

## Makroskopsko kvantnomehaničko tuneliranje (dodjela Nobelove nagrade za fiziku 2025. g.)

Ivica Picek<sup>1</sup>

U godini 2025., koju su Ujedinjeni narodi proglasili Međunarodnom godinom kvantne znanosti i tehnologije, dobitnici Nobelove nagrade iz fizike su *John Clarke*, *Michel H. Devoret* i *John M. Martinis* “za otkriće makroskopskog kvantnomehaničkog tuneliranja i kvantizacije energije u električnom strujnom krugu”. Ti kvantni fenomeni, otkriveni prije četrdeset godina na sveučilištu u Berkeleyu, ponudili su supravodljive strujne krugove kao jednu od mogućih platformi za razvoj kvantnih računala.



*John Clarke*



*Michel H. Devoret*



*John M. Martinis*

Kvantnu mehaniku na studiju fizike na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu (PMF) u Zagrebu slušao sam kod profesora Mladena Martinisa, koji bi sigurno bio ponosan na svojeg prezimenjaka hrvatskih korijena. U tom je kolegiju pojava kvantnomehaničkog tuneliranja prikazana kao nešto što se događa isključivo u mikrosvijetu. No John Martinis se prisjeća da je poticaj za testiranje tuneliranja u makrosvijetu došao od Anthonyja Leggetta, tako da se on još u studentskim danima u tome mogao pridružiti istraživanjima pokrenutim u timu Devoretea i Clarkea. Leggett je u međuvremenu podijelio Nobelovu nagradu za 2003. s V. L. Ginzburgom i A. A. Abrikosovim “za pionirske doprinose teoriji supravodiča i suprafluida”. Sada, na stogodišnjicu postavljanja kvantne teorije od strane Wernera Heisenberga i Erwina Schrödingera, Nobelov komitet je odlučio nagraditi eksperimentalnu potvrdu postojanja makroskopskog kvantnog tuneliranja. Podsjetit ćemo se najprije konteksta u kojem se pojavilo Heisenbergovo i Schrödingerovo otkriće.

### Kvantne mehanike nastale premošćivanjem svakodnevnog i atomskog svijeta

Za zakon zračenja crnog tijela Max Planck je 1900. uveo kvantizirane oscilatore i kvant djelovanja  $h$ . Einstein je 1905. utvrdio da i oscilatorima proizvedeno zračenje mora biti kvantizirano. Fotoelektrični učinak je objasnio kvantima svjetlosti, fotonima energije koja je dana umnoškom frekvencije svjetlosti i Planckove konstante  $h$ . Za objašnjenje fotoelektričnog učinka Einsteinu je 1921. dodijeljena Nobelova nagrada. Objasnjenjem dotad neshvaćene pojave Einstein je ujedno pozvao na preispitivanje postojeće mehanike te ga možemo smatrati duhovnim ocem kvantne mehanike.

<sup>1</sup> Ivica Picek je profesor emeritus na Fizičkom odsjeku PMF-a Sveučilišta u Zagrebu; e-pošta: [picsek@phy.hr](mailto:picsek@phy.hr)

U prvom *premošćivanju* svakodnevnog i atomskog svijeta proslavio se Niels Bohr. Za njega Einsteinovi fotoni nastaju pri kvantnim skokovima između stacionarnih atomskih orbita. U njih smještava elektrone po analogiji s planetarnim orbitama Newtonove mehanike, da bi za pravila o strukturi atoma, koja je ustanovio 1913., bio nagrađen Nobelovom nagradom za 1922.

*Drugo premošćivanje* makroskopskog i mikroskopskog svijeta je na potpuno različiti način učinio Werner Heisenberg. On je u lipnju 1925., u bijegu od “alergije” na Helgoland, Sveti otok u Sjevernom moru, peludnu groznicu zamijenio stvaralačkom groznicom. U grozničavom zanosu na potpuno formalno-matematički način došao je do svoje kvantne mehanike. Max Born je odmah uputio rukopis svojeg asistenta u Göttingenu na objavljivanje da bi, sa svojim studentom Pascalom Jordanom, Heisenbergovu mehaniku reformulirao kao *matričnu kvantnu mehaniku*. Na tom tragu je 2025. godine sam grad Göttingen proglašen za “EPS Historic Site” (povijesnim mjestom otkrića Europskog fizičkog društva). Napomenimo da ćemo kao EPS historic site naći i zgradu na Griču 3 u Zagrebu, gdje je otkriven Mohorovičićev diskontinuitet.

Za “stvaranje kvantne mehanike” Heisenberg je nagrađen Nobelovom nagradom za 1932. Heisenberg je odbacio Bohrovu klasičnu vizualizaciju da bi zadržao samo *frekvencije zračenja* i *vjerojatnosti prijelaza* povezane s opaženim intenzitetima spektralnih linija. U tome slijedi Einsteina koji je 1916. uočio da se statistički opis raspada radioaktivnih atoma može primijeniti i na ostale atomske prijelaze. U skladu s tim Bohr govori o “vjerojatnostima prijelaza” koje ćemo mjeriti na velikom uzorku atoma.

