

Kvantni strojček

Janez Strnad

Bolje kot razpravljanje o interpretacijah razkrijejo pravo naravo kvantne mehanike njeni dosežki. O takem dosežku, imenitnem poskusu, je spomladi leta 2010 poročala londonska raziskovalna revija *Nature*. Podpisalo ga je trinajst članov raziskovalne skupine, ki jo na fizikalnem oddelku Kalifornijske univerze v Santi Barbari vodita John Martinis in Andrew Cleland. Poskus je bil značilen tudi za drugo sodobno raziskovalno smer, nanotehnologijo. V njej raziskujejo zelo majhne sisteme, ki jih sestavlja množica atomov. Uredniki ameriške raziskovalne revije *Science* na koncu leta izberejo raziskovalni dosežek, ki se jim v tistem letu zdi pomembnejši od drugih. Za »preboj leta 2010« so izbrali »prvi kvantni strojček« iz navedenega članka. Drugo mesto so prisodili odkritju v genomiki.

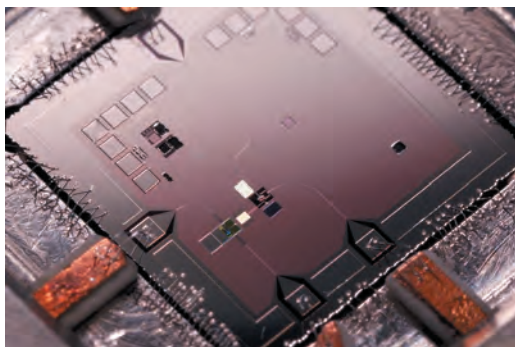
Nihalo

Poskusimo povedati nekaj o kvantnem strojčku. Pomembni sestavni del poskusa je bilo mehanično nihalo. V kvantni mehaniki se energija nihala spreminja v enakih skokih. Med sosednjima stanjema je energijska razlika enega kvanta, v tem primeru fonona. Fonon je povezan z zvokom, kot je foton povezan s svetlobo. V prvem vzbujenem stanju ima nihalo en fonon energije, v

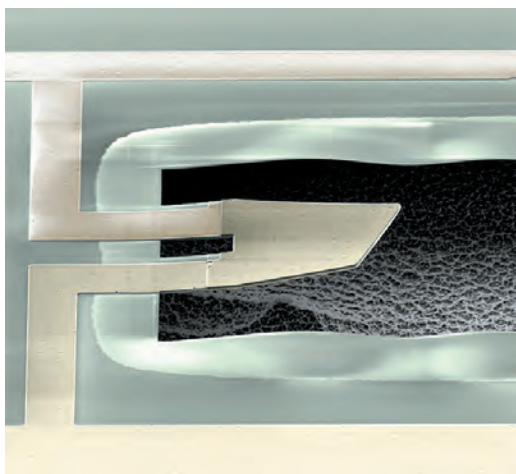
drugem dva fonona, v tretjem tri fonone in tako dalje. Če nihalo ne vsebuje nobenega fonona, je v osnovnem stanju, to je v stanju z najmanjšo mogočo energijo. V osnovnem stanju nihalo ne more oddati nič energije, lahko pa jo sprejme.

Nihalo spravijo v bližino osnovnega stanja, tako da ga močno ohladijo. Če bi nihalo zanihalo tisočkrat na sekundo, kot, denimo, struna, bi ga bilo treba ohladiti na nekaj stomilijonin kelvina. Kelvin je enota, ki je enako velika kot stopinja Celzija, le da temperaturo v kelvinih začnemo meriti pri absolutni ničli 0 kelvinov, -273 stopinj Celzija. To je najnižja temperatura, ki se ji je mogoče približati. Nihala do tako nizke temperature niso mogli ohladiti. Temperatura, do katere je treba nihalo ohladiti, je obratno sorazmerna s frekvenco nihala. Zato so izbrali nihalo, ki je nihalo z zelo veliko frekvenco 6 milijard nihajev na sekundo. Frekvenco nihala izračunamo enako kot frekvenco strune, le dolžino strune nadomestimo z debelino nihajoče plasti in hitrost valovanja po struni s hitrostjo zvoka. To nihalo je bilo treba ohladiti le na nekaj desetih kelvina. Velika frekvenca ima prednost, ker je energija fonona tem večja, čim večja je frekvenca.

