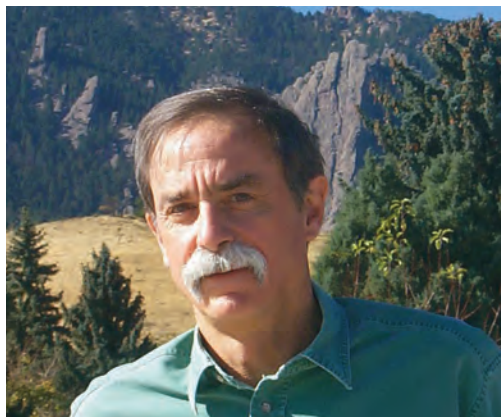


Nobelova nagrada iz fizike za leto 2012

Janez Strnad

Čeprav je Nobelove nagrade zelo nehvaležno napovedovati, se je na spletu tudi letos pojavilo več napovedi za nagrado iz fizike. Nekatere od njih so zadele področje, kvantno optiko, ne pa imen nagrajencev. Serge Haroche in David Wineland sta bila nagrajena za »pionirske eksperimentalne metode, ki omogočajo merjenje posameznih kvantnih sistemov in delovanje nanje«. Haroche vodi raziskovalno skupino v Parizu, Wineland pa raziskovalno skupino v Boulderu v ameriški zvezni državi Kolorado. Skupini se dopolnjujeta. Harocheva ujame svetlobo in jo otipa z atomi, Weinelandova pa ujame atome kot ione in jih otipa s svetlobo. Nagrajenca si bosta razdelila malenkost manj kot milijon evrov.

David Wineland je bil rojen leta 1944 v Milwaukeeju v zvezni državi Wisconsin. Diplomiral je leta 1965 na kalifornijski univerzi v Berkeleyju in doktoriral leta 1970 na harvardski univerzi. Po doktoratu je raziskoval na univerzi Washington v Seattlu in leta 1975 prešel na današnji Državni inštitut za standarde in tehnologijo v Boulderu. Je tudi profesor na univerzi zvezne države Kolorado v Boulderu. Pred Nobelovo nagrado je dobil devet visokih mednarodnih nagrad in priznanj. Leta 1992 so ga izvolili v ameriško akademijo znanosti. Vir: Wikipedia.



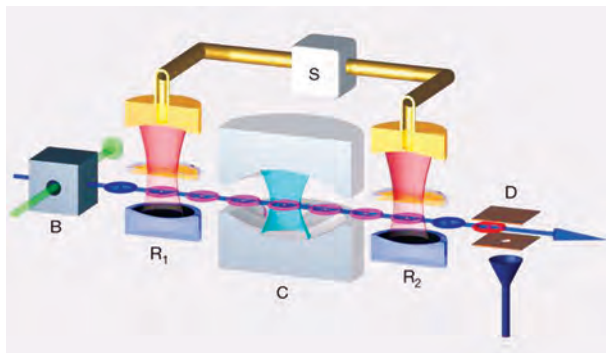
Svetloba med zrcaloma

Haroshe in njegovi sodelavci svetlobo ujamejo v votlino med zrcaloma v visokem vakuumu in pri temperaturi samo del stopinje nad absolutno ničlo. Tako se kolikor mogoče izognejo neželenim vplivom okolice. V svetlobi z določeno frekvenco je ener-

Serge Haroche je bil rojen leta 1944 v Casablanci v Maroku. V letih od 1963 do 1967 je študiral na École Normale Supérieure in leta 1971 doktoriral na univerzi Pierre in Marie Curie (Univerza VII) v Parizu. Leta 1967 je začel delati na Državnem centru za znanstvena raziskovanja (CNRS). Kot gostujoči profesor je deloval na štirih znanih ameriških univerzah. Od leta 1975 je profesor fizike na univerzi Pierre in Marie Curie in od leta 1982 profesor na École Normale Supérieure. Leta 2001 je postal profesor na Collège de France. Pred Nobelovo nagrado je dobil dvanajst visokih mednarodnih nagrad in priznanj. Je član francoske, brazilske, evropske in ameriške akademije znanosti. Vir: Wikipedia.