Stvaralačka groznica koja podsjeća na Heisenbergovu, vodila je 1926. Schrödingera do *valne kvantne mehanike*. Polazište mu je bila ideja Louisa de Brogliea iz 1924. o valovima materije, česticama impulsa  $p$  kojima je pridružio valnu duljinu  $\lambda = h/p$ . Za takvu ad-hoc kvantizaciju de Broglie je nagrađen Nobelovom nagradom za 1929. U pokušaju daljnjeg spajanja valne optike s mehanikom, Schrödinger je morao osmisliti još nepostojeću valnu mehaniku. Traženu valnu jednadžbu dobio je iz poznate jednadžbe vođenja topline, kad je u nju uvrstio imaginarnu jedinicu. Dobivena Schrödingerovalna jednadžba za val-elektron, smješten u atomu, opisuje kako kompleksna funkcija  $\psi$  taj val razvija u vremenu i predviđa za elektron tražene Bohrove energije. Schrödinger je s Diracom 1933. podijelio Nobelovu nagradu “za nova otkrića na polju teorije atoma”. Konačno, Max Born je nagrađen 1954. za vjerojatnostnu interpretaciju same valne funkcije  $\psi$ : Njezina vrijednost u nekoj točki prostora određuje vjerojatnost da u toj točki opazimo elektron. Na isti taj način će postojanje valne funkcije atoma iza neke barijere objasniti radioaktivne raspade tzv. kvantnim tuneliranjem, prikazanim na naslovnici ovog broja.

---

## Kvantno tuneliranje: od mikroskopskog do makroskopskog

---

Slika s naslovnice prikazuje alfa raspad radioaktivne atomske jezgre. Na njoj su prikazane i “kvantne stepenice” atomske jezgre kao kvantiziranog sustava. Jezgra će lakše tunelirati kad se nalazi u stanju više energije.

Za razliku od kemijskih reakcija, brzina alfa raspada ne ovisi o prisutnosti ostalih atoma ili o povijesti prethodnih alfa emisija. Riječ je o jednoatomskom procesu emisije alfa čestice, dvostruko nabijenom ionu helija (jezgri helija). Odvijanje alfa raspada po zakonu vjerojatnosti moglo se do kraja razumijeti tek kad je kvantna mehanika primijenjena na nuklearnu fiziku krajem 1920-tih. Emisija se opisuje kao kvantno tuneliranje kroz potencijalnu barijeru atomske jezgre, za koju kvantna valna funkcija postoji i s druge strane barijere (ilustrirano na slici 1).



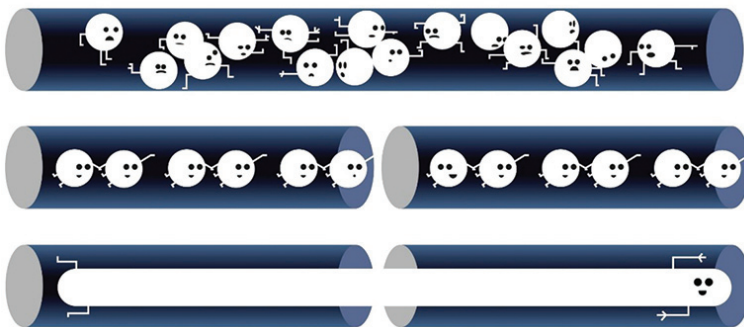
Slika 1. Nuklearni alfa raspad omogućen kvantnim tuneliranjem, pri kojem se iz jezgre roditeljice oslobađa njezin dio u vidu alfa čestice.

Uočimo posebnost jezgri helija u kojima su jako vezani nukleoni. Sparena dva protona i dva neutrona, fermiona polucijelog spina u bozone cijelog spina, čini helij izrazito stabilnom jezgrom. Ona popunjena s dva elektrona čini helijev atom  ${}^4\text{He}$  s njegovim spektrom kvantnih stanja. Hlađenjem helijevih atoma na  $-272\text{ K}$  svi atomi će biti u istom, najnižem stanju, u kojemu formiraju Bose-Einsteinov kondenzat. U tom stanju se helijevi atomi ne pokazuju kao zasebne čestice, već čine jedan kvantni entitet suprafluidne tekućine, koja protječe bez trenja. Na iznenađenje su i ohlađeni  ${}^3\text{He}$  atomi, koji su fermioni polucijelog spina, pokazali svojstvo suprafluidnosti. Leggettovo objašnjenje da  ${}^3\text{He}$  atomi mogu formirati parove, poput Cooperovih parova elektrona u supravodiču, bio je za ovogodišnje laureate poziv da pokrenu istraživanja mogućeg kvantnog ponašanja makroskopskih sustava.

