

## Partikeldressyr i kvantvärlden

**Serge Haroche** och **David J. Wineland** har på var sitt håll upfunnit och utvecklat banbrytande metoder för att mäta och styra enskilda partiklar och fått dem att utföra konster enligt kvantfysikens regler på ett sätt som man tidigare inte trodde var möjligt.

Pristagarnas experiment har öppnat dörren till direkt observation av enskilda kvantsystem utan att förstöra dem. Med hjälp av sinnrikt utformad apparatur har de lyckats mäta ytterst ömtåliga kvanttillstånd. Forskningen har nu också tagit de allra första stegen på vägen mot en ny typ av supersnabba datorer baserade på kvantfysik. Pristagarnas metoder har även lett till konstruktionen av extremt noggranna klockor som är mer än hundrafalt exaktare än dagens cesiumur.

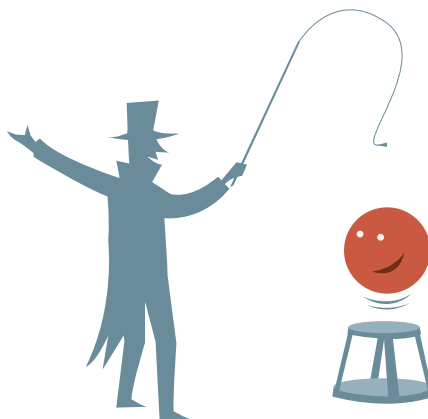
På mikronivån, när det kommer till enskilda ljus- eller materiepartiklar, börjar kvantfysikens lagar att gälla istället för den klassiska fysikens. Men enskilda partiklar låter sig sällan isoleras, och de förlorar sina säregna kvantegenskaper så snart de växelverkar med sin omgivning. Många kvantfysikaliska fenomen har därför aldrig kunnat observeras direkt, experimenten fick genomföras bara i tanken.

Båda pristagarna är företrädare för forskningsfältet kvantoptik, där man studerar växelverkan mellan ljus och materia och som utvecklats intensivt sedan mitten av 1980-talet. Deras metoder har mycket gemensamt. David Wineland håller elektriskt laddade atomer, joner, i en fälla och mäter och styr dem med ljus, alltså fotoner. Serge Haroche gör tvärtom – fångar fotoner, och mäter och styr dem med hjälp av atomer som sänds genom fällan.

