplicațiilor cuantice, studiile derulate adresează și mecanismele de relaxare și decoerență a qubiților skyrmionici. Dată fiind complexitatea problemei, abordarea noastră se face într-un cadru multiscale, implicând iterativ calcule cuantice analitice, calcule *ab-initio* de structură electronică în solid folosind teoria funcționalei de densitate (DFT), respectiv calcule micromagnetice.

Materiale cuantice și nanostructuri ca și platforme pentru qubiți skyrmionici

În ciuda simplității analitice și transparenței fenomenologice a modelelor cuantice, ele nu pot să descrie cantitativ corect complexitatea aspectelor legate de stabilizarea și stabilitatea skyrmionilor în nanostructuri ce pot fi realizate experimental. În acest scop, o abordare *multi-scale* este absolut necesară. Modelarea micromagnetică a ansamblului de spini care constituie un skyrmion poate aduce elemente suplimentare în analiza proprietăților și stabilității acestora în nanostructuri cu geometrii și dimensiuni predefinite. În plus, în modelul micromagnetic se pot introduce, sub formă de variabile, parametri magnetici critici sus-menționați ai materialului

skyrmionic, temperatura, sub forma unui câmp termic efectiv aleatoriu etc. Proprietățile critice de material pot fi introduse fie ca și parametri variabili, fie, pentru o arhitectură de material skyrmionic particulară, extrase din calcule *ab-initio* de structură electronică, în baza teoriei funcționalei de densitate (DFT). Această ultimă abordare permite analiza fenomenologică a mecanismelor fizice responsabile de proprietatea calculată: anizotropia magnetică perpendiculară (PMA), intensitatea interacțiunilor de schimb asimetric Dzyaloshinskii-Moriya, magnetizarea la saturație, dependența PMA și DMI cu câmpul electric ce poate controla starea skyrmionică și implicit qubitul de helicitate.

Calcululele micromagnetice implică determinarea configurației de echilibru a unui ansamblu de spini care verifică ecuația dinamică Landau-Lifshitz-Gilbert:

$$\frac{d\mathbf{m}}{dt} = -\frac{\gamma}{1+\alpha^2} (\mathbf{m} \times \mathbf{B}_{eff}) - \frac{\alpha\gamma}{1+\alpha^2} [\mathbf{m} \times (\mathbf{m} \times \mathbf{B}_{eff})],$$

în care \mathbf{B}_{eff} reprezintă un câmp efectiv, α parametrul de amortizare Gilbert, γ este factorul giromagnetic (1.75×10^7 s Oe⁻¹) și μ_0 permeabilitatea vidului ($4\pi \times 10^{-7}$ F/m). Câmpul efectiv se calculează ca și derivată funcțională a energiei libere magnetice $E[\mathbf{m},t]$ a sistemului ce poate fi construită incluzând diverse contribuții: energia Zeeman de interacțiune a spinilor cu câmpul magnetic extern, energii de anizotropie, interacțiuni de schimb simetric și asimetric, $\mathbf{B}_{eff} = -\frac{1}{M_s} \frac{\partial E}{\partial \mathbf{m}}$, efecte de transfer de spin/relaxare, temperatura sub forma unui câmp termic aleatoriu, etc.

Tehnicile și infrastructura de care dispunem la ora actuală în grupul nostru de cercetare ne permit relativ ușor exploatarea resurselor de calcul paralel atât GPU (peste 6000 nuclee) cât și CPU (peste 150 nuclee) și pot fi completate alte resursele disponibile în cadrul universității Babeș-Bolyai [MAT]. În problematica pe care o adresăm, capacitatea de calcul paralel reduce în mod semnificativ timpul de calcul al unor diagrame de fază predictive din care se pot extrage parametri critici de material necesari stabilizării unor configurații skyrmionice în nanostructuri magnetice experimental realizabile (Fig. 8) și care ulterior pot fi utilizate ca și qubiți.

