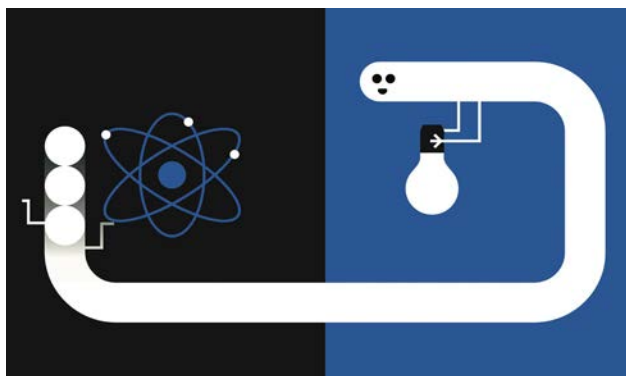


Kvantegenskaper på mänsklig skala

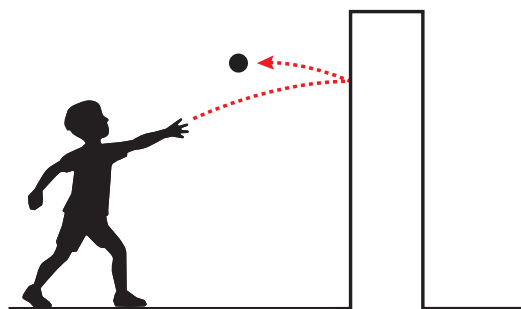
I en serie experiment demonstrerade årets Nobelpristagare i fysik, **John Clarke**, **Michel H. Devoret** och **John M. Martinis**, hur ett par av kvantmekanikens grundläggande egenskaper kan bli påtagliga i ett system som är så stort att det går att hålla i händerna. Deras supraledande elektriska system kunde tunnla från ett tillstånd till ett annat, som om det gick rakt genom en vägg. De visade också att systemet tog upp och avgav energi i doser av bestämda storlekar, precis som kvantmekaniken förutsäger.

En serie banbrytande experiment

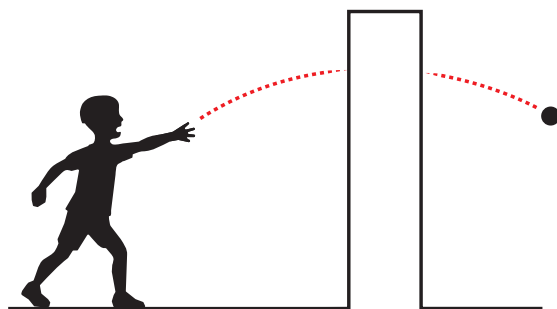
Kvantmekaniken beskriver egenskaper som har betydelse på skalor som involverar enstaka partiklar. I kvantfysiken kallas fenomen på sådana skalor *mikroskopiska*, även när de är mycket mindre än det som syns i ett optiskt mikroskop. Beteckningen står i kontrast mot *makroskopiska* fenomen som består av ett stort antal partiklar. En vanlig boll är till exempel uppbyggd av ett astronomiskt stort antal molekyler och i vardagen ser vi inga kvantmekaniska egenskaper hos den. Vi vet att bollen kommer att studsas tillbaka varje gång den kastas mot en vägg. En partikel kan däremot ibland passera rakt igenom ett motsvarande hinder i sin mikroskopiska värld och dyka upp på andra sidan. Detta kvantmekaniska fenomen kallas för *tunnling*.



Årets Nobelpris i fysik belönar experiment som demonstrerade att kvantmekanisk tunnling kan bli direkt märkbar även på en makroskopisk skala som involverar ett stort antal partiklar. John Clarke, Michel Devoret och John Martinis genomförde 1984 och 1985 en serie experiment vid University of California, Berkeley. De byggde upp en elektrisk krets med två supraledare, det vill säga komponenter som kan leda ström helt utan elektriskt motstånd, separerade med ett tunt skikt av ett material som inte leder ström alls. Med det här experimentet visade de hur de kunde styra och utforska ett fenomen där alla de laddningsbärande partiklarna i supralederen tillsammans uppför sig som om de vore en enda partikel som fyller hela den elektriska kretsen.