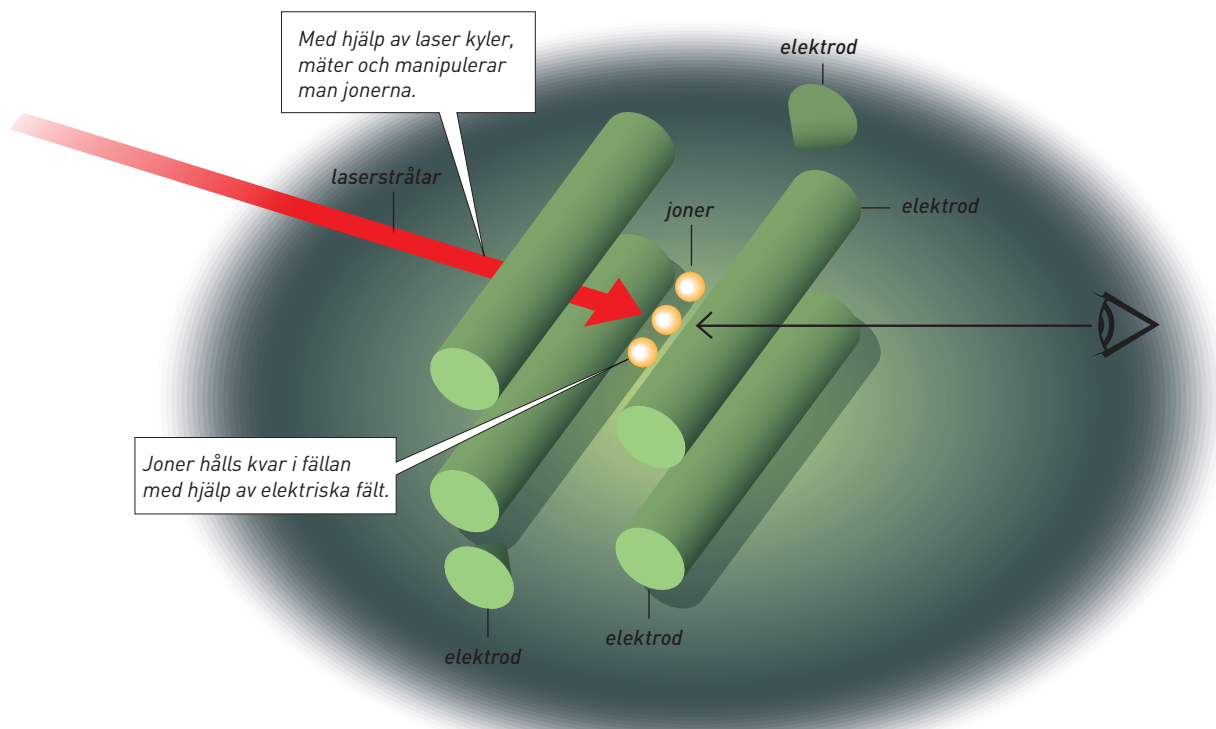
### Dresserar enskilda joner

På David Winelands laboratorium i Boulder, Colorado, hålls elektriskt laddade atomer, joner, fångade i en fälla med hjälp av elektriska fält. För att minska störningarna från värmerörelser och strålning, görs experimenten i vakuum och partiklarna kyls ner till en temperatur nära den absoluta nollpunkten.

En av hemligheterna bakom genombrottet är att bemästra konsten att med laserstrålar ytterligare minimera jonens rörelser, så att den hamnar i sitt lägsta energitillstånd. Då kan många kvantfenomen studeras inuti jonfällan. Jonen kan till exempel, med noga utvalda laserpulser, försättas i ett sammansatt tillstånd, av fysikerna kallat en *superposition*. Detta innebär att jonen kan röra sig samtidigt på olika sätt i fällan eller så kan den befinna sig i olika energitillstånd samtidigt vilket man gör genom att med en laserpuls lyfta den superkylda jonen ett snäpp upp i energinivåerna. Om laserpulsens precis räcker till att lyfta jonen halvvägs mot en högre energinivå, lämnas jonen mitt emellan, i en superposition av tillstånd, där sannolikheten för att hamna i båda energinivåerna är lika stor. På så sätt kan den kvantfysikaliska superpositionen av jonens energitillstånd studeras.



**Figur 1.** Partikeldressyr gav Nobelpriset. Ingen har tidigare lyckats att få enskilda infångade partiklar att utföra konster enligt kvantfysikens alla regler.



**Figur 2.** Jonfällan i David Winelands laboratorium i Boulder. En positivt laddad berylliumjon hålls på plats i vakuum med hjälp av elektriska fält. En av hemligheterna bakom genombrottet är att bemästra konsten att med laserstrålar ytterligare minimera jonens rörelser, så att den hamnar i sitt lägsta energitillstånd. Då kan många kvantfenomen studeras inuti jonfällan.