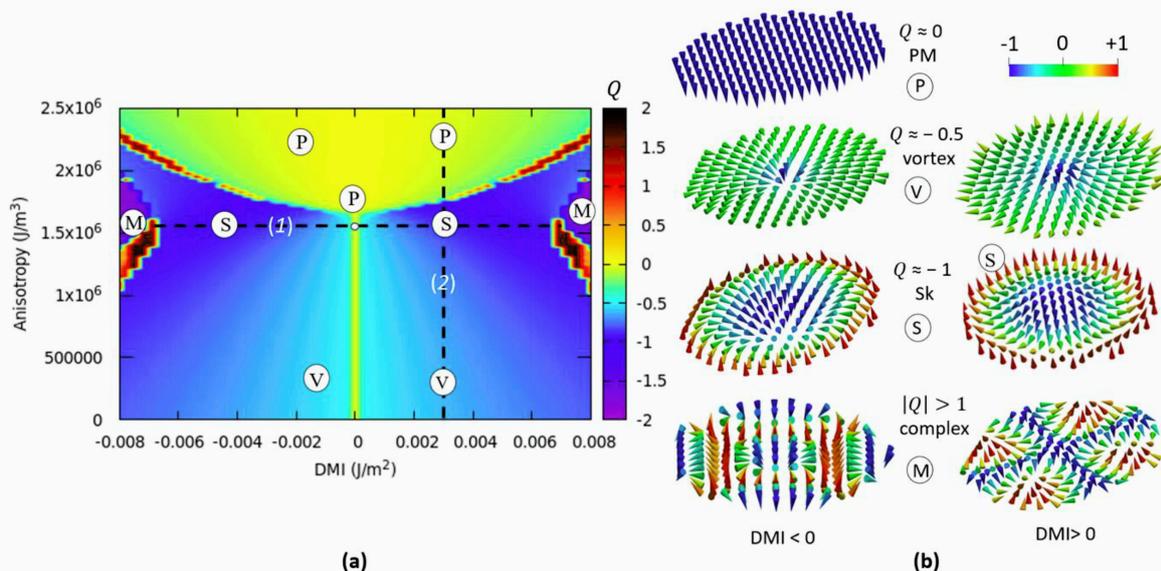


Fig. 8 (a) Diagrama stării fundamentale *DMI-PMA-Q* (disc circular de 90 nm) în care stările micromagnetice sunt clasificate după sarcina lor topologică *Q*. **(b)** Configurații micromagnetice (reprezentare în câmp vectorial) corespunzătoare zonelor alese din diagrama de fază: (P) = stări magnetizate perpendicular (PM), (V) = stări de tip vortex magnetic ($Q \approx -0,5$), (S) = stări magnetice skyrmionice ($Q \approx -1$), (M) = stări magnetice chirale complexe cu $|Q| > 1$ pentru diferite structuri chirale de vorticitate, determinate de semnul DMI. Parametri fiși introduși în simulare sunt magnetizarea la saturație $M_s=1714$ kA/m, energia de schimb direct $A_{ex}=2.1 \times 10^{+11}$ J/m și amortizarea Gilbert $\alpha = 0.01$, specifice unui film subțire de fier într-o secvență multistrat de tip Au/Fe/MgO.

Calculul unor astfel de diagrame predictive, înainte de fabricarea propriu-zisă a materialelor, reprezintă un pas extrem de important, orientându-ne exact în zona utilă de proprietăți pe care trebuie să le țintim pentru a putea stabili skyrmionii în nanostructurile fabricate pornind de la aceste materiale. Aceasta poate să fie în mod particular util atunci când se elaborează și se studiază un nou material cu potențial skyrmionic.

În Fig. 9 sintetizăm rezultatul unei analize „multiscale” pe un compus ferimagnetic cu potențial skyrmionic, recent elaborat și studiat în grupul nostru: DyCo₃. Interacțiunile antiferomagnetice interne în acest compus conduc la skyrmioni cuplați antiferomagnetic și implicit țintesc înspre acea schemă de cuplaj între qubiții skyrmionici necesară implementării unor porți cuantice. Măsurătorile magnetice (Fig. 9(a)) sunt confruntate cu simulările *ab-initio* pe baza tehnicilor DFT (Fig. 9(b), (c)) care permit cuantificarea unor proprietăți magnetice: momente magnetice atomice, magnetizare la saturatie, anizotropie magnetică perpendiculară, proprietăți ce pot fi ulterior introduse în simulările de diagrame skyrmionice (Fig.9(d)) în vederea identificării proprietăților de material optime ce permit generarea unor configurații skyrmionice în nanostructuri ce pot fi structurate litografic de dimensiuni predefinite.

Dincolo de acest caracter predictiv, calculele micromagnetice ne permit simularea precisă a posibilității de manipulare a skyrmionilor prin stimuli externi (câmp electric, magnetic) și ne oferă condițiile în care aceștia pot fi generați în nanostructuri prin curenți de spin injectați perpendicular, (Fig. 10).