V kratkem zapisu je orisal svojo pot do Nobelove nagrade. Njegovo delo se je začelo pred petintridesetimi leti v raziskovalni skupini, ki se je oblikovala postopno. Doživela je vzpone in padce, a nazadnje je uspela. K temu je bistveno prispevalo intelektualno in materialno okolje v laboratoriju Kastler-Brossel na École Normale Supérieure. Po Harochevem mnenju je pomembno dolgoročno in zanesljivo financiranje. Ne kaže se zanašati le na kratkoročne načrte. Obžaluje, da je manj verjetno, da bodo današnji mladi raziskovalci našli tako okolje.





V Harochevi skupini najprej pripravijo Rydbergov atom v stanju ψ_1 . V točki R_1 s sunkom laserske svetlobe atom prevedejo v sestavljeno stanje $\psi_0 + \psi_1$. Po potovanju atoma skozi votlino do točke R_2 to stanje preide v $\psi_0 + \beta\psi_1$. Čas potovanja atoma lahko izberejo tako, da je $\beta = 1$, če v votlini ni fotona. Frekvenco sunka pa lahko nastavijo tako, da je $\beta = -1$, če je v votlini en foton. V merilniku D sestavljeno stanje preide v stanje ψ_1 . S tem ugotovijo β in po tem sklepajo, ali v votlini ni fotona ali je v njej en sam foton. Z uporabo več atomov lahko na ta način ugotovijo, ali je v votlini več fotonov.

Vir: Kraljeva švedska akademija znanosti.

gija razdrobljena na obroke, fotone. Foton ali več fotonov mikrovalov s frekvenco nekaj deset milijard nihajev na sekundo, ki ji ustreza valovna dolžina nekaj milimetrov, ujamejo med krogelnima zrcaloma v razmiku dobrih dveh centimetrov. Zrcali sta iz zelo natančno zglajenega niobija, ki je pri nizki temperaturi superprevoden in električno prevaja brez upora. Na vsem svetu ni bolj odbojnih zrcal. Med njima foton potuje 0,13 sekunde sem in tja, preden zaradi neželene motnje ni izgubljen. V velikem svetu se zdi to precej kratek čas, v svetu atomov pa lahko naredijo v času, v katerem svetloba obide Zemljo, veliko poskusov.

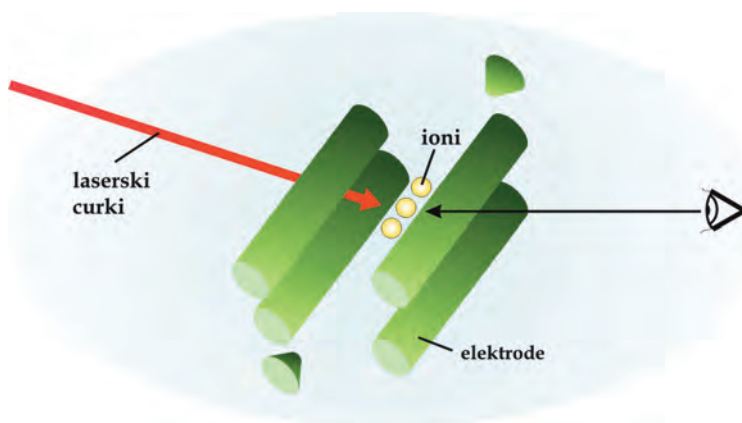
V kvantni mehaniki ima vezan sistem delcev, atom ali ion, stanja z določeno energijo. Sistem je lahko v dveh takih stanjih hkrati. Tedaj govorimo o *superpoziciji stanj* ali *sestavljenu stanju*. Haroche je sodeloval z Danielom Kleppnerjem, z enim od pobudnikov poskusov z *Rydbergovimi atomi*. Z lasersko svetlobo alkalijski atom z enim šibko vezanim zunanjim elektronom vzbudijo v stanje z veliko energijo. V takem stanju se elektron z veliko verjetnostjo giblje v svitku z obliko avtomobilske zračnice. Tak atom je tisočkrat večji kot v osnovnem stanju z najmanjšo energijo in občutljiv za majhne zunanje vplive. Z Rydbergovimi atomi rubidija, ki jih v določenih časovnih razmikih pošiljajo skozi votlino, otipajo fotone. Frekvenca, ki ustreza prehodu atoma iz devetinštirides-

tega vzbujenega stanja v petdeseto, se približno ujema s frekvenco ujetih mikrovalov. (Prehodu ustreza frekvenca 51 milijard nihajev na sekundo in energija 2,1 desetisotčin elektronvolta. Za 1 elektronvolt se poveča energija delca z enim osnovnim nabojem, ko v praznem prostoru preteče napetost 1 volt.) Po končnem stanju atomov sklepajo na število in lastnosti fotonov v votlini.

