

# Den nya fysiken – Schrödingers katt och andra fabler

Med den nya fysiken brukar vi avse kvantmekaniken som formulerades för drygt 60 år sedan. Begreppet får ibland också få stå för den omvälvning i vårt tänkande och vårt sätt att se på vår omgivning som följde i kvantmekanikens spår. Debatten om hur kvantmekaniken ska tolkas och dess konsekvenser har inte på något vis ännu tystnat.

Jag ska försöka att som fysiker – dock utan att betrakta mig som expert på just dessa frågor – i denna artikel klargöra vad det är man diskuterar och ge min syn frågorna. Mina svar – det vill jag poängtera – omfattas inte av alla fysiker även om jag tror att en överväldigande del av dem accepterar den s.k. Köpenhamnstolkningen av kvantmekaniken, varur jag anser att dessa svar härör.

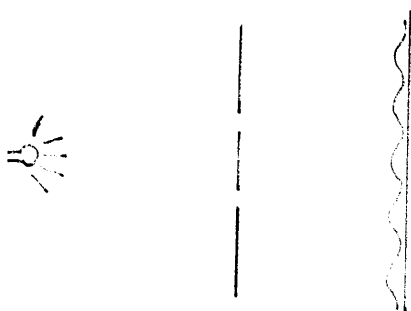
## Klassiska begrepp

När vi försöker beskriva världen i dess minsta beståndsdelar, mikrokosmos, duger inte längre det vi kallar klassisk fysik. Inom den klassiska fysiken – som omfattar (klassisk) mekanik och (klassisk) elektromagnetism – kan man säga att man extrapolerar våra vardagsbegrepp in i det allra minsta utan gräns: en atom eller en elementarpartikel är som en mycket, mycket liten kula; ljus och annan elektromagnetisk strålning är tryckvågor som betar sig i stort som vågor i luft (ljud) eller som vattenvågor.

## Ljus som vågrörelse

Problem uppstod när man försökte förlika två viktiga experiment med varandra. Det ena var ett s.k. dubbelspaltförsök.

Ljus fick passera en skärm med två små hål (spalter).



På en skärm bakom dubbelspalten bildade ljuset då ett mönster med omväxlande ljusa och mörka band (interferensmönster). Om ljuset antas vara en vågrörelse är det lätt att visa att just ett sådant mönster ska uppstå. Om ljuset däremot antas vara partiklar (fotoner) erhåller man två ljusa fläckar på skärmen – en ljus fläck där fotoner som passerat det ena hålet träffar och den andra fläcken där fotonerna som gått genom det andra hålet träffar.

Alltså: ljus måste beskrivas som en våg och inte som en partikel.

## Ljus som partiklar

Det andra experimentet uppvisade dock helt motsatt effekt!

Den s.k. fotoelektriska effekten innebär att om en metallyta belyses med ljus kan man slå loss elektroner ur metaller. Om metallplattan är inplacerad på lämpligt sätt i en elektrisk krets kan man på så vis få en elektrisk ström i kretsen med hjälp av de frigjorda elektronerna. Effekten beror på vilken sorts metall plattan är gjord av.

Som väntat ökade strömmen i kretsen när ljusintensiteten (ljusmängden) ökades. Men så kom det oförklarliga: för vissa metaller fick man ingen ström alls hur mycket ljus man än lyste på plattan. Om man däremot höjde ljusets frekvens (mot violett eller ultraviolett i spektrum) kunde det räcka med låga intensiteter för att frigöra elektroner ur metallytan.

Det här stred helt mot uppfattningen att ljuset var en vågrörelse. För i så fall borde man få tillräckligt med energi för att slå ut elektroner genom att öka ljusintensiteten – och det gick inte.

Einstein löste gåtan 1905. Han antog att ljuset var kvantiserat d.v.s. kom som små partiklar (fotoner) istället för som kontinuerliga vågor. Energin hos varje partikel bestämdes av ljusets frekvens. I vissa metaller behövdes en bestämd energi hos ljuset för att en elektron skulle kunna frigöras. För andra metaller dög det med lägre energi. Det här betyder att fotonerna endast kunde slå ut elektroner ur en viss metall om de hade tillräckligt hög energi (d.v.s. frekvens eller färg hos ljuset). Var energin hos fotonerna under en viss gräns slogs inga elektroner ut hur många fotoner (d.v.s. ljusets intensitet) än metallytan bestrålades med.

Alltså: den fotoelektriska effekten visar att

ljus består av partiklar och inte vågor. Men dubbelspaltförsöket hade ju visat att det var tvärtom. Paradoxen var ett faktum.

Var ljus partiklar ibland och vågor ibland?

