

**FOTONERNAS
DANS
ZEILINGER
ANTON**

Översättning Tom Sköld

fri tanke

Innehåll

Förord till den svenska utgåvan	7
Prolog: Under Donau	11
Rymdresor	19
Det stoff som kallas ljus	21
Ljuset är en våg.....	23
Ljus består av partiklar	27
Fårhundar och Einsteins ljuspartiklar	29
Einstein och hans Nobelpris	37
En konflikt	39
Hur vi blev säkra på osäkerheten	41
Kvantosäkerhet	45
Kvantargument mot teleportering	55
Kvantsammanflätning till undsättning	59
Alice och Bob i kvantlaboratoriet	73
Ljusets polarisation.....	85
Alice och Bob upptäcker tvillingar.....	109
John presenterar Einstein, Podolsky och Rosen	125
Johns lektion om lokala dolda variabler	153
Alices och Bobs experiment ger förvirrande resultat.....	159
Historien om John Bell.....	165
Allt är inte som det verkar vara	175
Snabbare än ljuset och tillbaka till det förflutna?	179

Alice, Bob och den gräns som ljusets hastighet sätter	183
Kryphål	193
I Tyrolerbergen	199
Kvantlotteriet	211
Ett kvantlotteri med två fotoner	217
Kvantpengar – slutet för alla former av förfalskning	229
En kvantlastbil kan transportera mer än den kan bära	237
Atomära källor till sammanflätning – och tidiga experiment	243
Hur man stänger kommunikationskryphålet	249
Kvantteleportering vid Donau	253
Multifotonövertaskningen – och kvantteleportering på köpet...	265
Teleportering av sammanflätning	273
Fler experiment	289
Kvantinformationsteknik	295
Kvantteleporteringens framtid	301
Signaler från himlen över Teneriffa	309
Den senaste utvecklingen och några obesvarade frågor	315
Vad innebär allt detta?	323
Appendix	329
Efterord	351
Ordlista	363

Förord till den svenska utgåvan

KVANTMEKANIKEN HÖR TILL de allra märkligaste av fysikens teorier. På många sätt är den mer svår att ta till sig än de beryktade relativitetsteorierna trots att de kastar hela vår intuitiva förståelse av rummet och tiden över ända. Det kan vara nog så svårt att acceptera hur tidens gång påverkas av observatörens rörelse och hur ljushastigheten utgör en övre hastighetsgräns som aldrig kan överträdas. Det blir inte bättre i den allmänna relativiteten där gravitationen beskrivs av en krökt rumtid där det mest dramatiska exemplet utgörs av svarta hål. Men trots relativitetens alla besynnerligheter gäller fortfarande lagen om orsak och verkan och världen är skarp i konturerna, i princip förutsägbar och entydig. Trots sina revolutionerande idéer kan Einstein sägas ha varit den sista klassiska fysikern. Han ställde sig djupt tveksam inför kvantmekaniken och förkunnade att Gud inte kastar tärning.

I kvantmekaniken beskrivs universum fortfarande av allmängiltiga matematiska lagar men de är till sin natur väsensskilda från vad vi är vana vid från den klassiska världen. Verkan behöver inte alltid ha en orsak. En atomkärna sönderfaller spontant med en viss sannolikhet, men någon möjlighet att förutsäga precis när det kommer att inträffa finns inte. Detta beror inte på våra egna brister utan på att informationen överhuvudtaget inte finns.

I atomen cirklar elektroner bundna av den elektriska kraften i banor kring atomkärnan. Men till skillnad från planeterna i solsystemet kan de inte befinna sig på vilka avstånd som helst. I enlighet med de tumregler som den danske fysikern Niels Bohr ställde upp i början av 1900-talet är deras rörelser kvantiserade. Ungefär som vågor på en svängande gitarrsträng måste ha en våglängd som passar in mellan strängens fästen. Tonen bestäms av strängens längd som kan kortas genom att sätta fingret på rätt ställe. På så sätt kan man förklara varför en atom bara kan ta emot eller sända ut ljus av de specifika våglängder som är karakteristiska för det grundämne det handlar om.