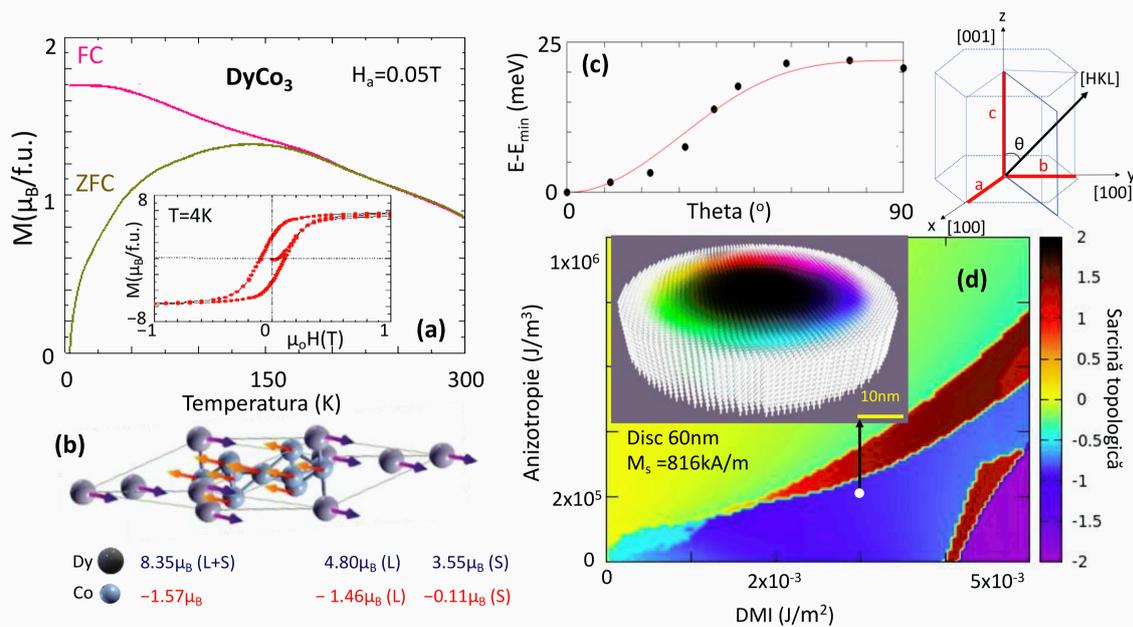


Fig. 9 (a) Curbe de magnetizare *Field Cooled-Zero-field cooled* (FC-ZFC) și M-H **(b)** Model de celulă primitivă utilizat în calculele *ab-initio* DFT, săgețile indică orientarea momentelor magnetice atomice (contribuțiile de spin și orbitale sunt distinct calculate) în baza unei scheme relativiste. **(c)** Variația energie totale în raport cu unghiul pe care magnetizarea îl face cu direcția [100] indică faptul că axa de ușoară magnetizare în DyCo₃ este paralelă cu axa hexagonală c ($\theta = 0$). **(d)** Diagramă de fază simulată micromagnetic, folosind proprietăți magnetice (M_s, PMA, DMI) extrase din calculele *ab-initio* DFT.

De asemenea, extrem de util pentru aplicații, ele pot descrie și influența temperaturii asupra stabilității skyrmionului și implicit a qubitului aferent (Fig. 11). Completate cu modele teoretice care includ mecanismele de relaxare și zgomot responsabile de coerența qubitului skyrmionic și a timpului său de viață, aceste calcule ne pot orienta înspre direcțiile pe care trebuie să le urmărim experimental pentru ca acest concept de qubit skyrmionic să își demonstreze eventual superioritatea, teoretic prezisă, în raport cu analogul său supraconductor.

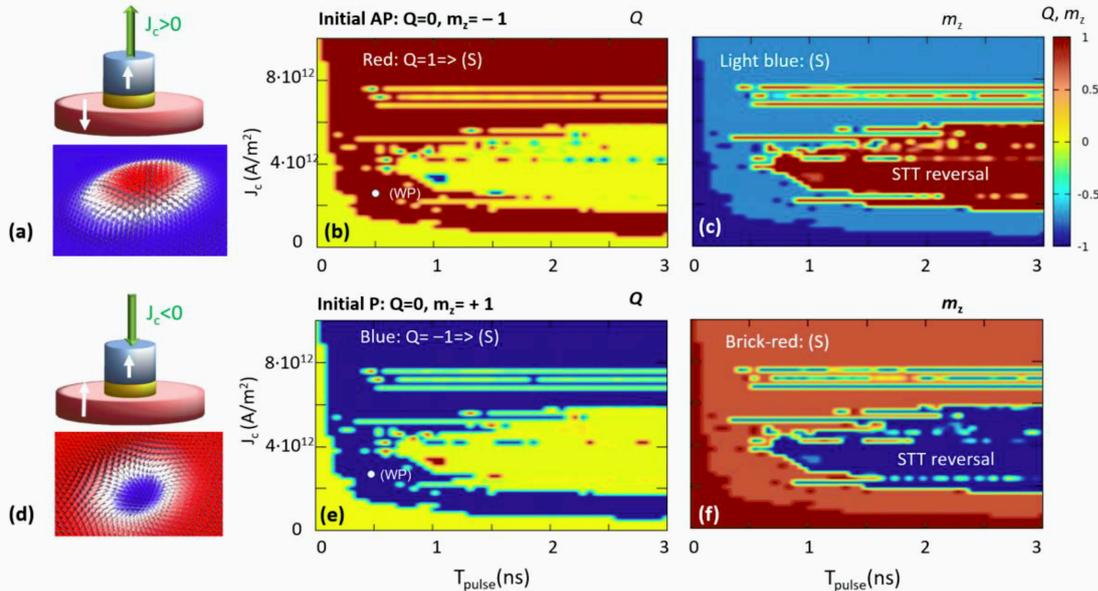


Fig. 10 (a), (d) Geometrie de simulare realistă de tip joncțiune tunel magnetică și câmpul vectorial al magnetizării stării skyrmionice finale utilizată pentru scrierea skyrmionului în nanodiscuri prin efecte de transfer de spin (STT) a unui puls de curent de sarcină J_c polarizat în spin și injectat prin efect tunel. Diagrame de fază $T_{pulse}-J_c-Q$ și $T_{pulse}-J_c-m_z$, pornind fie de la o stare inițială antiparalelă (AP) (b) și (c) sau paralelă (P) (e) și (f) a joncțiunii tunel magnetice.

