

Populärvetenskaplig sammanfattning

Utvecklandet av kvantmekaniken var en av det stora intellektuella landvinningarna under nittonhundratalet. Detta matematiska ramverk utvecklades för och främst att beskriva atomens fysik. Kvantmekaniken visade sig dock snabbt få avgörande betydelse inom en rad forskningsområden, t ex studiet av fasta material och inom kärnfysik. Kvantmekaniken visade sig också ha begreppsmässiga implikationer. Sättet att beskriva partiklars rörelse inom kvantmekaniken skiljer sig t ex drastiskt jämfört beskrivningen inom det föregående paradigmet, Newtonsk fysik.

Under den senaste trettio åren har forskning gällande kvantmekanik i allt större utsträckning fokuserat på att kontrollera och mäta tillståndet av *enskilda kvantmekaniska system*, t ex en enskild jon. Denna typ system, oftast konstruerade i labbmiljö, möjliggör test av många fundamentala kvantmekaniska effekter, dvs fenomen som inte har någon motsvarighet i Newtonsk fysik. Utöver detta finns en lång rad andra potentiella tillämpningar. Stora ansträngningar görs tex för att använda dessa system som baskomponent i en mycket effektiv typ av dator, kallad kvantdator. System kan också användas för att ge precisare definitioner av grundläggande fysikaliska konstanter, såsom enheten för tid (s). Därutöver kan systemen användas för att effektivt omvandla värmeenergi till elektrisk energi.

Stora framsteg i att kontrollera enskilda kvantsystem gjordes inom området ljus-materia växelverkan. I kvantmekanisk beskrivning består ljus, eller mer precist så kallad elektromagnetisk strålning, av en ström ljuskvanta kallade fotoner. Under 1980-talet gjorde Serge Haroche banbrytande experiment med sådana ljuspartiklar instängda i en kavitet bestående av två motrikt-

tade speglar (se Fig. 0.1). I dessa experiment fick atomer med två aktiva energinivåer passera genom kaviteten och växelverka med fotonerna. Atomerna kunde sända ut eller ta upp fotoner från kaviteten när de passerade kaviteten genom att göra övergångar mellan energinivåerna. Haroche var en av de först som visade att atomerna som passerade genom kaviteten kunde fås att skicka ut och återuppta en foton. Genom att kontrollera tillståndet för de inskickade atomerna kunde han sedan använda denna effekt för att konstruera mycket speciella kvantmekaniska tillstånd i kaviteten. För sina experimentella bedrifter fick Serge Haroche nobelprisert i fysik 2012.

På senare tid har området ljus-materia växelverkan tagit en ny riktning. Man börjat undersöka och kontrollera de kvantmekaniska egenskaperna av signaler i elektriska kretsar. De elektriska signalerna i dessa kretsar beskrivs på samma sätt som vanlig elektromagnetiska strålning som en ström av fotoner. I vissa kretsar kan fotoner, på samma sätt som i Haroche kaviteter, stängas in under en lång tid. Vanligtvis undersöker man uppställningar där ett eller flera tvånivåsystem satts in i kaviteten. Dessa tvånivåsystem utgör artificiella atomer och kan precis som atomerna i Haroches experiment sända ut eller ta upp fotoner (se Fig. 0.2).

Eftersom våglängden för elektriska signaler är i mikrovågsområdet kallas dessa kretsar för mikrovågskaviteter. Viktigt är att fotonenergi associerad med mikrovågor är mycket lägre än motsvarande energierna för fotonerna i Haroches experiment. De låga energierna medför att kretsarnas växelverkan med sin omgivning blir väldigt stark vid rumstemperatur. För att få tillräckligt låg inverkan av omgivningen för att studera och manipulera kretsarna enskilt måste de kylas ner till ca en tiondels grad över absoluta nollpunkten (-273.15°C). Denna nerkyllning går att åstadkomma med modern teknologi, men kräver avancerad experimentell utrustning. Systemen har dock många bra egenskaper som motiverar ansträngningarna gällande kylning. Först och främst tillåter geometrin stark koppling mellan de artificiella atomerna och fotonerna. Systemen har vidare visat sig vara mycket mångsidiga och kontrollerbara. De är också lovande byggstenar för en framtida kvantdator.

I en annan forskningsinriktning tillverkar och undersöker man så kallade nanoskopiska ledare. Dessa strukturer tillverkas i metalliska eller halvledande material, t ex kisel, och har dimensioner av storklektsordningen $10 - 100\text{nm}$ ($10^{-8} - 10^{-7}$). En typisk nanoskopiska ledare visas i Fig 0.2. Precis som

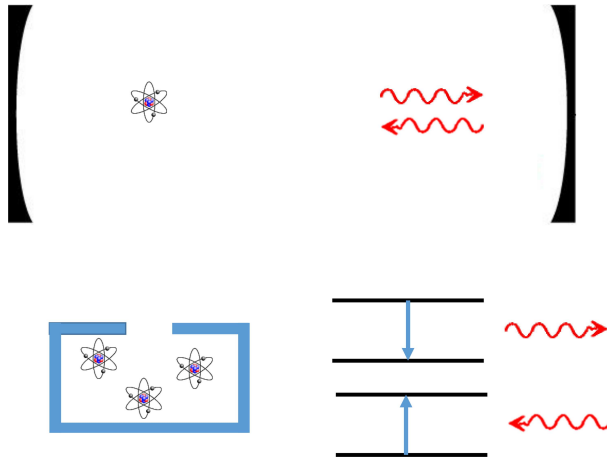


Figure 0.1: Svenska: Bilden visar en kavitet som består av två motriktade speglar. Spegelarna reflekterar inkommande ljus och kan på detta sätt stänga in fotoner (röda pilar) i området mellan speglarna. När atomerna med två energinivåer passerar detta område kan de sända ut och/eller ta upp fotoner. I nedre högra hörnet visas processen där atomen går mellan de två tillstånden och sänder ut eller tar upp en foton. English: The picture shows a cavity formed by two opposing mirrors. The mirrors reflect incident light and photons (red arrows) can this way become trapped in the space between the mirrors. When atoms with two energy levels pass through the cavity they can emit or absorb photons by making transitions between the energy levels. This picture in the lower right corner describes the process of emission and absorption.