## Od makroskopskog kvantnog tuneliranja do qubita

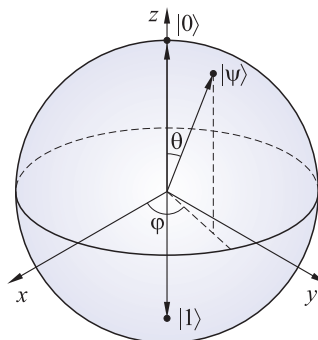
Elektron, kao temeljna elementarna čestica, “mikroskopski” je kvantni objekt koji može proći kroz barijeru ili zid za razliku od makroskopskih objekata građenih od velikog broja čestica, poput loptica za tenis. Klasično neočekivano tuneliranje elektrona kroz barijeru, u mikrosvijetu prirodno objašnjava kvantna mehanika. Elektron se povinjuje kvantnim zakonima, prema kojima može biti u više od jednoga stanja, u tzv. superpoziciji stanja. Ideja ovogodišnjih dobitnika bila je naći makroskopski objekt koji bi se unatoč svojim dimenzijama još uvijek ponašao poput elektrona ili atoma. Takvo kvantno ponašanje mogli su potražiti kod supravodiča, kod kojih se elektroni vežu u tzv. Cooperove parove i zahvaljujući tome se gibaju kroz supravodljivi krug bez otpora. Time takvi parovi poput atoma predstavljaju zasebne objekte. U jeziku kvantne mehanike, svaki Cooperov par je jedan kvantnomehanički sustav opisan jednom valnom funkcijom. Ako bi uspjeli pokazati da se i svi Cooperovi parovi zajedno, kolektivno ponašaju kao jedan atom, imali bi traženi primjer makroskopskog objekta tipa svojevrsnog umjetnog atoma.

Konkretan putokaz takvom programu ovogodišnjih laureata bila je demonstracija Briana Josephsona da Cooperovi parovi mogu tunelirati kroz izolator postavljen između dva supravodiča (slika 2). Otkriće Josephsonovog učinka, tuneliranje Cooperovog para kroz Josephsonov spoj, nagrađeno je Nobelovom nagradom za 1973. Tim s Berkeleyja je učinio korak dalje, da pokaže kako se uz preklap kolektivne valne funkcije Cooperovog para, koji omogućuje prijelaz jednog Cooperovog para kroz izolator, događa i da valna funkcija milijardi Cooperovih parova može tunelirati kao jedinstveni kvantni objekt. U pokusu provedenom na čipu makroskopskih dimenzija našli su metodu da kontroliraju, manipuliraju i mjere i najmanje promjene struje i napona preko Josephsonovog spoja. Struja milijardi elektrona pokazala se kao makroskopski kvantni atom koji tunelira kroz barijeru. Taj “atom” pokazuje diskretna energijska stanja (ilustrirana slikom na naslovnici) i pokazuje se kao superpozicija tih energijskih stanja – pokazuje makroskopsku kvantnu realnost.



Slika 2. Različite pojavnosti materijala sa slabno vezanim elektronima vanjskih atomskih ljuski: od normalnih vodiča u kojima se sudari slobodnih elektrona doživljavaju kao otpor (gore), preko ohlađenih kristalnih rešetki u kojima po dva elektrona formiraju Cooperove parove (sredina), do dalje ohlađenih vodiča u kojima se svi Cooperovi parovi kolektivno gibaju bez raspršenja i bez otpora i u konačnici kvantno tuneliraju kroz umetnuti izolator (Josephsonov spoj, dolje).

Ovo otkriće je bilo veliki poticaj da se materijali s kvantnim svojstvima upotrijebe za razvoj kvantnih računala, koja bi se umjesto na binarni bit oslanjala na kvantni bit, *qubit*. Umjesto nečeg što može poprimiti jednu od dvije vrijednosti (0 i 1) ide se na nešto što ima za vrijednost linearnu kombinaciju, superpoziciju dva kvantna stanja. U našem slučaju je Josephsonov spoj kvantno-mehanički sustav s dva stanja, koji daje eksperimentalni qubit. Klasični bit, kao dva stanja kovanice na stolu, usporedit ćemo s qubitom kao kovanicom koja rotira u trodimenzionalnom prostoru. Qubit može biti u bilo kojem kvantnom stanju  $|\psi\rangle$  koje se nalazi na sferi jediničnog radijusa prikazanoj na slici 3.



Slika 3. Blochova sfera kao prikaz qubita, kvantnog stanja kao točke na sferi jediničnog radijusa.

John Martinis je nastavio prema izgradnji kvantnog računala na temelju električnih krugova i suočio se s teškoćama koje prate i druge platforme. Osim što bi za neki račun trebali napravu s daleko više qubita, trebalo bi reducirati greške u operiranju vratima između qubita (programiranje se svodi na prebacivanje vratiju/“prekidača” između qubita). Iako se može kontrolirati da “prekidač” radi kvantnim tuneliranjem, a ne termalno, ta kvantna stanja su jako krhka, podložna dekoherenciji u okolišu. Drugim riječima, kvantna su računala moguća, ali je do njih još dugi put. Trenutno su na njihovom razvoju angažirane tisuće fizičara putem privatnih investitora.

## Literatura

[1] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2025/press-release/>

[2] [https://en.wikipedia.org/wiki/Bloch\\_sphere](https://en.wikipedia.org/wiki/Bloch_sphere)