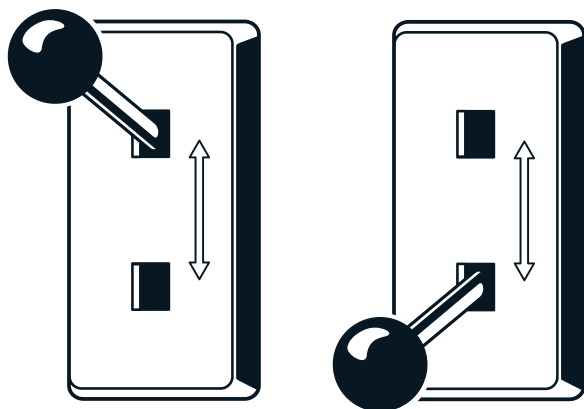


Om du kastar en boll mot en vägg kan du räkna med att den studsar tillbaka varje gång.



Om bollen plötsligt dyker upp på andra sidan väggen skulle du bli väldigt förvånad. I kvantmekaniken kallas sådant för tunnling, och det är precis den sortens fenomen som gett kvantmekaniken sitt rykte om att vara konstig och ointuitiv.

Det här partikelliknande systemet är instängt i ett tillstånd där strömmen flyter utan någon elektrisk spänning – ett tillstånd som det inte har tillräckligt mycket energi för att kunna ta sig ur. I experimentet visar systemet sin kvantkaraktär genom att ändå ta sig ut ur det spänningslösa tillståndet genom tunnling, så att en elektrisk spänning dyker upp. Pristagarna kunde också visa att systemet är kvantiserat, det vill säga att det endast tar upp eller avger energi i bestämda portioner.



I experimentet finns först ingen elektrisk spänning. Det är som om det var en brytare som stod på "av", men blockerad från att slå om. Utan kvantmekanikens effekter skulle detta tillstånd förbli oförändrat.

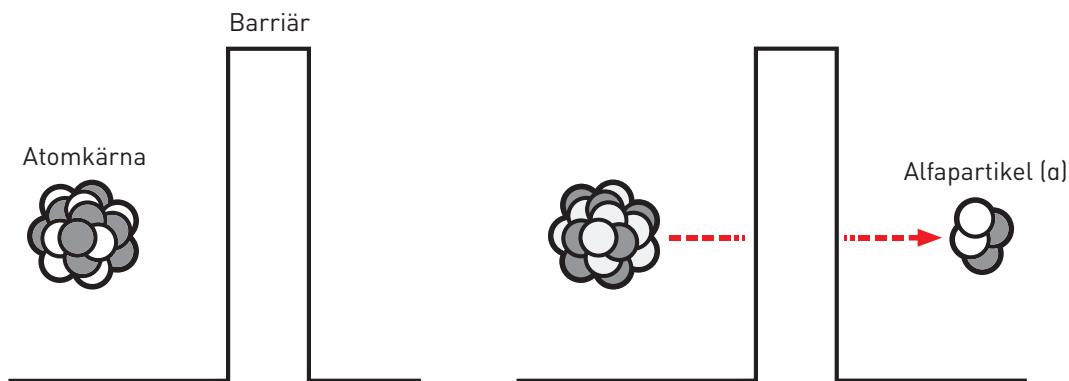
Plötsligt syns en spänning. Vi kan tänka oss att brytaren har ändrats från "av" till "på" trots att det fanns ett hinder emellan lägena. Det som har skett i experimentet kallas makroskopisk kvanttunnling.

Tunnlar och övergångar

Till sin hjälp hade pristagarna begrepp och experimentella verktyg som hade arbetats fram under årtionden. Tillsammans med relativitetsteorin utgör kvantfysiken fundamentet för det som kommit att kallas den moderna fysiken, och i hundra år har forskare utforskat vad den innebär.