### Sannolikhet

Kvantmekaniken, som framväxte i mitten av 20-talet, förklarade paradoxen: Ljus är varken partiklar eller vågor. Istället är det något som vid en viss typ av experiment (eller mätning) uppträder som om det vore partiklar och vid andra experiment som vågor. Innan vi gör en mätning kan vi endast veta med vilken sannolikhet vi ska erhålla ett visst mätresultat vid ett givet experiment. Det här gäller naturligtvis inte enbart ljus utan även makroskopiska objekt som bilar och människor. Innan föremålet registreras (växelvekar) vet vi att utfallet av registreringen endast kan förutsägas med bestämda sannolikheter. Det är inte så att partikeln (bilen, människan) finns där någonstans, fast vi bara inte riktigt vet var förrän vi mäter, utan denna obestämthet i t.ex. partikelns läge är en inneboende egenskap hos all materia. Den är sådan att vi endast kan tala om sannolikheter att erhålla ett visst mätvärde ('uppfatta ljus som våg eller partikel') vid en bestämd typ av växelverkan (mätning – dubbelspaltförsök eller fotoelektrisk effekt).

Framstående fysiker som t.ex. Albert Einstein accepterade aldrig riktigt att verkligheten endast bestod av sannolikheter: "Gud kastar inte tärning". Han menade att verkligheten (partiklar o.s.v.) bestod av objekt med väldefinierade och entydiga egenskaper (som i klassisk fysik). Einstein kunde visserligen inte vedersäga att kvantteorin gav riktiga resultat som överensstämde med experimenten, men han trodde att en mer avancerad teori krävdes som skulle visa att han hade rätt.

1935 föreslog Einstein tillsammans med Boris Podolsky och Nathan Rosen ett antal s.k. tankeexperiment som de ansåg påvisade kvantmekanikens inneboende logiska motsättningar.

Denna tankemöda utmynnade i de s.k. EPR-paradoxerna vilka – om än ibland i nya modifierade former – diskuteras än idag.

### EPR-paradoxerna

Först några ord om begreppet spinn. Elementarpartiklar har en 'inre' egenskap som kallas spinn. Spinnets är något som inte går att korrekt beskrivas med våra vardagsbegrepp (helt i konsekvens med vad jag tidigare sagt

om mikrokosmos). Det kan dock liknas vid rörelsemängdsmomentet eller "snurret" hos t.ex. en kula eller en tippetopp. Kulan har ett rörelsemängdsmoment kring sin rotationsaxel. Momentet ökar när rotationshastigheten ökar och omvänt.

Elektronen har spinn  $\frac{1}{2}$  och exempelvis fotonen spinn 1 (enhet oväsentlig för våra resonemang). Om man mäter elektronens spinn (säg i dess rörelseriktning) kan man endast erhålla två distinkta värden  $+\frac{1}{2}$  eller  $-\frac{1}{2}$  (= "spinnets komponent i rörelseriktningen"): spinnets är kvantiserat.

Vi antar att vi har en partikel utan spinn ("med spinn noll"). Den är instabil och sönderfaller i en elektron och en positron (som är elektronens antipartikel – en 'elektron med positiv laddning'). Nu finns en konserveringslag i fysiken som säger att spinnets är bevarat d.v.s. är lika före och efter sönderfallet. Det betyder att eftersom spinnets var noll före så måste summan av spinnerna vara noll efter. Om vi mäter elektronens spinn kan vi endast få värdena  $+\frac{1}{2}$ , "spinn upp", eller  $-\frac{1}{2}$ , 'spinn ner'. Alltså är enligt konserveringslagen positronens spinn ner i det förra och upp i det senare fallet. Kort sagt: elektronens och positronens spinn måste vara motsatta. Kvantmekaniken säger oss att vi inte kan säga att t.ex. elektronens spinn är det ena eller det andra innan vi gjort en mätning av det. Det enda vi vet är att spinnets har 50% chans att vara upp och 50% chans för ner. Detsamma gäller för positronen d.v.s. innan vi mäter vet vi endast att positronen är i ett tillstånd där vi vid mätning har fifty-fifty chans att få resultatet spinn upp (eller ner).

Antag att vi nu utför experimentet. Vi mäter elektronens spinn och får resultatet spinn upp. I samma ögonblick vet vi att positronen måste ha spinn ner (enligt konserveringslagen om spinnets bevarande) utan att vi gör någon mätning och trots att dess spinn var obestämt innan vi mätte på elektronen! Det här är EPR-paradoxen. Notera att det är väsentligt, för att det ska föreligga en paradox, att vi omedelbart känner positronens spinn när vi mätt på elektronen. Enligt Einsteins speciella relativitetsteori – som vi inte vill överge – kan ingen signal och därmed ingen information överföras från en punkt till en annan snabbare än ljusets hastighet i vakuum (=300 000 km/s).