Ionske pasti

Weineland in njegovi sodelavci raziskujejo vpliv svetlobe na posamezne ione, to je atome, ki so jim odtrgali elektron in imajo pozitiven električni naboj. Weineland je spočetka sodeloval s Hansom Dehmeltom, ki si je leta 1989 z Wolfgangom Paulom delil polovico Nobelove nagrade »za razvoj tehnike ionske pasti«. Ion ali več ionov ujamejo v past, ki jo sestavljajo štiri podolgovate elektrode in še dve elektrodi ob osi na vsaki strani. Ione v pasti zadržijo s stalno električno napetostjo in z izmenično električno napetostjo s frekvenco mikrovalov.

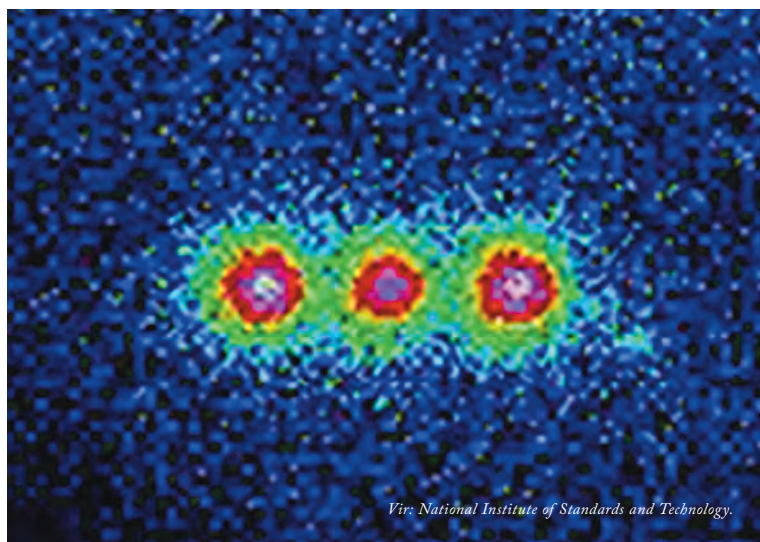
Ione v pasti z lasersko svetlobo »ohladijo«, to je, kolikor je mogoče, zmanjšajo njihovo gibanje. Leta 1997 so Steven Chu, Claude Cohen - Tannoudji in William Philips dobili Nobelovo nagrado »za razvoj metod za hlajenje in zajetje atomov v past z lasersko svetlobo«. Ion berilija z enim pozitivnim osnovnim nabojem je v pasti v visokem va-



V Weinelandovi skupini ion berilija ujamejo v past. Z lasersko svetlobo ga najprej spravijo v stanje s kolikor mogočo majhno energijo. Nato s sunki laserske svetlobe dosežejo, da preide v zaželeno stanje (zgoraj). Ion obsevajo z lasersko svetlobo z določeno valovno dolžino in opazujejo fluorescentno svetlobo, ki jo ion seva. V past so ujeli tri ione (spodaj).

Vir: Kraljeva švedska akademija znanosti. Tudi druge skupine raziskujejo posamične kvantne sisteme (Kvantni strojček, *Proteus*, 74 (2011/2012): 27–32).

Risba po predlogi: Janja Benedik.