Nihalo so sestavili iz tretjino tisočine milimetra debele plasti aluminijevega nitrida, ki je izolator. Zgoraj in spodaj so jo obdali z dvainpolkrat tanjšo plastjo aluminija. To so spodaj podprli s šestino tisočine milimetra debelo plastjo kremena. Tako so naredili zelo majhen ploščni kondenza-



Ogrodje kvantnega strojčka. Nihalo je spodaj, levo od kondenzatorja, svetlega kvadrata na sredi slike, ki ga povezuje s kubitom zgoraj desno. Vir: Wikipedia.



Nihalo prvega kvantnega strojčka, »kvantni boben«, v elektronskem mikroskopu. Nihalo je del v temnem srednjem delu slike, do katerega segata dva ozka električna vodnika iz aluminija. Dolžini slike ustreza desetina milimetra.

Vir: Wikipedia.

tor. Aluminijev nitrid je piezoelektričen. V električnem polju se raztegne ali skrči glede na to, kako je obrnjeno polje. Z izmenično napetostjo s frekvenco 6 milijard nihajev na sekundo med plastema aluminija so plast aluminijevega nitrída spravili v nihanje in to nihanje nadzorovali. Nihalo so ohladili na nekaj stotin kelvina.

Kubit

Nihanje nihala je bilo treba vzbuditi in nadzorovati energijo nihala. V ta namen so uporabili superprevodni fazni kubit. To je bil drugi pomembni sestavni del poskusa. Kubit, kvantni bit, je elementarni kvantni sistem z dvema stanjema. Bit je najmanjša enota informacije, ki ustreza odgovoru: ne ali da. Iz kubita je mogoče dobiti natanko 1 bit informacije: kubit je v osnovnem stanju ali v vzbujenem stanju.

Fazni kubit sestavlja električni krog z Josephsonovim stikom. To sta drobna trakova iz aluminija, med katerima je zelo tanka plast izolatorja, aluminijevega oksida. Pri zelo nizki temperaturi aluminij postane superprevoden in prevaja električni tok brez

upora. Prehod elektronov, ki so v tem primeru povezani v pare, iz traku v drugi trak ovira zelo tanka plast izolatorja. V klasični fiziki elektroni sploh ne bi mogli preiti ovire. V kvantni mehaniki pa jo nekateri pari elektronov preidejo pri tunelskem pojavu. Pri posebej izbrani velikosti stika z magnetnim poljem dosežejo, da obstajata samo dve energijski stanji, osnovno in vzbujeno. Nato s premišljenimi električnimi dražljaji energijo prenašajo iz kubita v nihalo.

Kubit so izdelali na milimeter dolgi in pol milimetra široki ploščici. Uporabili so način, ki so ga razvili za izdelavo polprevodniških vezij. V vakuumu so po vrsti naparili plast izolatorja, plast kovine in plasti drugih snovi, v celoti trinajst plasti. Naparevanje so skrbno nadzorovali in potem preverili, ali ima naparjena plast zelene lastnosti.

Ploščico so postavili neposredno na hladilnik. Uporabili so razredčevalni hladilnik. S takim hladilnikom je mogoče hladiti pri temperaturi pod približno 0,9 kelvina. Pri tako nizki temperaturi nastaneta v heliju dve fazi. V eni je več lažjega izotopa helija 3, v drugi več težjega izotopa helija 4. Temperatura se niža, ko helij 3 iz prve faze prehaja v drugo. Helij je edina snov, ki pri navadnem tlaku ostane tekoča ne glede na to, kako močno jo ohladimo.

Pri prejšnjem poskusu leta 2009 so namesto mehaničnega nihala uporabili linearni resonator, to je elektromagnetno nihalo, ki sta ga sestavljala kondenzator in tuljava. V kvantni fiziki se tudi energija takega resonatorja spreminja v enakih skokih. Med sosednjima stanjema je energijska razlika enega kvanta, v tem primeru fotona. Resonator ima energijo enega fotona, dveh fotonov, treh fotonov in tako dalje. Če resonator ne vsebuje nobenega fotona, je v osnovnem stanju. Stanj z določenim številom fotonov ni mogoče vzbuditi klasično, z valovanjem. Tudi v tem primeru so jih vzbudili s kubi-

tom. S premišljenim merjenjem so se prepričali, da gre za stanja z določenim številom fotonov.