Alltså hur kan positronen – som omedel-

bart före mätningen befann sig i ett tillstånd som beskrivs av 50/50 möjlighet att ha spinn upp/ner – efter mätningen på elektronen (som i princip kan befinna sig på ett ljusårs avstånd när mätningen utförs) veta att den ska med 100% sannolikhet vara i ett spinnstillstånd motsatt elektronens?

Einstein, Podolsky, Rosen – liksom andra fysiker och icke-fysiker efter dem – sade att vi här ser att kvantmekaniken leder till en inre motsägelse och att den, åtminstone så som den tolkas, måste vara fel eller ofullständig.

### Schrödingers katt

En av kvantmekanikens fäder, Erwin Schrödinger formulerade själv en annan något makaber paradox som brukar kallas 'Schrödingers katt'.

Schrödinger sade att antag att vi stänger in en katt i en låda som vi inte kan se in i. I lådan finns dessutom ett radioaktivt preparat med sannolikheten 50% för ett sönderfall per timme. När en atom i det radioaktiva preparatet sönderfaller ser en snillrik mekanism till att en hammare slår sönder en cyanidflaska och katten dör. När vi öppnar lådan efter en timme är alltså sannolikheten 50% att katten ska vara död. I vilket tillstånd är katten just innan vi öppnar lådan och ser efter? Vi vet inte om vi haft något radioaktivt sönderfall eftersom det sker helt slumpmässigt enligt kvantmekanikens lagar. Tror vi på kvantmekanik synes den säga oss att att katten varken är död eller levande – den är i ett tillstånd som beskrivs av att vi har 50% chans att finna den död och 50% chans att finna den levande! Vad är det för en märklig varelse som kvantmekaniken begåvat oss med: en katt till hälften död och till hälften levande? Vårt 'sunda förnuft' säger oss däremot att katten är död eller levande (vi vet bara inte vilket innan vi sett efter). Det finns inga mellantillstånd.

Den stackars Schrödingers katts öde har i 50 års tid brytt människors hjärnor. (Katter blir inte så gamla så nu lär den definitivt vara död – må denna artikel bidra till att den får vila i frid.) Som ett av otaliga exempel kan nämnas en artikel i The Sciences (juli/avg -87) där fyra nytkomna böcker som behandlar ämnet recenseras.

### Skenbara problem?

Är då Schrödingers katt och EPR-paradoxerna verkliga eller endast skenbara problem för kvantmekaniken? Som redan framgått

anser även framstående fysiker att vi här rör oss med verkliga bekymmer och de söker nya tolkningar och nya formuleringar av kvantmekanik. Åtskilliga andra fysiker intar en 'pragmatisk' attityd: det kan vara vissa problem med tolkningen av kvantmekaniken men det är ganska oväsentligt – det viktiga är att den går att använda på konkreta fysikaliska problem och att den där ger oss riktiga resultat. Det har den visat sig klara av och då är de filosofiska spetsfundigheterna med tolkningsproblemen tämligen ointressanta, resonerar man.

Själv tillhör jag en kategori fysiker som går ett steg längre och påstår att de problem vi här diskuterat är skenbara och endast är resultat av oförmåga att frigöra sig från ett tänkande i banor av klassiska fysik som leder till dessa egendomligheter och paradoxer i kvantmekaniken. Istället för att konsekvent välja att följa kvantmekaniken och de egentligen uppenbara svaren, krånglar man till det och hittar på intrikata eller spekulativa lösningar som nog vid närmare betraktelse själva kan finnas vara behäftade med stora problem eller rymma nya paradoxer.

### 'Makroskopisk katt i en kvantlåda'

Låt oss först ta exemplet med Schrödingers katt. Det kvantmekaniken säger oss är att – innan vi ser efter – katten är i ett tillstånd så beskaffat att när vi ser efter är sannolikheten 50% att vi ska hitta den död och 50% att vi ska finna den levande. Det är allt. Det betyder inte att katten – innan vi ser efter – är i ett tillstånd av hälften död, hälften levande. (Men kom också ihåg att man inte heller kan säga – som man skulle göra i klassisk fysik – att den är död eller levande och att vi bara inte vet vilket innan vi ser efter.)

Det här är en helt vattentät tolkning som bekräftas om experiment utförs (vilket jag av djurskyddsskäl avråder ifrån). Ingen kan säga att "men det vet vi ju att den måste ha varit antingen död eller levande redan innan vi sett efter, det säger allt sunt förnuft". För så är det inte: om det inte har funnits – rent principiellt och inte endast praktiskt sett – någon möjlighet för oss att undersöka kattens hälsotillstånd innan vi såg efter, så kan heller ingen säga att den var död eller levande. Det enda korrekta är att säga – som kvantmekaniken lär oss – att katten var i ett tillstånd som ger oss fifty-fifty chans att finna den död

## Schrödingers katt och andra fabler

respektive levande när vi öppnar lådan.