Men det allra mest surrealistiska med kvantmekaniken är nog hur skillnaden mellan här och där suddas ut av den kvantmekaniska sammanflätningen. Fenomenet anades redan av Einstein som tillsammans med kollegorna Boris Podolsky och Nathan Rosen i en artikel från 1935 gav uttryck för sin bestörtning över upptäckten genom att avfärda kvantmekaniken som ofullständig. Någon måtta på underligheterna får det ju ändå vara!

Men kvantmekaniken visade sig fungera och ständigt ge de rätta beskrivningarna av fysiken i atomens och atomkärnans världar. På 1960-talet kunde den nordirländske fysikern John Bell precisera vad det hela gick ut på. I enlighet med kvantmekaniken kan fysikaliska system, vida separerade i rum och tid, vara sammanlänkade på ett sätt som är omöjligt i den klassiska fysiken. Detta är inte bara ett lustigt kuriosum utan utgör i själva verket en förutsättning för kvantmekanikens framgång. För att fånga essensen i detta formulerade Bell några matematiska olikheter som den klassiska fysiken i enlighet med sunt förnuft måste uppfylla medan kvantmekaniken gålet nog bröt mot dem.

Kortfattat handlar det om mätserier utförda på par av partiklar belägna långt ifrån varandra. Enligt kvantmekaniken kan det under de rätta omständigheterna uppstå korrelationer mellan

mätserierna som är omöjliga inom klassisk fysik. På något sett vet den ena partikeln vilken mätning som utförts på den andra partikeln och mätresultaten påverkas därefter. Detta även om det skulle krävas signaler som färdas snabbare än ljuset för att hinna överföra budskapet. Samtidigt är allt så fuffigt inrättat att det ändå är omöjligt för oss att skicka några meddelanden genom sammanflätningen.

De allra flesta var nog övertygade om att de kvantmekaniska lagarna gällde i det allra minsta men när det gäller den makroskopiska värld som vi direkt upplever med våra sinnen började man skruva på sig. Kunde dessa mystiska, rentav spöklika effekter, verkligen realiseras där också?

Det är just detta som den bok du har i din hand handlar om, och det är svårt att tänka sig någon bättre skickad att förklara besynnerligheterna än Anton Zeilinger. En godmodig österrikisk professor i fysik med ett bullrande skratt som verkat inom området under decennier. År 2022 tog han emot Nobelpriset i fysik tillsammans med fransmannen Alain Aspect och amerikanen John Clauser »för experiment med sammanflätade fotoner som påvisat brott mot Bell-olikheter och banat väg för kvantinformationsvetenskap«.

Det var John Clauser som först säkerställde att Bells olikheter bröts i enlighet med kvantmekaniken också över makroskopiska avstånd genom att utföra mätningar på par av sammanflätade fotoner av polariserat ljus. Mätserierna uppvisade just de korrelationer som den klassiska fysiken var oförmögen att åstadkomma. Genom ett fuffigt experiment med snabba mätningar på de olika fotonparen kunde Alain Aspect slå fast att det inte fanns något sätt för naturen att fuska genom att skicka hemliga signaler begränsade av ljusfarten.

Resultaten av experimenten har mycket att säga om hur universum är inrättat. Men det handlar inte bara om exotisk fysik

som saknar praktiska tillämpningar, utan om fenomen som kan lägga grunden för morgondagens teknik. Det är här Anton Zeilinger kommer in i bilden. Han har inte bara fortsatt att studera fenomenet i samma anda som Clauser och Aspect utan också banat väg för att omsätta det i science-fiction-liknande praktik. Inte minst genom att utnyttja sammanflätade fotoner för att säkerställa avlyssningsfri kommunikation över stora avstånd. År 2007, strax före det att boken kom ut i engelsk översättning, lyckades han länka samman fotoner mellan öarna La Palma och Teneriffa med ett avstånd av nästan 15 mil, och 2017 deltog han i ett experiment som lyckades etablera en kvantmekanisk kommunikationslänk via satellit mellan Wien och Peking. Forskning av detta slag har också en avgörande betydelse för det intensiva arbetet med att bygga kvantdatorer.

I boken tas läsaren med på en vindlande resa in i en till synes främmande men alldeles verklig värld, där vi ledsagas av den alltid lika uppmuntrande författaren, ibland lätt förklädd till den hjälpsamme professor Kvantinger som undervisar sina nyfikna studenter Alice och Bob. Det är intellektuellt omtumlande och allt tålmodigt och grundligt förklarat, men trots detta låter varken professor Zeilinger eller professor Kvantinger sig förloras i matematiska ekvationer.