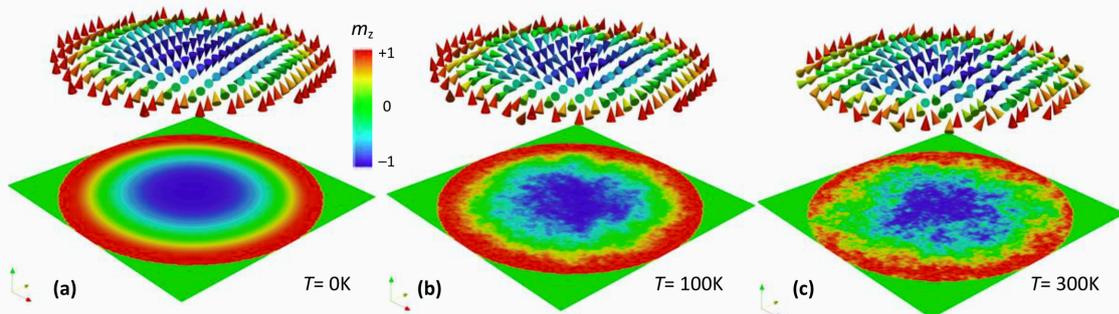


Fig. 11 Stări skyrmionice simulate micromagnetic în nanodiscuri cu diametru de 90nm, la diferite temperaturi: (a) $T = 0K$, (b) $T = 100 K$ (c) $T = 300K$. *Panou superior*: reprezentare a câmpului vectorial al magnetizării; *panou inferior*: reprezentare a câmpului scalar corespunzător valorii magnetizării m_z . Simulările corespund unor parametri magnetici (de material), compatibili cu date experimentale. Se observă faptul că starea skyrmionică persistă încă la $T=300K$, însă simulările arată că puțin peste această temperatură câmpul termic conduce la „ștergerea” skyrmionului. În esență, simulările de acest tip cu parametri variabili permit identificarea mecanismelor și parametrilor de material responsabili de creșterea stabilității termice în vederea aplicațiilor urmărite.

Aceste direcții de cercetare reprezintă nucleul central al proiectelor de cercetare pe care noi le derulăm în momentul de față [MOD] și al celor în perspectivă [FER], în cadrul grupului pe care îl coordonez: *Nanomagnetism și Spintronică* [NMS]. Reiterăm și cu această ocazie faptul că derularea unor astfel de activități de cercetare cu puternic caracter exploratoriu și fundamental printr-o paradigmă de tip *bottom-up*, reprezintă motorul avansării tehnologice și științifice a domeniilor de cercetare emergente. Resursele existente de cercetare și dezvoltare ale Facultății de Fizică a Universității Babeș-Bolyai vor trebui în continuare extinse pentru a rămâne în fază cu dezvoltarea domeniului de nișă al tehnologiilor cuantice, abordat de noi prin prisma Spintronicii cuantice și neuromorfe bazată pe materiale cuantice cu proprietăți predefinite. Vor trebui continuate eforturile de extindere a infrastructurii de cercetare prin

dotări suplimentare cu echipamente specifice dedicate elaborării și caracterizării materialelor cuantice de generație avansată precum și micro/nano tehnologiilor. De asemenea, pe plan educațional, dezvoltarea teoretică și experimentală a tehnologiilor cuantice la Facultatea de Fizică rămâne un imperativ. Ea va permite studenților, masteranzi, doctoranzi și celor de la studii post-universitare din cadrul programului UBB „*Calcul cuantic și comunicații*”, să dobândească competențe funcționale specifice și înaltă calificare în domeniul tehnologiilor avansate orientate pe direcțiile actuale de specializare inteligentă din care tehnologiile cuantice sunt parte integrantă.

Referințe bibliografice

[G30] George Gamow, *Thirty Years that Shook Physics: The Story of Quantum Theory*, ISBN-13: 978-0486248950, **Dover Publications** (1985).

[OPP] Martin J. Sherwin, *American Prometheus*, ISBN 183895970X, **Atlantic Books** (2023); Robert Jungk, *Brighter than a thousand suns: a personal history of the atomic scientists*, ISBN 978-0-15-614150-5, **Houghton Mifflin Harcourt** (1958).

[EPR] Einstein, A; B Podolsky; N Rosen, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?*, **Physical Review** 47 (10): 777–780 (1935). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.47.777>.

[BEL] Bell, J. S. , *On the Einstein Podolsky Rosen Paradox*, **Physics** 1 (3): 195–200 (1964), <https://doi.org/10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.1.195>; Bell, John S. (1987), *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, ISBN 9780521368698, **Cambridge University Press** (1987).

[ZEL] Anton Zeilinger, *Dance of the Photons: From Einstein to Quantum Teleportation*, **Penguin Books Ltd**, ISBN: 9781802063684 (2023).

[DRC] Dowling J. P. and Milburn G. J., *Quantum technology: the second quantum revolution*, **Phil. Trans. R. Soc. A** 3611655–1674 (2003), <http://doi.org/10.1098/rsta.2003.1227>.

[CRY] Thomas Jennewein, Christoph Simon, Gregor Weihs, Harald Weinfurter, and Anton Zeilinger, *Quantum Cryptography with Entangled Photons*, **Phys. Rev. Lett.** 84, 4729 (2000) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.4729>.

[SQI] Giovannetti, V., Lloyd, S. & Maccone, L. *Advances in quantum metrology*, **Nature Photon** 5, 222–229 (2011). <https://doi.org/10.1038/nphoton.2011.35>.

[TEL] Bouwmeester, D., Pan, JW., Mattle, K. et al. *Experimental quantum teleportation*, **Nature** 390, 575–579 (1997). <https://doi.org/10.1038/37539>; Thomas Herbst, Thomas Scheidl, Matthias Fink and Anton Zeilinger, *Teleportation of entanglement over 143 km*, <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1517007112>

[SHO] Shor, P. *Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer*. **SIAM J. Comput.** 26, 1484–1509 (1997).