Men varför talar det här så starkt mot vad vårt 'sunda förnuft' säger oss? Att elementarpartiklar bär sig konstigt åt kan vi kanske acceptera men makroskopiska objekt som katter kan väl ändå inte uppfattas så på tvärs med vår vardagserfarenhet? Nej, jag tror det är riktigt. Katten är – om vi gör experimentet i praktiken – död eller levande redan innan vi ser efter. Våra svårigheter uppstår därför att vi gjort en idealisering som är praktiskt ogenomförbar: vi kan aldrig tillverka en låda som är sådan att det i princip är omöjligt att ta reda på någonting om katten innan vi öppnar lådan. Lite oegentligt skulle man kunna uttrycka det, som att vi placerat en 'makroskopisk (klassisk) katt' i en 'kvantlåda'. Då ska vi nog inte förundras om tolkningen av situationen blir svår att förlika med vårt vardagsförnuft.

### Mäter hela systemet

Så till EPR-paradoxen: hur kan positronen veta att den ska ha spinn 'upp' bara för att vi mäter elektronens spinn till 'ner'? Det verkar som om information överförs ögonblickligen – i strid med relativitetsteorin – till positronen när vi mäter på elektronen.

Svaret ligger i att man kvantmekaniskt sett inte har någon grund att betrakta elektronpositronparet som två separata system innan man mäter och konstaterar att så är fallet. De utgör istället ett system – även om de är separerade på ljusårs avstånd – som beskrivs av att antingen kommer vi vid en mätning att finna att elektronen har spinn ner och positronen spinn upp eller tvärtom (d.v.s. spinnen omkastade). En mätning på t.ex. elektronen är därmed en mätning på hela systemet. Om vi finner spinn upp hos elektronen så vet vi med säkerhet att systemet (elektron+positron) är i tillståndet elektron-'spinn upp' och positron-'spinn ner'. Ingen information – i meningen att man skulle kunna skicka någon signal på detta vis – har överförts till positronen från elektronen. Därmed råkar vi inte i någon konflikt med relativitetsteorin som lärt oss att inga signaler kan överföras ögonblickligen.

Ett annat sätt att uttrycka detta är att säga att det enda vi vet om systemet innan vi mäter (växelverkar med det) är att det finns vissa bestämda sannolikheter att erhålla de olika möjliga mätresultaten. Vilket inte betyder att tillståndet är någon sorts blandning av dessa

möjliga resultat. Att man mäter på en del av systemet och på så vis får information om hela systemet, betyder inte att information överförs till hela systemet.

### Olika språk

Jag tror att ett skäl till att vi ställer frågan om den 'underliggande verkligheten' är att vi vill ha en förklaring där vi använder begrepp ur vår vardagliga makroskopiska erfarenhet. Men mikrovärlden – vilket kvantmekaniken visat – kan omöjligen beskrivas med makrovärldens begrepp eller föremål – vilket ju egentligen inte borde vara så oväntat. Våra begreppsmässiga problem uppstår när vi insisterar på att försöka förstå mikrovärlden med våra vardagsföreställningar. Kan då mikrovärlden inte begripas? Jo, det går men måste ske med ett språk som inte alltid kan översättas till vårt 'normala' språk: matematiken. Kvantmekanik kan formuleras i matematik som kan förstås som man förstår matematik. Denna matematik kan till en viss gräns ges tolkningar ur vår 'normala' begreppsapparat. Men det går aldrig fullständigt; i så fall behövde vi inte matematiken.

Ibland påstås det att kvantmekaniken visat att vi inte kan få en objektiv kunskap om världen sådan den 'verkliga är'. Det anser jag vara fel och bero på den typ av misstolkningar av kvantmekaniken som jag behandlat ovan. Tvärtom ger kvantmekaniken oss ett positivt sätt att se på världen: det ligger nästan definitionsmässigt i kvantmekanik att vi i princip inte har några gränser för vår kunskap när den säger oss att information som i princip är omöjlig att skaffa inte existerar. Därför sätter inte kvantmekaniken några gränser för våra möjligheter att förstå vår värld sådan den 'verkliga är'.

Till skillnad från vad vissa författare av populärvetenskap hävdar så finns det en objektiv verklighet även när vi inte observerar den. Denna 'verklighet' är dock inte beskaffad som i våra vardagsföreställningar, 'sunda förnuft' eller som verkligheten i klassisk fysik. Den är beskaffad på sådant sätt att vi endast kan tala om sannolikheter att få ett visst resultat när vi observerar den. Vilket alltså betyder att verkligheten inte på något vis 'försvinner' eller 'inte finns där' när vi inte observerar den. Dessa sannolikheter, som är förutsägbara och lika för oss alla och därmed objektiva, är i 'högsta grad verkliga och 'finns alltid där'.

Pertti Poutiainen