Under en föreläsning slår professor Kvantinger fast att den kvantmekaniska världsbilden med sin obestämbarhet och efterföljande konsekvenser utgör den största av alla upptäckter. För den som är insatt i ämnet är det lätt att hålla med. När professor Kvantinger ser sig omkring i föreläsningssalen anar han också en viss entusiasm i publiken men är nog inte riktigt säker på att alla fullt ut förstår vidden av vad han berättat om. Men med verklighetens professor Zeilinger som ciceron kan man knappast ha bättre förutsättningar.

Under Donau

DEN FÖRSTA JANUARI välkomnar Wiens filharmoniska orkester det nya året med sin traditionella nyårskonsert. Evenemanget äger rum i den stora Gyllene salen i Musikverein, hemvist för Wiens traditionella musiksällskap, och direkt sänds till miljontals människor över hela världen som gärna vill lyssna till de vackra valserna, polkorna, Ouvertyrerna och andra stycken komponerade av familjen Strauss och andra samtida tonsättare. När det officiella programmet är avslutat stämmer vi in i publikens applåder, men alla väntar fortfarande på extranumret. Därefter börjar stråkarna spela väldigt svagt, och när publiken känner igen det förväntade stycket börjar de applådera igen. Orkestern tystnar och dirigenten önskar alla i konserthallen och över hela världen ett gott nytt år. Åter stämmer stråkarna upp och orkestern spelar den kända valsen »Blå Donau« av Johann Strauss den yngre, ett stycke som ofta kallas Österrikes inofficiella nationalsång. Verket, som skrevs för de pampiga baler som hölls i Wiens kejsarliga och furstliga balsalar och som varje år fortfarande hålls under balsäsongerna, är nästan unikt i sin förmåga att uttrycka både den glädje och den ofrånkomliga melankoli som livet rymmer.

De flesta av åhörarna i konsertsalen och hemma i tv-sofforna är säkert helt ovetande om att det inte så långt från Gyllene salen, inom Wiens stadsgränser, pågår ett experiment som ligger i den moderna teknikens absoluta framkant. De science fiction-artade idéerna som experimentet bygger på tycks inte

bara strida mot sunt förnuft utan kan också komma att förändra vår världsbild.

Som sista extranummer spelar orkestern Johann Strauss den äldre »Radetzkymarsch«, ett av de mest livfulla och glädjerika stycken som någonsin skrivits. Vi lämnar konserthallen och åker till Donau. Det är en vacker vinterdag och eftersom nyårsdagen är en helgdag i Österrike är det inte mycket folk ute. Donau flyter genom centrala Wien i två grenar som omsluter en avlång ö. Från en av flodbankarna tar vi oss över till ön via en bro som inte ens bilens GPS känner till, eftersom den inte är öppen för allmänheten. Det är förbjudet att köra bil på ön, med undantag för personer i tjänsteärende.

På ön tar vi sikte på en byggnad som döljer sig bakom några höga träd. Det är pumpstationen i Wiens avloppssystem. Under floden går en stor kloak som förbinder de båda sidorna. Den har till uppgift att frakta allt avloppsvatten som samlas på flodens östra sida, en del av staden som Wienborna ömsint kallar Transdanubien (»platsen på andra sidan Donau«), till ett enormt avloppsreningsverk på andra sidan. Wienborna är väldigt miljömedvetna och vill därför inte att avloppsvattnet ska rinna direkt ut i Donau.

Vi går in i byggnaden, tar hissen två våningar ner och befinner oss nu under floden. När vi gått en liten bit kommer vi fram till en stor tunnel som öppnar sig till vänster och höger och som förbinder områdena på flodens båda sidor, Transdanubien och det egentliga Wien. Genom den här stora tunneln löper ett antal parallella avloppsrör och ett stort antal kablar. På en lite undanskymd plats, nära ingången till ena sidan av tunneln, möts vi av en annan syn.