[SQU] Clarke, J., Wilhelm, F. *Superconducting quantum bits*. **Nature** 453, 1031–1042 (2008). <https://doi.org/10.1038/nature07128>

[CLA] John Clarke, Frank K. Wilhelm, *Superconducting quantum bits*, **Nature** 453 (2008) <https://doi.org/10.1038/nature07128>.

[MIT] Michael Brooks, *What's next for quantum computing*, **MIT Technology Review**, 6 ianuarie 2023.

[PRL] Christina Psaroudaki and Christos Panagopoulos, *Skyrmion Qubits: A New Class of Quantum Logic Elements Based on Nanoscale Magnetization*, **Phys. Rev. Lett.** 127, 067201 (2021), <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.127.067201>.

[PRE] Jing Xia, Xichao Zhang, Xiaoxi Liu, Yan Zhou, and Motohiko Ezawa, *Universal quantum computation based on nanoscale skyrmion helicity qubits in frustrated magnets*, **Phys. Rev. Lett.** 130, 106701 (2023).

[MQB] Xia, J., Zhang, X., Liu, X. et al. *Qubits based on merons in magnetic nanodisks*. **Commun Mater** 3, 88 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43246-022-00311-w>

[NAN] One, R.-A.; Mican, S.; Cimpoeșu, A.-G.; Joldos, M.; Tetean, R.; Tiușan, C.V. *Micromagnetic Design of Skyrmionic Materials and Chiral Magnetic Configurations in Patterned Nanostructures for Neuromorphic and Qubit Applications*, **Nanomaterials** 2022, 12, 4411. <https://doi.org/10.3390/nano12244411>.

[QUS] M. Kjaergaard, M. E. Schwartz, J. Braumler, P. Krantz, J. I.-J. Wang, S. Gustavsson, and W. D. Oliver, *Superconducting Qubits: Current State of Play*, **Annu. Rev. Condens. Matter Phys.** 11, 369 (2020).

[VCM] Niknam, M., Chowdhury, M.F.F., Rajib, M.M. et al. *Quantum control of spin qubits using nanomagnets*. **Commun Phys** 5, 284 (2022). <https://doi.org/10.1038/s42005-022-01041-8>.

[QUA] P. Krantz, M. Kjaergaard, F. Yan, T. P. Orlando, S. Gustavsson, and W. D. Oliver, *A quantum engineer's guide to superconducting qubits*, **Appl. Phys. Rev.** 6, 021318 (2019).

[LIN] S.-Z. Lin and S. Hayami, *Ginzburg-Landau theory for skyrmions in inversion-symmetric magnets with competing interactions*, **Phys. Rev. B** 93, 064430 (2016).

[LUC] Moreau-Luchaire, C., Moutafis, C., Reyren, N. et al. *Additive interfacial chiral interaction in multilayers for stabilization of small individual skyrmions at room temperature*, **Nature Nanotech.** 11, 444–448 (2016). <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.313>.

[MAT] *Infrastructura de cercetare în matematică și informatică* - Facultatea de matematică și informatică, Universitatea Babeș-Bolyai: ICMI - FMI <https://eris.eu/ERIF-2000-000C-2121>.

[MOD] <MODESKY> ID PN-III-P4-ID-PCE-2020-0230, No. UEFISCDI:PCE 4/04.01.2021 --> ID PN-III-P4-ID-PCE-2020-0230-P, No. UEFISCDI:PCE 245/02.11.2021 *Multiscale modelling and design of skyrmionics materials and storage, synaptic and qubit spintronic devices with enhanced energetic efficiency* Coordonator Prof. Dr. Ing. Coriolan Tiușan

[FER] <FERRISPIN> PN-IV-P1-PCE-2023-0306- *Materiale ferimagnetice și heterostructuri topologice hibride pe baza de pamanturi rare ca și platforme pentru spintronica neuromorfică și cuantica*; proiect depus în competiția PCE-2023-IDEI.

[NMS] Institutul „Ioan Ursu”, Facultatea de Fizică, Universitatea Babeș-Bolyai, *Nanomagnetism și Spintronică*, <http://nanospin.ro/index.html>.



PROFESSOR TOMMASO CALARCO- *“It is still a big dream, but it is no longer a crazy dream”*

Interview by Horațiu Damian- UBB TechTransfer

Professor Tommaso Calarco is a key figure of the Quantum field of research and a leading quantum physicist, with major contributions on subject such as quantum optimal control. Full professor at the Universities of Bologna and Köln, he is the main initiator of the European Quantum Manifesto, which led to the EU Quantum Flagship Programme. Within Quantum Flagship, professor Calarco presides QCN- Quantum Community Network- the platform where theory meets experimental physics and science meets industry.

He is the founder of other science-industry networks and clusters which aim at the development and deployment of quantum technologies. He was director of the Institute for Complex Quantum Systems and of the Centre for Integrated Quantum Science and Technology. Today he leads the Institute for Quantum Control of the Peter Grünberg Institute at Forschungszentrum Jülich. His activity is manifold: scientific, but also aimed at raising the awareness of the political factor and of the society at large to the importance of quantum technologies. In short, professor Calarco can be considered the **Missionary of Quantum**.

Q: Greetings, Professor Calarco. We, at the Babeş-Bolyai University of Cluj, together with our partners from the National Institute of Materials Physics in Bucharest, are implementing QTSTRAT, the project which elaborates the Romanian national strategy for quantum communications. And we are very grateful to you because we wanted to ask you a few questions, since you are a person of such vast experience, of such deep views in the field.