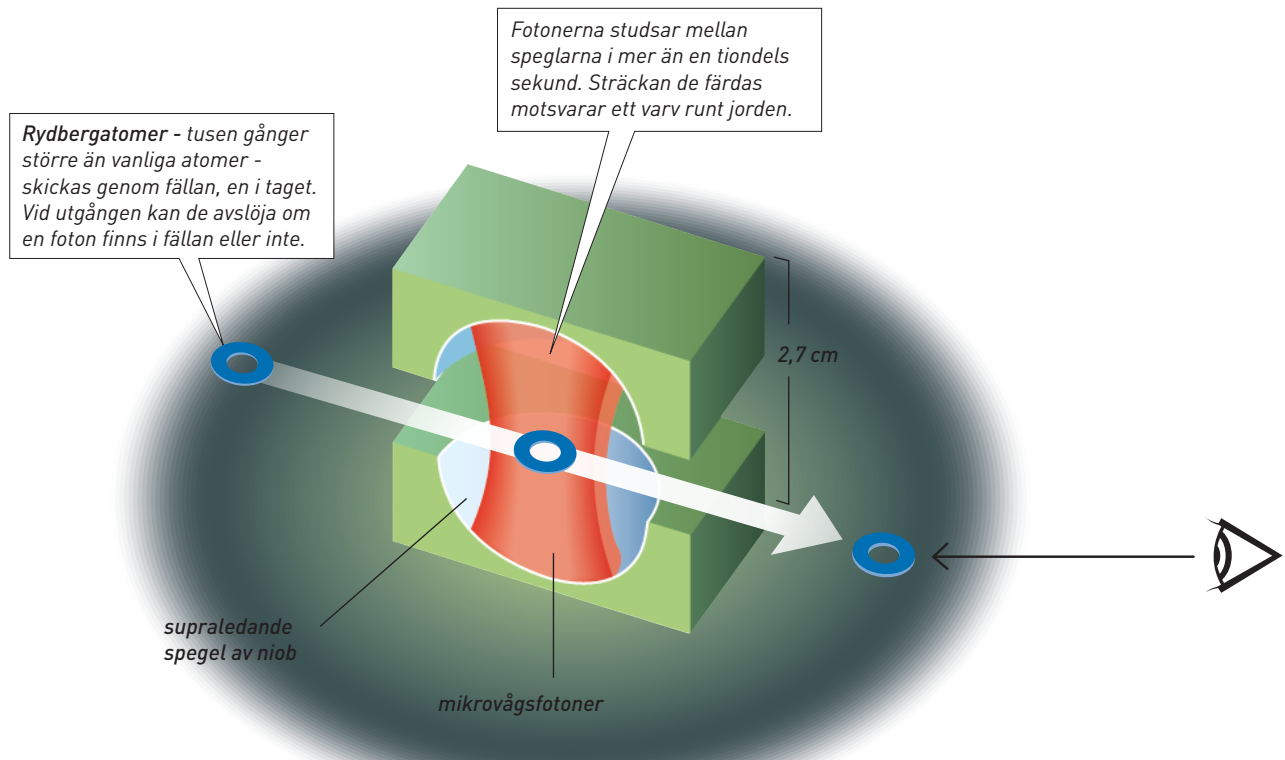
## Dresserar enstaka fotoner

Serge Haroche och hans grupp tillämpar ett annat sätt att undersöka kvantvärldens hemligheter. På laboratoriet i Paris får mikrovågsfotoner studsa fram och tillbaka i en liten fälla bestående av två speglar knappt tre centimeter ifrån varandra. Spegelarna av det metalliska ämnet niob är supraledande och kylda till nära den absoluta nollpunkten. Tack vare deras reflektionsförmåga som överglänser allt annat i världen överlever en foton i fällan rekordlång tid – över en tiondel av en sekund. Innan den försvinner hinner fotonen faktiskt färdas lika långt som ett varv runt jorden – 40 000 kilometer – och vara med om diverse försök på vägen.

Både för att styra mikrovågsfotonernas kvanttillstånd och för att mäta dem används specialpreparerade atomer, kallade Rydbergatomer efter den svenske fysikern Johannes (Janne) Rydberg. En Rydbergatom har en radie på 125 nanometer vilket är tusenfalt större än en vanlig atom. Dessa gigantiska baddringsformade atomer sänds in i fällan en i taget med en noga utvald hastighet så att växelverkan med mikrovågorna sker på ett kontrollerat sätt.

När Rydbergatomen sedan lämnar fällan är mikrovågsfotonerna kvar därinne. Men mötet med mikrovågsfältet får atomens elektroniska tillstånd att skifta fas, det vill säga att om atomen beskrivs som en våg så har vågens toppar och dalar förskjutits, vilket kan bekräftas vid utgången. På så sätt avslöjar Rydbergatomen om den har stött på någon mikrovågsfoton i fällan eller inte. Fanns det inget därinne, är atomens fas vid utgången oförändrad. Det går alltså att mäta närvaron av en foton utan att förstöra den.