Att enskilda partiklar kan tunnla var ett välkänt fenomen. Redan 1928 förstod fysikern George Gamow att tunnling ligger bakom att vissa tunga atomkärnor har en tendens att falla sönder på ett speciellt sätt. Samspelet mellan krafterna i atomkärnan sätter upp en barriär som håller kvar de partiklar som ingår i kärnan. En flisa av atomkärnan kan trots detta ibland knoppas av, dyka upp utanför barriären och fly – och kvar finns en kärna som har omvandlats till ett annat grundämne. Utan tunnling skulle den här sortens kärnsönderfall inte kunna ske.

Tunnling är en kvantmekanisk process, vilket bland annat innebär att slumpen spelar en roll. Vissa typer av atomkärnor har en hög och bred barriär och det kan ta lång tid innan en bit av kärnan dyker upp utanför den, medan andra har närmare till sönderfallet. Tittar vi bara på en enda individuell atom går det inte att förutsäga när detta kommer att hända, men genom att följa sönderfallen hos en stor



I snart 100 år har fysiker känt till att tunnling behövs för en typ av kärnsönderfall (alfasönderfall). En liten bit av atomkärnan bryter sig loss och dyker upp utanför kärnan.

mängd atomkärnor av samma slag går det att mäta upp en förväntad tid innan tunnlingen inträffar. Det vanligaste måttet att beskriva detta med är halveringstid, som anger hur lång tid det tar innan hälften av atomkärnorna i ett prov har sönderfallit.

Fysiker började tidigt fundera över hur det skulle vara möjligt att undersöka en typ av tunnling som involverar mer än bara en enskilda partikel i taget. En ingång till nya typer av experiment kom från ett fenomen som uppstår när vissa material kyls ner kraftigt.

I ett vanligt elektriskt ledande material flyter ström på grund av att det finns elektroner som är fria att röra sig i hela materialet. I vissa material kan de enskilda elektronerna som knuffas och bråkar sig fram genom ledningen ordna sig i en synkroniserad dans som flyter helt utan motstånd. Materialet har blivit supraleddande. Elektronerna är då ihopkopplade två och två till något som kallas Cooperpar, efter Leon Cooper som tillsammans med John Bardeen och Robert Schrieffer ställde upp den detaljerade beskrivningen av hur supraleddare fungerar (Nobelpriset i fysik 1972).

Cooperparen uppför sig helt annorlunda än vanliga elektroner. Elektroner har mycket stor integritet och håller sig en bit ifrån varandra. Två elektroner kan inte vara på samma plats om de har samma egenskaper. Det kan vi se till exempel i en atom, där elektronerna fördelar sig i olika energinivåer som kallas skal. När elektronerna i en supraleddare slår ihop sig två och två tappar de dock något av sin individualitet. Medan två enskilda elektroner alltid skiljer sig från varandra kan två Cooperpar däremot vara exakt likadana. Det leder till att Cooperparen i en supraleddare kan beskrivas tillsammans som en enda enhet, ett enda kvantmekaniskt system. Med kvantmekanikens språk beskrivs de då med en och samma *vågfunktion*. Vågfunktionen beskriver sannolikheterna att observera systemet i ett visst läge och med vissa egenskaper.



I en vanlig elektrisk ledare knuffas elektronerna med varandra och med materialet.



När ett material blir supraleddande kopplar elektronerna ihop sig två och två i *Cooperpar*, och strömmar då utan motstånd. Luckan i bilden markerar Josephsonövergången.



Cooperparen kan uppföra sig som om de allihop tillsammans vore en enda partikel som fyller hela den elektriska kretsen. I kvantmekaniken beskrivs det här samlade tillståndet med en gemensam *vågfunktion*. I pristagarnas experiment är det den gemensamma vågfunktionens egenskaper som spelar huvudrollen.