I would start my question with this: what would be the essential steps that a small country like Romania should take in order to deploy an efficient quantum communication network starting from zero?

PROF. TOMMASO CALARCO: It should be done in stages, in the sense that it's possible that there are not so many startup companies or providers of such devices. In the beginning it may not be possible to find some vendors of these devices in Romania. However, the goal is to stimulate not only the use, but also the production and the development of this technology in Romania. So I would say that the first step should be based on the excellent researchers that you have there, by starting to deploy devices, which can be commercialized by other startups from other European member states, and use the expertise which is available in Romania for the deployment of these devices and the operation of the first network operations, to start operation connecting a few cities within Romania. And it is my understanding that this is indeed one of the goals of the current EuroQCI project.

This should be taken as an opportunity for growth of competence on site, in the sense that while you are going to use the knowledge of your own researchers and scientists for using these devices, at the same time it would be advisable that the same researchers and experts be provided with possibilities for development. Not only will they be users of these technologies, as provided by external actors, but also they could be developers of those technologies. And I suppose that this could happen with the provision of some research funds, for instance, for labs in your country and the like.

The focus

A very important element also in the same vein is to support the entrepreneurship, because in many cases it will happen that those colleagues who are active in using those devices- they have competence that cannot only be developed in terms of research, but also lead to the establishment of startup companies. This is a very, very important step in which it would be advisable, on a couple of years timescale, to find some support from the government for that type of innovation. Those startups could go a long way towards creating competence in your country and create value and acquiring independence in terms of not having to buy these devices from providers outside of Romania, in the mid and long term.

This would be the steps for the development of a proper ecosystem in your country. And then, in parallel to this, it's important to coordinate with the other member states and the other organizations around Romania and in Europe in such a way that the next steps in EuroQCI can be prepared in terms of connecting between different associating links, between different countries. Romania, with some neighboring countries, should and could be in a position to really develop the international links which may be necessary for this kind of development.

Q: Another very important thing would be the standardization at the European level. So, let's say we have the equipment made in Romania, but it has to be compatible with the equipment in all the EU member states, so that it is mutually usable...

PROF. TOMMASO CALARCO: Absolutely. This is indeed the part of liaising with those international partners at the European level in the context of the EuroQCI - the European infrastructure for quantum communication. And also, the European Commission is setting this goal. The reason why it is so important is that this can only succeed out of a combined effort of all the actors that we have in Europe. And that really needs to be in a pan-European dimension. And therefore, it is very important for your national strategy to stipulate a strong involvement of your country, your actors, your government in this direction, because this is indispensable for the success of this coordination.

Q: Related to the first question, what would be the main things to avoid when implementing such a national quantum communication network in a country that has none at the moment?

PROF. TOMMASO CALARCO: The main thing to avoid would be to focus on just one dimension of the ecosystem. If the focus would be only on acquiring those technologies from outside, simply buying them and deploying without building up an internal Romanian capacity, competence and ability to deal with these devices, then this would be a problem, because it would not put your country in a sort of sustainable way in the long term. The way of really being able to be a thriving system for the future. A big error would be to forget about the research and development dimension, and only focus on the purchase and the procurement, because this would work in the short term, but would not enable you to reach independence and competence in the longer term.

Hype control and the quantum continuum

Q: You are known as a specialist in quantum control, and on the side of that you have stressed repeatedly the necessity of quantum hype control. If you can elaborate on that a little bit.

PROF. TOMMASO CALARCO: For sure. This is also connected to what we were just saying in the sense that quantum technologies *per se* are not only a fascinating field, but a field which has, in the long term, very high promises for disruptive innovation. And the important aspect here is to manage expectations in a correct way, especially considering and keeping the awareness about the fact that these benefits are to be expected in the mid to long term. Now, of course, quantum communications is a field which has a nearer term promise for application and advantage than, for instance, quantum computing. However, it is very, very important to clarify WHAT we can achieve with these devices so that decision makers are not led into expecting benefits in the short term which can only come later. This hype control and expectation management is essential in keeping the long breath for this field. As you mentioned, in some countries we start from scratch. If we are not aware that this is a longer-term vision, then we might not be able to really catch the opportunities. This is especially important for decision makers, as we must be aware, from the side of the scientists, that democratic governments do not have a sort of budget horizon that can go beyond the maximum of their legislature, right? No government can plan the budget for the successor government, which will come after a few years. At the same time, it is important that politicians and decision makers, while they are supporting decisions in this field, they must know that the outcome, the most important, promising results will not come during the typical lifetime of a legislature, of a government. These technologies require a much longer arch of time to achieve the benefits of the infrastructure. This is why such an investment is important to be started while knowing, and this is the important aspect of hype control, that the benefits are to be expected over a longer time scale. And therefore, as much as possible, a certain degree of continuity and balance should be maintained which ensures that, despite the difference in priorities between succeeding governments, there is still this mutual understanding of the correct expectations from quantum technologies and a sort of passing the baton between different governments. This is a very crucial element in order to ensure that there will be sort of continued growth and the efforts that we are initiating now are not somehow wasted, which they would be if at some point they would be interrupted.

Continuity is essential here in such a long-term undertaking; therefore a correct understanding of the proper time horizon is of paramount importance. And this is what we should expect from this hype control, we should avoid as scientists to, you know, just tell politicians that there will be some wonderful things which will come very soon. We must advise them in the most honest way possible about the real time scale that they should expect. Then we can indeed achieve the benefits that are to be expected as soon as possible, but not sooner.