Med en liknande metod kunde Serge Haroche och hans grupp räkna fotonerna i fällan, ungefär som stenkulor i en skål. Det låter enkelt, men är en enastående framgång för experimentell fingerfärdighet, eftersom fotonerna – till skillnad från stenkulorna – förstörs blixtnabbt om de kommer i kontakt med omvärlden. Med metoder utvecklade för fotonräkning kunde Haroche och hans medarbetare komma vidare och för första gången mäta ett kvantsystem och följa dess öde steg för steg i realtid, allteftersom Rydbergatomerna skickades in en och en i fällan.



**Figur 3.** Fotonfällan vid Serge Haroches laboratorium i Paris. I vakuum och vid en temperatur nära den absoluta nollpunkten hålls fotonerna studsande mellan två speglar. Tack vare speglarnas fantastiska reflektionsförmåga kan fotonerna hållas kvar i fällan en rekordlång tid på över en tiondel av en sekund, så forskarna hinner utföra kvantexperiment med de infångade fotonerna, utan att de blir absorberade eller förstörda på annat sätt.

## Kvantfysikens paradoxer

Kvantfysik beskriver en för ögat osynlig mikroskopisk värld där saker och ting händer som motsäger vår intuition och erfarenhet. I kvantvärlden råder osäkerhet och ren slump. Individuella partiklar uppträder enligt andra regler än när de klumpats ihop till vanlig materia. Ett exempel är den ovan omnämnda superpositionen, då en partikel kan anta flera olika kvanttillstånd samtidigt. Vi kan inte föreställa oss att en stenkula skulle kunna uppta två platser samtidigt, men det kan den göra om den vore en kvant-stenkula. En superposition av kvantkulans tillstånd talar om exakt med vilken sannolikhet kulan har det ena eller det andra läget.

Hur kommer det sig då att vi till vardags inte upptäcker dessa minst sagt bisarra sidor av vår värld? Varför kan vi inte se en superposition av kvanttillstånd hos en stenkula? Var går gränsen mellan kvantverkligheten och vår egen? Frågan ställdes på sin spets av den österrikiske fysikern och Nobelpristagaren (fysik 1933) Erwin Schrödinger. Liksom andra grundare av kvantteorin kämpade han länge med att begripa och tolka dess utsagor. Så sent som 1952 skrev han: ”Vi experimenterar aldrig med bara en elektron eller en atom eller en (liten) molekyl. I våra tankeexperiment antar vi ibland att vi gör så, och detta leder ständigt till orimliga konsekvenser...”.

För att belysa de absurda konsekvenserna av att kliva mellan den lilla kvantvärlden och vår vanliga värld, där den klassiska fysiken råder, beskrev Schrödinger ett tankeexperiment med en katt: Schrödingers katt sitter instängd i en låda, och är helt isolerad från omvärlden. Lådan är försedd med en flaska dödlig cyanid. Flaskan öppnas bara då en radioaktiv atomkärna sönderfaller. Sönderfallet styrs av kvantmekanikens sannolikhetslagar. Tittar man inte efter, så är atomen i en superposition av tillstånd och har både sönderfallit och inte. Och då kan katten i lådan anses vara både död och levande. Är man däremot det minsta nyfiken och kikar in i lådan får man kvanttillståndet, som är känsligt för kontakt med omvärlden, att kollapsa omedelbart till en av de två möjliga utgångarna, död eller levande. Helt bisarrt, tyckte Schrödinger, som till och med lär ha försökt att be om ursäkt för att ha bidragit till den kvantfysikaliska förvirringen.



**Figur 4.** Schrödingers katt. År 1935 föreslog kvantfysikern och Nobelpristagaren Erwin Schrödinger ett tankeexperiment med en katt i en låda för att belysa kvantvärldens paradoxer när de översätts till vår vanliga värld. Ett kvantsystem, partiklar, atomer och annat i mikrovärlden, kan befinna sig i två tillstånd samtidigt, något som i fysiken kallas superposition.