Om två supraleddare kopplas ihop med en tunn isolerande barriär som bryter supraleddningen uppstår en Josephsonövergång. Komponenten har fått sitt namn från Brian Josephson, som gjorde kvantmekaniska beräkningar för övergången. Han upptäckte att det uppstår intressanta fenomen när vågfunktionerna på vardera sida av övergången samspelar (Nobelpriset i fysik 1973). Josephsonövergången fick mycket snabbt användningsområden, bland annat för att göra noggranna mätningar av naturkonstanter och magnetfält.

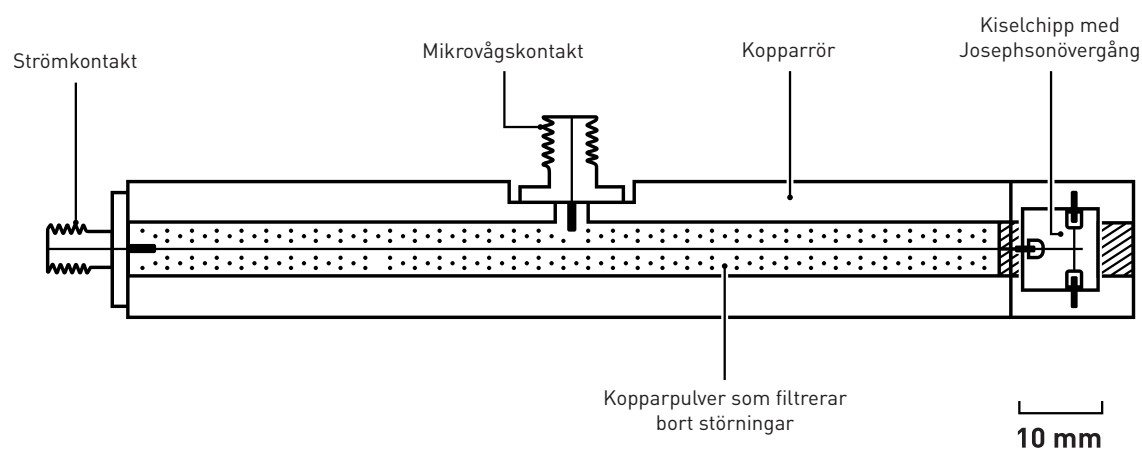
Konstruktionen verkade också ge verktyg för att utforska kvantmekanikens grunder på nya sätt. Bland annat gjorde Anthony Leggett (Nobelpriset i fysik 2003) teoretiska arbeten om makroskopisk kvanttunnling vid en Josephsonövergång och inspirerade till nya typer av experiment.

Forskargruppen skrider till verket

De här frågorna passade precis ihop med John Clarkes forskningsintressen. Han var professor vid University of California, Berkeley i USA, dit han kommit efter att han hade fått sin doktorsexamen från University of Cambridge i England 1968. I Berkeley byggde han upp sin egen forskargrupp och specialiserade sig på att utforska olika fenomen med hjälp av supraleddare och Josephsonövergången.