Q: So we would need a quantum, a political quantum continuum passing this project from one administration to the other...

PROF. TOMMASO CALARCO: I think that's an excellent expression- a political quantum continuum is really an excellent sort of designation for exactly what I have in mind.

About Schrödinger's cat

Q: Is it safe to say also, linked to this quantum hype control, that the quantum technologies are very specialized tools that can perform very well very specialized tasks, and that they are not universal solutions to every conceivable problem?

PROF. TOMMASO CALARCO: It's very, very important to state that. For instance, we are working to extend the applicability of quantum computers to a growing number and range of use cases. However, at the moment, the quantum algorithms that we are aware of, they work for a limited number of such use cases. The same applies to the field of quantum communications. At the moment we have a technology which provided for secure telecommunications on a point-to-point basis, with the limitation up to a few hundred kilometers. We are working very hard to extend this to continental scales- and we designed quantum repeaters which can achieve that. But again, on a longer time scale. Also in quantum sensing: it can be used in a broad range of sensing aspects such as medical diagnostics, but not for all possible medical diagnostics. It performs well for magnetic resonance imaging, for brain cells, neural activity detection, but not for all possible medical exams that one has to do. Of course, we are working hard at expanding the range of use cases. But one very wrong statement, one very misleading statement such as we hear from time to time from some popular press is that quantum is a solution

for all the big challenges of humankind. That is not the case. Nevertheless, there are some very important specific problems for which quantum technologies can provide an important advantage. And therefore, it is essential to understand what they are to focus on them with the proper continuity, and to sort of try to expand the range of those problems, but without naively claiming that this will be a solution for all possible problems.

Q: In the world of the layman, the one quantum concept that is very common and very popular is that of the Schrödinger's cat. You stated, in an interview, that we will not ever be able to reproduce a Schrödinger's cat. What did you mean by that?

PROF. TOMMASO CALARCO: I meant that if we think of a cat, like really a living cat, being put in a quantum superposition, we know for sure that this will never be possible because the conditions for quantum coherence, which are necessary for achieving such a quantum superposition, require very low temperature, very strong isolation from the external world, so they are incompatible with life. So, we know that there will never be a possibility of having a living being put in such a quantum state. And this was the reason why Schrödinger chose a cat, a living being, to make more evident his paradox. On the other hand, we do have Schrödinger cat states, which are obviously not real cats, but increasing numbers of atoms or quantum particles which are put in the superposition states. The current world record is a number of about 30, I think 32 such ions being put in a superposition state. But 32 ions are very, very far from any sort of macroscopic size. So, the point is: as much as we are not going to see teleportation of human beings, okay, this is and will remain in the domain of science fiction; but we can see teleportation of individual quantum objects such as photons, which can be used for secure communications. So: as much as it may be helpful and nice and fascinating for the public to picture some of the wonderful features of quantum mechanics in terms of these paradoxes or thought experiments, at the same time, we must make sure that everybody understands that this is not to be taken literally.

On the other hand, a Schrödinger cat in the sense of this large superposition of quantum objects, even if they are only a few dozens, is extremely important and useful, because this is exactly the foundation of what we need in quantum computers. So in this sense, a Schrödinger cat as a cat is something we will never see, but as a coherent superposition of many quantum particles- yes it is something that we will be seeing, something that we

are already seeing in the metaphoric sense, in the practical sense, in terms of a coherent state, which involves superpositions of a few dozens of quantum particles. A few dozen for the moment- we expect for more in the future. This scalability is the very foundation of having function in quantum computers, which will solve some of the problems mentioned before.

Q: So, Schrödinger's cat in the sense of larger and larger quantum systems of qubits, of more and more qubits, is possible after all.

PROF. TOMMASO CALARCO: Yes, this will be possible. Schrödinger cat states will be possible and we will build quantum computers with them.

A mysterious science

Q: Since large quantum systems cannot be simulated, and we do not know how they will behave before we build and test them, do you think that in the process of testing and then in the functioning of those systems, we will discover new physical laws, new correlations between the micro and the macrocosm?

PROF. TOMMASO CALARCO: Well, it's interesting that you ask this question because this, the hope that this may be the case, is indeed one of the big motivations for my own personal research in my institute. Namely, the border between the microcosmos- the microscopic world, and the macroscopic world is something which interests me very deeply. On one end we expect that the laws of quantum mechanics will be confirmed by these experiments that we are doing. But what is possible to expect is that since these quantum computers are, as a matter of fact, increasingly big, no longer microscopic, but one can say technically mesoscopic quantum objects, that they will shed light on something which we do not yet know, which quantum mechanics does not describe directly in detail, which is exactly this transition between the microscopic and the macroscopic world and precisely what you were referring to, this aspect of what is happening at the mesoscopic level. Here we do expect that there may be some relevant and interesting developments. This is one example of the fact that this research is not just about technology and using these systems, but it's still very much about basic, fundamental research and understanding of these systems.

And there always is an interplay between the fundamental understanding and the sort of use of such phenomena. The quantum technology is a wonderful example of this constant interplay, which underscores the importance of basic science, which then gives rise to applications if it is performed and practiced correctly. And with, again, coming back to our first argument, with the proper timeline and with the proper sort of breadth and time horizon, which allows us to worry not only about WHAT are we going to use our quantum computer for tomorrow, let's say, but also worrying about HOW are we going to understand these things.