Vir: National Institute of Standards and Technology.

kuumu pri temperaturi samo nekaj stopinj nad absolutno ničlo, kolikor mogoče ločen od okolice. Ima dve vrsti stanj. Stanja prve vrste, nihajna stanja, so povezana z gibanjem iona sem in tja v pasti. Osnovno nihajno stanje ϕ_0 ima najmanjšo energijo in prvo vzbujeno nihajno stanje ϕ_1 ima malo večjo energijo. (Energija je večja za 8,7 milijonin elektronvolta.) Ion niti v osnovnem stanju ne miruje. Stanja druge vrste, elektronska stanja, so povezana z elektroni v ionu. Osnovno elektronsko stanje ψ_0 ima

najmanjšo energijo in prvo vzbujeno elektronsko stanje ψ_1 ima malo večjo energijo. (Energija je večja za 5,2 milijonin elektronvolta. Navedeni podatki kažejo, da gre za zelo majhne spremembe energije.) V osnovnem elektronskem stanju sta spina jedra in najšibkeje vezanega elektrona vzporedna, v vzbujenem stanju pa nasprotno vzporedna. Najprej z laserskim hlajenjem dosežejo, da je ion v osnovnem nihajnem in osnovnem elektronskem stanju $\phi_0 \psi_0$. S sunkoma laserske svetlobe v nasprotnih smereh in z malo

različno valovno dolžino prevedejo ion v sestavljeno elektronsko stanje tako, da ostane v osnovnem nihajnem stanju:

$\alpha\phi_0\psi_0 + \beta\phi_0\psi_1 = \phi_0(\alpha\psi_0 + \beta\psi_1)$. V sestavljenem stanju iz osnovnega in prvega vzbujenega elektronskega stanja pri merjenju ne dobimo vmesne energije, ampak ali energijo osnovnega stanja z verjetnostjo α^2 ali energijo vzbujenega stanja z verjetnostjo β^2 . Nato z drugim laserskim sunkom povzročijo, da stanje $\phi_0\psi_1$ preide v stanje $\phi_1\psi_0$, tako da je ion v sestavljenem stanju:

$\alpha\phi_0\psi_0 + \beta\phi_1\psi_0 = (\alpha\phi_0 + \beta\phi_1)\psi_0$. S tem postopkom so sestavljeno stanje $\alpha\psi_0 + \beta\psi_1$ z neznanima α in β spremenili v stanje $\alpha\phi_0 + \beta\phi_1$ z enakima α in β . S tem so *prenesli kvantno informacijo*. Spremembe preverjajo tako, da obsevajo ion z lasersko svetlobo z določeno frekvenco, ki vzbudi fluorescenco. Ion absorbira to svetlobo in jo seva na vse strani. Izsevano svetlobo opazujejo neposredno ali zaznavajo z merilno napravo.

V kvantni mehaniki stanja ni mogoče »klonirati«. Iz sistema v sestavljenem stanju z danima α in β ne moremo dobiti drugega enakega sistema v stanju z enakima α in β , ne da bi porušili začetno stanje. Če bi bilo to mogoče, bi lahko natančno izmerili lego prvega sistema in hitrost drugega enakega sistema v enakem stanju. Tako bi natančno poznali lego in hitrost sistema v določenem stanju. To bi nasprotovalo načelu nedoločenosti, po katerem ni mogoče hkrati natančno izmeriti lege in hitrosti.

Zapis kvantne informacije in njen prenos je pomemben za *kvantni računalnik*. V takem računalniku bi morali povezati v celoto veliko enakih kvantnih sistemov, na primer ionov v pasti. Na eni strani bi morali sistemi delovati drug na drugega na nadzorovan način, na drugi pa bi morali biti neodvisni od okolice. Zato je do kvantnega računalnika še daleč, čeprav ne dvomijo, da prizadevanje skupin obeh nagrajencev in drugih gre v pravo smer. Veliko fizikov je prepričanih, da bo prej ali slej mogoče izdelati kvantni računalnik. Tak računalnik bi nekatere ra-

čune, na primer razstavitev zelo velikega števila na prafaktorje, opravil veliko hitreje od današnjih računalnikov.