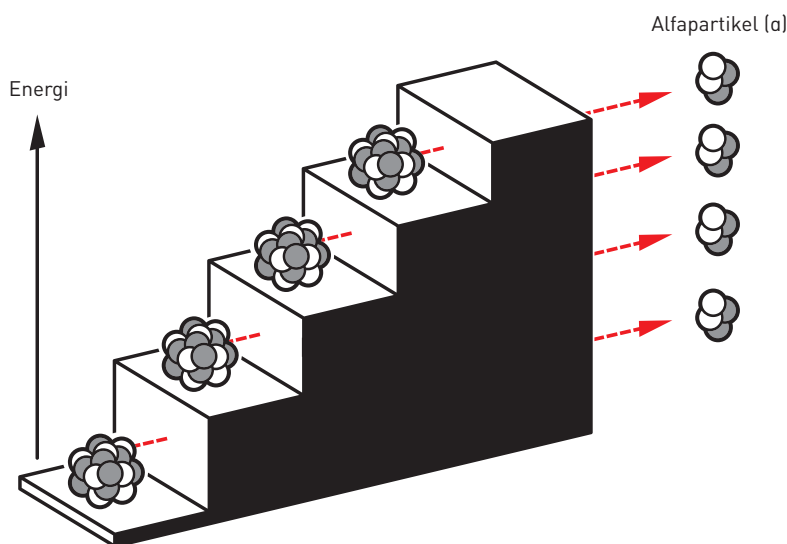
Vid mitten av 1980-talet hade Michel Devoret anslutit sig till John Clarkes forskargrupp som postdoktor efter att han hade disputerat i Paris. I forskargruppen fanns också doktoranden John Martinis. Tillsammans tog de sig an utmaningen att påvisa makroskopisk kvanttunnling i praktiken. Det krävdes stor experimentell omsorg och skicklighet för att skärma av alla störningar som kunde påverka försöket. De lyckades renodla och mäta alla de olika egenskaperna hos sin elektriska krets så att de förstod den i detalj.

För att sedan mäta kvantfenomenen matade de in en svag ström i Josephsonövergången och mätte spänningen, som har att göra med det elektriska motståndet i kretsen. Spänningen över Josephsonövergången var till att börja med noll, som förväntat. Detta beror på att vågfunktionen för systemet är instängd i ett tillstånd som inte låter någon spänning uppstå. Sedan studerade de hur lång tid det tog innan systemet tunnlade ut ur detta tillstånd så att en spänning uppstod. Eftersom kvantmekaniken för med sig en slumpfaktor gjorde de ett stort antal mätningar och ritade upp sina resultat i form av kurvor. Ur dem kunde de läsa av hur länge det spänningslösa tillståndet fanns kvar. Det liknar hur mätningar av halveringstiden för atomkärnor bygger på statistik av många sönderfall.



John Clarke, Michel Devoret och John Martinis byggde ett experiment med en supraleddande elektrisk krets. Det chipp där det studerade systemet fanns var ungefär en centimeter stort. Tidigare hade tunnling och energikvantisering studerats i system med bara några få partiklar – här visade sig dessa fenomen i ett kvantmekaniskt system som bestod av miljarder Cooperpar och som fyllde hela supraleddaren på chippet. På så vis tog experimentet kvantmekanikens effekter från mikroskopisk till makroskopisk skala.

Tunnlingen visar att Cooperparen i experimentuppställningen i sin gemensamma dans betar sig som en enda stor partikel. Ännu en bekräftelse på detta fick forskarna när de kunde se att systemet hade kvantiserade energinivåer. Kvantmekaniken har fått sitt namn från observationen att energin i mikroskopiska processer är uppdelade i separata paket, *kvanta*. Pristagarna matade in mikrovågor med olika våglängd i tillståndet som saknade elektrisk spänning. Vid vissa våglängder absorberades mikrovågorna, och då lade sig systemet på en högre energinivå. Försöket visade att det spänningslösa tillståndet varade under kortare tid när systemet innehöll mer energi. Det här är precis vad kvantmekaniken förutsäger och fungerar likadant som för en mikroskopisk partikel som är instängd bakom en barriär.



Ett kvantmekaniskt system bakom en barriär kan innehålla olika mycket energi, men det kan bara ta till sig eller avge energi i bestämda trappsteg. Detta kallas för att systemet är kvantiserat. På en högre energinivå går tunnlingen lättare än på en lägre nivå. Det betyder att ett system med mer energi statistiskt sett hålls instängt kortare tid än ett med mindre energi.

Till praktisk och teoretisk nytta

Experimentet har konsekvenser för förståelsen av kvantmekaniken. Andra typer av kvantmekaniska effekter som visar sig på makroskopisk skala består av många enskilda smådelar och deras separata kvantegenskaper. De mikroskopiska komponenterna läggs då ihop med varandra och ger upphov till makroskopiska fenomen som exempelvis laserljus, supraledning och supraflytande vätskor. I det här experimentet skapas i stället den makroskopiska effekten, att spänning dyker upp, av ett tillstånd som i sig är makroskopiskt – i form av en gemensam vågfunktion för många partiklar.