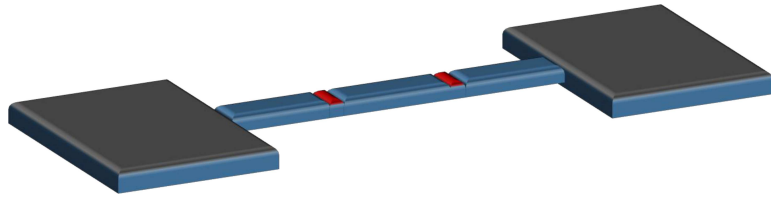


Figure 0.2: Svenska: Bilden visar en nanoskopisk ledare. En cylinder med diameter av storleksordning 10-100nm satt mellan två metallbitar (går rektanglar). De röda bitarna av cylindern visar barriärer som elektronen måste ta sig igenom. När en spänning läggs mellan metallbitarna, kallade ledningselektroder, fås transport genom ledaren. I området mellan barriärer får bara plats en elektron åt gången och således kan bara en elektron passera genom strukturen åt gången. English: The picture shows a nanoscopic conductor. A rod with diameter of the order of 10-100nm is inserted in between two pieces of metal (black rectangles). The red areas along the cylinder mark barriers for electrons. When a bias voltage is applied in between the pieces of metal, called lead electrodes, electrons are transported through the conductor. Because only one electron is allowed in between the barriers. Hence, electrons are transported one at a time through the conductor.

för mikrovågskaviteten kyls ledaren till ca en tiondels grad över absoluta nollpunkten. Vanligen kopplas ledaren till en extern spänningskälla som fungerar ungefär som ett eluttag. På grund av de små dimensionerna och de låga temperaturerna manifesterar transportegenskaperna tydligt kvantmekaniska effekter. Man har tillverkat strukturer där bara en elektron kan passera åt gången. Dessa typer av effekter har visat sig kunna omvandla värme till elektrisk energi. De används också för att utveckla en ny standard för elektrisk ström. Detta är ett steg i en omformulering av SI-systemet som utgör den internationella standarden för måttenheterna för de mest grundläggande fysikaliska storheterna, t ex temperatur.

Experiment med nanostrukturer och kvantmekaniska kretsar görs under liknande experimentella förhållanden, dvs nerkylda till liknande temperaturer. Nyligen har en rad experiment visat att systemen är kompatibla med varandra. Under mina forskarstudier har jag gjort teoretiska under-

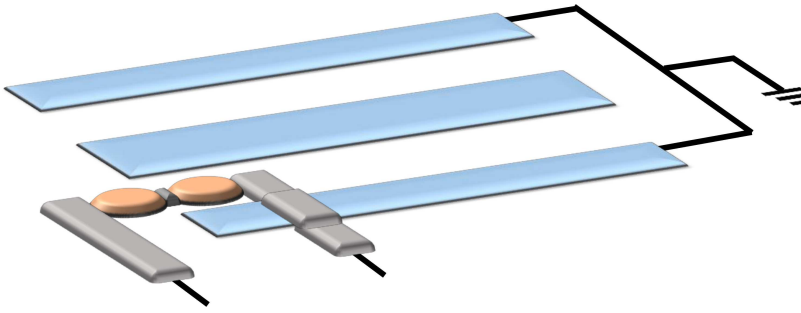


Figure 0.3: Svenska: Mikrovågskavitet innehållandes en nanoskopisk ledare. De blåa rektanglarna, med en längd av storlekesordningen centimeter, utgör en elektrisk krets som fungerar som kavitet för mikrovågsfotoner. Den nanoskopiska ledaren består av de två röda ovalerna. De metallfärgade rektanglarna är ledningselektroder till vilka man kan koppla en spänningskälla. English. Microwave cavity with a nanoscopic conductor inserted. The blue rectangles, with a length of the order of centimeters, form the electrical circuit working as a cavity for microwave photons. The red ovals depicts the nanoscopic conductor. The metallic colored rectangles are the lead electrodes, to which a voltage source can be connected.

sökningar av transportegenskaperna för denna typ av system, bestående av mikrovågskaviteter som innehåller nanoskopiska ledare (se Fig. 0.3). Elektronerna som passerar den nanoskopiska ledaren kan i dessa system sända ut och ta upp fotoner i kaviteten. Uppställningen är alltså i viss mån analog med Haroches experiment. Jag har i min forskning fokuserat på att förstå samspelet mellan elektronerna och fotonerna. Av störst betydelse är studierna där jag titta på två nanoskopiska ledare är insatta i samma kavitet. Enskilda elektroner, i de olika ledarna, kan då växelverka med varandra, genom att utbyta av fotoner via kaviteten. Ledarna kan vara separerade med flera centimeter. Detta avstånd är flera storleksordningar större än typiska avstånd i nanoskopiska system. Jag har undersökt hur denna icke-lokala effekt manifesterar sig i transportegenskaper och föreslagit att den kan användas för att omvandla temperaturdifferenser till elektrisk energi med hög verkningsgrad.