Že to je bil velik dosežek. M. Aspelmeyer je v reviji *Nature* poročal o predavanju Andrewa Clelanda na znanstvenem sestanku poleti leta 2009. Raziskovalni skupini je kot nikomur dotlej uspelo nadzorovati stanje fotonov v resonatorju. Poslušalcem pa je zaprlo sapo, ko je na koncu omenil, da bi bilo elektromagnetno nihalo mogoče nadomestiti z mehaničnim nihalom. Ta presenetljivi korak je skupini uspel že dobre pol leta pozneje.

Nihalo je bilo s kubitom povezano s kondenzatorjem, uravnavali pa so tudi magnetno polje. Kubit so nadzorovali z mikrovvalovi, frekvenci 6 milijard nihajev na sekundo namreč ustrezajo zelo kratki radijski valovi z valovno dolžino 5 centimetrov. Pripravili so kubit v vzbujenem stanju in ga povezali z nihalom. Potem so merili zasedenost vzbujenega stanja kubita v odvisnosti od časa. Opazili so nihanje, ki je značilno za kvantno mehaniko in kaže na izmenjavanje energije enega fonona med kubitom in nihalom. Zadeva ni bila preprosta. Na več načinov so se prepričali, da izmenjavanje energije med nihalom in kubitom poteka na predvideni način. Nadzorovano izmenjavanje je trajalo 4 milijardine sekunde. Po tem času so izgubili nadzor nad razmerami zaradi nenadzorovanih vplivov iz okolice. Ta čas je bil krajši kot na primer pri opazovanju atoma. Pri makroskopskem sistemu, kakršen je opisano nihalo, čeprav ga s prostim očesom komaj vidimo, običajno velja klasična mehanika. Pri takem sistemu iz množice atomov je težko doseči, da je dalj časa neodvisen od okolice. Pri enem atomu je lažje.

Poudarili so, da »rezultat, o katerem poročajo, močno podpira ugotovitev, da so dosegli smiselni kvantni nadzor nad makroskopskim mehaničnim sistemom«. Dosežek je bil imeniten zaradi tega, ker se je predmet, »delo

človeških rok«, ravnal po zakonih kvantne mehanike. To je bil tudi eden od korakov h kvantnemu računalniku, ki si ga prizadevajo izdelati. Tak računalnik bi povezoval množico kubitov, katerih stanja bi bilo mogoče nadzorovati.

V reviji *Science* so pribili, »da zasnova strojčka odpira pot k množici poskusnih naprav in morda preizkuša naš smisel za realnost«. Omenili so, da so sicer drugi raziskovalci pred tem opazovali kvantne pojave pri številnih poskusih z atomi, molekulami, delci, svetlobo, električnim tokom in helijem. Nihče pa še ni opazoval kvantnih pojavov pri »izdelku človeških rok«. V strokovnih krogih so opozorili predvsem na dva dosežka. Prvič je uspelo dobiti makroskopski mehanični sistem v osnovnem stanju in mu nadzorovano dovajati energijo. Pripomnili so, da utegnejo naprave te vrste delovati kot skrajno občutljivi merilniki sile. Pomembno se jim je zdelo tudi to, da bo z njimi mogoče podrobneje raziskati mejo med klasičnim in kvantnim svetom.

Uredniki *Science* so povprašali bralce, kaj bi oni izbrali za »preboj leta 2010«. Poleg kvantnega strojčka so med drugim predlagali odkritje bakterije z arzenom v DNA, odkritje obrnjenega staranja pri miših po genskem inženiringu, osamitev atomov antivotika v CERN-u. Prvi dve odkritji naj po mnenju urednikov počakata na potrditev, iz CERN-a pa se kmalu nadejajo bolj odmevnih vesti.

Literatura:

Aspelmeyer, M., 2010: *The surf is up*. *Nature*, 464: 685-686.
 Cho, A., 2010: *The first quantum machine*. *Science*, 330: 604.
 O'Connell, A. D., Hofheinz, M., Ansmann, M., Bialzak, R. C., Lelander, M., Lucero, E., Neeley, M., Sank, D., Wang, H., Weides, M., Wenner, J., Martinis, J. M., Cleland, A., N., 2010: *Quantum ground state and single-phonon control of a mechanical resonator*. *Nature*, 464: 697-703.
 Quantum machine. http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_nachine