I Schrödingers tankeexperiment är katten i en superposition av tillstånd, och kan därför anses vara både levande och död innan man tittar efter i lådan. Men superpositionen försvinner så fort kvantsystemet möter omvärlden. Så när man väl kikar in, kollapsar kattens dubbla kvanttillstånd och man finner katten antingen levande eller död.

Båda pristagarna lyckades kartlägga kvantkatten när den möter verkligheten utanför kvantvärlden. I många uppfinningsrika experiment har de kunnat visa hur själva mätprocessen får kvantsystemet att kollapsa och förlora sina kattlika egenskaper. Fast istället för katten fångar Haroche och Wineland kvantpartiklar och försätter dem just i ett sådant dubbelt tillstånd som Schrödinger beskrev med sin katt. Under tiden kan de undersöka partiklarna, kontrollera dem och räkna. Dressera men inte röra. För då brister förtrollningen.

I Haroches fälla försätts mikrovågorna i ett kattliknande tillstånd där de samtidigt har två motriktade faser, ungefär som ett stoppur med en visare som går med- och moturs på samma gång. Så kunde han undersöka mikrovågsfältet inuti fällan med hjälp av Rydbergatomerna. Växelverkan mellan fältet och atomen sker genom ytterligare en egendomlig kvantegenskap hos partiklarna – en så kallad sammanflätning. Även denna beskrevs av Erwin Schrödinger och innebär att två eller fler kvantpartiklar utan direkt kontakt ändå känner av varandras egenskaper. Genom att utnyttja sammanflätningen mellan mikrovågsfältet i fällan och Rydbergatomerna kunde Haroche och hans grupp följa kvantsystemets liv och död genom att steg för steg, atom för atom, mäta övergången från den kvantfysikaliska superpositionen av tillstånd till den klassiska fysikens väldefinierade tillstånd.

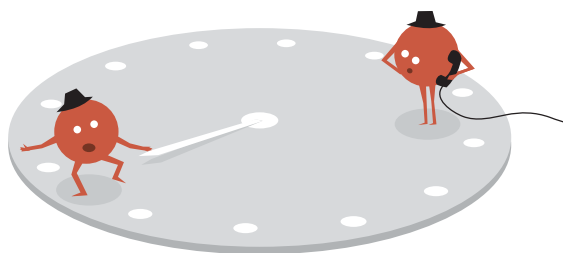
## På tröskeln till en ny datorrevolution

En möjlig tillämpning av jonfällorna som många forskare drömmer om är en kvantdator. I dagens klassiska dator är den minsta informationsbäraren en bit, som antingen kan vara 1 eller 0. I en kvantdator däremot kan den grundläggande byggstenen, en kvantbit, vara 0 och 1 på samma gång. Två kvantbitar kan anta fyra värden samtidigt – 00, 01, 10 och 11; och varje ytterligare kvantbit fördubblar antalet möjliga tillstånd. För  $n$  kvantbitar blir det  $2^n$  tillstånd, och ett kvantsystem med enbart 300 partiklar kan samtidigt hantera  $2^{300}$  värden. Detta är fler än det finns partiklar i hela universum. Därmed skulle en kvantdator kunna utföra vissa beräkningar oerhört mycket snabbare än dagens datorer.

Winelands grupp var först i världen med att demonstrera en kvantoperation med två kvantbitar. Det finns alltså inga principiella hinder för att det som redan fungerar med några enstaka partiklar inte ska kunna göras med många fler. Men den praktiska utmaningen går knappast att överdriva. En kvantdator måste då uppfylla två motstridiga krav. Kvantbitarna måste hållas tillräckligt isolerade från omgivningen för att inte kollapsa. Men de måste också kunna kommunicera med varandra och lämna ifrån sig resultatet. Måhända kommer kvantdatoren att förändra vår tillvaro under detta sekel på samma radikala sätt som den digitala klassiska datorn gjorde under det förra seklet.