V Weinelandovi skupini so ione v pasti izkoristili za natančno merjenje časa. Poleg berilijevega iona so v past ujeli še aluminijev ion. Ta ion ima primeren prehod med dvema stanjema, ki mu ustreza ultravijolična svetloba. Njena frekvenca je tisočkrat večja od frekvence mikrovalov, ki jih v atomskih urah na curek atomov cezija uporabljajo za natančno merjenje časa. Ionske ure so lahko tisočkrat natančnejše od cezijevih. Taka ura bi v času, odkar obstaja vesolje, prehitela ali zaostala le za nekaj sekund. Vendar aluminijevega iona ni mogoče hladiti z lasersko svetlobo. Aluminijevemu ionu v pasti pridružijo berilijev ion, ki ga je mogoče lasersko hladiti. Iona delujeta drug na drugega, tako da se posredno ohladi tudi aluminijev ion. Podrobno so raziskali delovanje iona na ion. V drugi uri so namesto aluminijevega iona ujeli magnezijevega. Ta se po masi manj razlikuje od berilijevega, zato je hlajenje učinkovitejše. Z obema urama so tudi preizkusili napovedi teorije relativnosti, ko sta se hitrosti ionov razlikovali za nekaj deset metrov na sekundo ali višini za tretjino metra.

Med kvantno in klasično fiziko

Erwin Schrödinger, eden od tvorcev kvantne mehanike, si je zamislil poskus. V prostoru so zaprti mačka, atom z radioaktivnim jedrom, merilnik in naprava, ki razbije posodico s smrtnim strupom, ko merilnik zazna razpad. Če počakamo en razpolovni čas, je jedro v sestavljenem stanju, ki ga v enakih deležih sestavljata nerazpadlo in razpadlo stanje. Mačka naj bi tedaj bila v ustreznem sestavljenem stanju, ki ga v enakih deležih sestavljata živo in mrtvo stanje. Izkušnje pa kažejo, da je mačka z gotovostjo živa ali z gotovostjo mrtva. Schrödingerjeva mačka opozori na težave s kvantnimi stanji v svetu velikih teles.

Dokler kvantnega sistema ne zmoti nežele-

ni vpliv iz okolice in ostane v sestavljenem stanju $\alpha\psi_0 + \beta\psi_1$ z danima α in β , govorimo o *koherenci*. Raznovrstnim in številnim vplivom okolice na veliko telo se ni mogoče izogniti. Zaradi njih koherentno stanje hitro preide v eno ali drugo stanje telesa. Pojav je znan kot *dekoherenca*. V velikih sistemih poteka dekoherenca tako hitro, da prehoda sploh ne opazimo. Weinelandovi in Harochevi skupini pa so uspeli poskusi, pri katerih so na opisana načina nadzorovali, kako je potekala dekoherenca. Podobne poskuse so že prej naredile tudi druge raziskovalne skupine.

Leta 1996 so Weineland in sodelavci berilijev ion v pasti pripravili v sestavljenem elektronskem stanju $\alpha\psi_0 + \beta\psi_1$. S sunki laserske svetlobe so vplivali samo na stanje ψ_0 ali samo na stanje ψ_1 in dosegli, da sta se stanji krajevno oddaljili drugo od drugega za osem stotisočin milimetra. Tako je »bil ion v dveh stanjih, ki sta bili v zelo veliki razdalji v primerjavi z velikostjo atoma«.

Istega leta so Haroche in sodelavci v votlino poslali Rydbergov rubidijev atom v sestavljenem stanju iz dveh stanj. Vlogo mačke je prevzelo sevanje v votlini. Atom je deloval na sevanje in ga je prevedel v stanje, ki je ustrezalo sestavljenemu stanju mačke. V votlino so poslali še drugi Rydbergov atom, ki ga je sevanje prevedlo v ustrezno sestavljeno stanje. Po primerjavi med stanjema prvega in drugega atoma so sklepali, kako se je spreminjalo sevanje. S spreminjanjem časovnega razmika, v katerem sta si atoma sledila, med 30 in 250 milijoninami sekunde, so zasledovali postopno dekoherenco. To je bilo prvič, da je bilo mogoče opazovati »postopen razvoj kvantnega vedenja v klasično«.

Literatura:

Haroche, S., 2012: *The secrets of my prizewinning research. Nature*, 490: 311.

Kraljeva švedska akademija znanosti, 2012: *Measuring and manipulating individual quantum systems. Scientific background on the Nobel Prize in Physics 2012.*

Kraljeva švedska akademija znanosti, 2012: *Particle control in a quantum world.*

Yam, P., 1997: *Bringing Schrödinger's cat to life. Scientific American*, 276 (1997): 104-109 (6).