Q: Will quantum technologies be as disruptive for everyday life as the internet or the artificial intelligence? How will they impact our lives, let's say, in two or three decades from now?

PROF. TOMMASO CALARCO: I would say that it is difficult to say for sure at the moment. What we can say is that it could impact our lives very strongly. But whether it will actually do that depends on how successful we are going to be in realizing those technologies and really making them practical. And practical means not only that they can work in an actual device, but also that this device has to be robust, it has to be sufficiently cheap to produce, and so on- for mass production and for really an impact on society. We know that in principle, in theory, this is possible, but there is a famous saying which tells us that in theory, theory and practice are the same, but in practice, they are not. It sounds like a joke, but it is a fact.

We have to take into account that whether we will achieve the full potential will depend on the practical realizability. And this is deeply intertwined, both with further fundamental research into the fundamental aspects of what it takes to create these devices, but also research into the technological development and deployment. And this is, again, among the reasons why I was underscoring in the beginning that it would be a wrong step from the side of the government of Romania, and of any government for that matter, to just focus on the deployment side now and to leave outside the research side. Both of them must go hand in hand because we are still far from having the sort of practical realizability and applicability that would be needed to really make a huge impact on the whole of society.

Democratization of quantum technologies

Q: Mentioning the reasons for concern associated with the quantum technologies, you underlined as one of the most serious one- the lack of democratization of these technologies. What did you mean by that?

PROF. TOMMASO CALARCO: The big danger is that the richer countries, which have the resources and infrastructure to undertake research, will be able to develop them. But if they keep it for themselves, and exclude other countries from getting the benefit, then this will be a big problem. Because it would mean that the inequalities on a global scale will be enhanced. In other terms, the rich, which have the money and the ability and the resources to develop quantum technologies, will take the advantage and the others would be left out. This would be, of course, very undesirable, not only from an ideal point of view, but also from a practical point of view, because after all, if we increase those inequalities, it is going to be bad for all of us, both the richer and the less rich. So, this is still the time to act, to make sure that this access is concretely available.

The EuroQCI is one example of extending access and engagement to all of Europe. And also the EuroQCS, the European Quantum Computing and Simulation Infrastructure, is an example of the same. This is where we can still work, and we must work, to make sure that it remains an important goal we can indeed reach.

Quantum art and science

Q: You mentioned among your activities and interests, the involvement in art projects concerning quantum mechanics. And I was wondering how come that such really inexpressible concepts like those in quantum physics, entanglement, superposition, could be subjects for art representation?

PROF. TOMMASO CALARCO: This is a very, very interesting question, because they cannot be subject for art representation, indeed. But art is not necessarily only representation. There are other forms of art, especially contemporary art, which are based, for instance, on performance.

And I am collaborating with some artists, which are sort of creating experiments, you know, like we are planning one about quantum carpets, which are patterns created by interfering light. I have a phone call with those artists tonight, actually, as a matter of fact, because they are submitting a project in which they want to involve me. And this is not about representing something, but sort of exhibiting, showing, allowing access for people to the marvel of quantum phenomena. And this could include also, you know, creating an exhibit in which people can see with their eyes a single atom inside a vacuum chamber. It is not about representation, but it is about access, about marvelling and admiring the beauty of such a physical phenomenon.

Q: This could also open this very specialized and mysterious field of research to the great public and make these technologies more acceptable for the wide public.

PROF. TOMMASO CALARCO: Yes, this is indeed absolutely one of our main goals in this sense. Again, in terms of democratization, in terms of bringing this whole field from something which is just for the few elected to something which is really accessible to a much broader audience, in which everybody could be able to access and enjoy these resources.

Q: You mentioned in previous interviews that in the beginning of your activity, in the 90s, you were risking the ruin of your career by engaging into such a field like quantum applications. So, you are, in some way, a risk taker. Would you say that the deployment of quantum technologies is an act of faith, a risk taking or a necessary and indispensable decision?

PROF. TOMMASO CALARCO: I would say that, well, the situation has changed a lot from 30 years ago when I was starting my career in terms that then it was very much risk taking exactly as you were saying. Back then it was just some fancy fantasy or some kind of crazy thing to be done. And nowadays, instead, the progress has been so strong that even though there is still a long way to go, and this is about the hype control that we are discussing, it is about the expectation management, but still there is already evidence which we would never have expected at the time. Nowadays you can buy devices, you can buy quantum computers, and perform some calculations, you can buy first generation quantum communication devices, which are going to be deployed in your QCI.

It is still a big dream, but it is no longer a crazy dream. There are some very concrete perspectives and some very concrete albeit specific use cases, which make it no longer just a fantasy. So it is much less of a crazy risk than it was once upon a time. No one from my generation would have believed that this would come to such a level. We started doing this because of passion, because we liked it, because it's, you know, crazy and funny and fun. I'm amazed every day at the fact that this is really coming to actual devices and their commercial applications.

Q: Professor Calarco, thank you very much.

Photo: from the archive of prof. Tommaso Calarco, reproduced with his kind permission
The interview was first published in the QTSTRAT Newsletter no. 8/ 2023- available at <https://qtstrat.granturi.ubbcluj.ro/2022/11/28/newsletter/>

Editare, graphic design, copertă:

Horațiu Damian