Teoretiker som Anthony Leggett har jämfört pristagarnas makroskopiska kvantsystem med Erwin Schrödingers berömda tankeexperiment med en katt i en låda, som skulle vara både levande och död samtidigt om vi inte tittar efter. (Erwin Schrödinger fick Nobelpriset i fysik 1933.) Avsikten med tankeexperimentet var att visa hur absurd denna tanke är, eftersom kvantmekanikens speciella egenskaper oftast är fullständigt utsuddade på makroskopisk skala. Det går inte att göra ett laboratorieexperiment som påvisar kvantegenskaper hos en hel katt.

Däremot har Anthony Leggett argumenterat för att experimentet av John Clarke, Michel Devoret och John Martinis visade att det finns företeelser som involverar ett mycket stort antal partiklar och som tillsammans betar sig precis som kvantmekaniken förutsäger. Det makroskopiska systemet som består av ett stort antal Cooperpar är fortfarande många storleksordningar mindre än en kattunge – men eftersom experimentet mäter kvantmekaniska egenskaper som gäller för systemet som helhet är det för en kvantfysiker ganska likt Schrödingers tänkta katt.

Den här sortens makroskopiska kvanttillstånd ger nya möjligheter till experiment med de fenomen som härskar i partiklarnas mikroskopiska värld. Ett sådant tillstånd kan betraktas som en form av artificiell atom i stor skala – en atom med kablar och kontakter som kan kopplas in i nya försök eller utnyttjas i ny kvantteknik. Artificiella atomer används till exempel för att simulera andra kvantsystem och förstå dem bättre.

Ett annat exempel är kvantdatorexperiment som John Martinis senare gjorde, där han utnyttjade just den energikvantisering han och de andra två pristagarna hade visat på. Han använde en krets med kvantiserade tillstånd som informationsbärande enhet – en *kvantbit*. Det lägsta energitillståndet och det första steget upp i energi fick fungera som nolla och etta. Supraledande kretsar är en av de olika tekniker som utforskas för att konstruera framtidens kvantdatorer.

Årets pristagare har alltså bidragit både till praktisk nytta i fysikens laboratorier och med ny information för den teoretiska förståelsen av vår fysiska värld.

LÄS MER

Mer information om årets priser, bland annat en vetenskaplig bakgrundsartikel på engelska, finns på Kungl. Vetenskapsakademiens webbplats, www.kva.se, och på www.nobelprize.org. Där kan man också titta på presskonferenser, Nobelföreläsningar och annat videomaterial. Mer information om utställningar och aktiviteter kring Nobelpriset och Ekonomipriset finns på www.nobelprizemuseum.se.

Kungl. Vetenskapsakademien har beslutat utdela Nobelpriset i fysik 2025 till

JOHN CLARKE

Född 1942 i Cambridge, Storbritannien. Fil.dr 1968 vid University of Cambridge, Storbritannien. Professor vid University of California, Berkeley, USA.

MICHEL H. DEVORET

Född 1953 i Paris, Frankrike. Fil.dr 1982 vid Université Paris-Saclay, Frankrike. Professor vid Yale University, New Haven, CT och University of California, Santa Barbara samt Chief Scientist för Quantum Hardware på Google Quantum AI, Santa Barbara, CA, USA.

JOHN M. MARTINIS

Född 1958 i Los Angeles, CA, USA. Fil.dr 1987 vid University of California, Berkeley, USA. Professor vid University of California, Santa Barbara och Chief Technology Officer på Qolab, Los Angeles, CA, USA.

”för upptäckten av makroskopisk kvantmekanisk tunnling och energikvantisering i en elektrisk krets”