## Nya klockor

David Wineland och hans forskargrupp har utifrån jonfällans kvantfysik konstruerat en klocka som är hundra gånger noggrannare än den nuvarande klockstandarden, cesiumklockan. Till skillnad från cesium som tickar i mikrovågsområdet, använder jonklockor synligt ljus, därav namnet – optisk klocka. En optisk klocka kan bestå av enbart en jon eller av två joner. Med två joner kommer den ena av dem att ange tiden medan den andra läser av klockan och samtidigt ser till att inte förstöra dess kvanttillstånd. Precisionen hos denna miniklocka är redan idag bättre än  $10^{-17}$ , vilket innebär att den nya optiska klockan bara skulle ha släpat efter med cirka fem sekunder under universums hela livstid – från big bang, för 13,75 miljarder år sedan, till i dag.



**Figur 5.** Optisk klocka. En praktisk användning av jonfällan är optisk klocka där två joner i samarbete håller tiden hundra gånger noggrannare än dagens standardklocka – cesiumur. Den ena jonen stampar takten, den andra håller reda på tiden och meddelar den vidare utan att förstöra ionernas kvanttillstånd.

Med en sådan exakt tidsmätning kan flera av naturens gåtfulla och fascinerande effekter undersökas. Som tidens flöde. Enligt relativitetsteorin är tid sammanlänkat med rörelse och gravitation. Ju högre hastighet eller ju högre gravitation desto långsammare flyter tiden. Det är sällan vi i praktiken märker detta, men en konsekvens av teorin är att atomklockorna på GPS-satelliter rutinmässigt måste korrigeras, eftersom gravitationen är svagare på flera hundra kilometers höjd ovan jordytan. Nu kan den nya optiska klockan mäta skillnaden i tidsflödet redan när hastigheten ändras med mindre än 10 meter i sekunden eller när gravitationen ändras i och med en höjdskillnad på bara 30 centimeter.

---

## LÄNKAR OCH LÄSTIPS

Mer information om årets priser, bland annat en vetenskaplig bakgrundsartikel på engelska, finns på Kungl. Vetenskapsakademiens webbplats, <http://kva.se> och på <http://nobelprize.org>. Där kan man också se presskonferensen som webb-TV. Mer information om utställningar och aktiviteter kring Nobelpriset och Ekonomipriset finns på [www.nobelmuseum.se](http://www.nobelmuseum.se).

### Populärvetenskapliga artiklar

**Björk, G. och Karlsson, A.** (2003) Schrödingers kattungar, *Forskning & Framsteg*, nr 1.

**Monroe C. R. och Wineland, D. J.** (2008) Quantum Computing with Ions, *Scientific American*, augusti.

**Yam, P.** (1997) Bringing Schrödinger's Cat to Life, *Scientific American*, juni.

---

## PRISTAGARE

### SERGE HAROCHE

Fransk medborgare. Född 1944 (68 år) i Casablanca, Marocko. Fil.dr 1971 vid Université Pierre et Marie Curie, Paris, Frankrike. Professor vid Collège de France och Ecole Normale Supérieure Paris, Frankrike.

[www.college-de-france.fr/site/en-serge-haroche/biography.htm](http://www.college-de-france.fr/site/en-serge-haroche/biography.htm)

### DAVID J. WINELAND

Amerikansk medborgare. Född 1944 (68 år) i Milwaukee, WI, USA. Fil.dr 1970 vid Harvard University, Cambridge, MA, USA. Group Leader och NIST Fellow vid National Institute of Standards and Technology (NIST) och University of Colorado Boulder, CO, USA.

[www.nist.gov/pml/div688/grp10/index.cfm](http://www.nist.gov/pml/div688/grp10/index.cfm)

Vetenskapsredaktörer: Lars Bergström, Björn Jonson, Per Delsing och Anne l'Huillier, Nobelkommittén för fysik  
Text: Joanna Rose  
Illustrationer där inget annat anges: ©Johan Jarnestad/Kungl. Vetenskapsakademien  
Redaktör: Annika Moberg  
©Kungl. Vetenskapsakademien