Längst in i ett hörn ligger ett litet rum med glasväggar. När vi kommer närmare ser vi att det kommer laserljus inifrån rummet, och där finns massor med högteknologisk utrustning,

som moderna elektroniska apparater, datorer och annat, och vi träffar Rupert. Han berättar för oss att han är student vid Wiens universitet och att han arbetar med sin doktorsavhandling, vilken han snart hoppas avsluta så att han får sin doktorsgrad. Titeln på hans avhandling är »Kvantteleportering på långt avstånd«. Vi ber honom att kortfattat förklara vad det är vi ser framför oss. Han säger att syftet med experimentet är att teleportera en ljuspartikel – en foton – från ön till Wien.

När han märker att vi inte hänger med berättar han att teleportering fungerar ungefär som i »Stark Trek«, »men inte riktigt«. Han ger oss ett stort leende och börjar förklara. Även om vi fortfarande inte fattar så mycket lyssnar vi med växande intresse. Han lovar att förklara mer ingående senare. Just nu vill vi bara bekanta oss lite med terminologin, få en uppfattning om experimentets utformning och de fenomen som studeras, och att vänja oss vid den märkliga miljön.

Vi får veta att lasrarnas huvudsakliga syfte är att skapa ett väldigt speciellt slags ljus. Ljus består av partiklar som kallas fotoner, och den här lasern skapar märkliga par av fotoner som är »sammanflätade« med varandra. Sammanflätning innebär – och vi ska gå in på det närmare senare – att de två fotonerna är nära förbundna med varandra. När den ena fotonen mäts påverkas den andra fotonens tillstånd omedelbart, oavsett hur långt ifrån varandra de befinner sig.

Fenomenet *sammanflätning* identifierades 1935 av den österrikiske fysikern Erwin Schrödinger. Han ville beskriva ett väldigt intressant förhållande. Lite tidigare hade Albert Einstein, i en artikel han publicerat tillsammans med sina yngre kollegor Boris Podolsky och Nathan Rosen, antytt att en ny intressant situation höll på att växa fram inom kvantfysiken.

För att vi ska få ett grepp om vad sammanflätning handlar om ska vi titta på två partiklar som har interagerat med

varandra. Låt oss säga att de har stött till varandra på samma sätt som två biljardbollar och rör sig nu bort från varandra. Den klassiska – det vill säga den traditionella – fysiken lär oss att om en biljardboll rör sig åt höger, då rör sig den andra åt vänster. Och om vi känner till den första bollens hastighet och på vilket sätt den stött till bollen i vila, och om vi också känner till hur fort och i vilken riktning den boll som befann sig i vila rör sig, då räknar vi ut exakt vart den första bollen är på väg. Det är precis vad en duktig biljardspelare gör när han räknar ut hur han ska stöta till en boll med sin kö.

»Kvantbiljardbollar« betar sig på ett mycket märkligare sätt. Efter sammanstötningen rör de sig också bort från varandra, men med följande intressanta och väldigt märkliga skillnader. Ingen av de två bollarna har en välbestämd hastighet, och rör sig inte heller i en specifik riktning. Faktum är att ingen av bollarna har någon hastighet eller rör sig i någon specifik riktning efter sammanstötningen. De rör sig bara bort från varandra.

Det anmärkningsvärda är att i samma ögonblick som vi observerar en av kvantbiljardbollarna antar den en viss hastighet och rör sig i en viss riktning bort från sammanstötningen. I exakt det ögonblicket – men inte tidigare – antar den andra bollen motsvarande hastighet och riktning. Och det sker oavsett hur långt de två bollarna befinner sig från varandra.

Kvantbiljardbollar är alltså sammanflätade. Man har förstås ännu inte sett riktiga biljardbollar bete sig på det här sättet, men när det gäller elementarpartiklar är det normalt. Två partiklar som stött samman med varandra är fortfarande nära förbundna trots att de nu befinner sig på långt avstånd från varandra. Själva *observationen* av den ena partikeln påverkar ögonblickligen den andra, oavsett hur långt bort den andra befinner sig.

Einstein ogillade det här märkliga sakernas tillstånd och kallade det »spöklik effekt på avstånd«. Han hoppades att fysikerna

skulle komma på ett sätt att göra sig kvitt den. I motsats till Einstein accepterade Schrödinger fenomenet som något helt nytt, och myntade termen »sammanflätning«. Han menade att sammanflätning är just det fenomen inom kvantvärlden som tvingar oss att ta farväl av alla våra invanda föreställningar om hur världen är uppbyggd.

När vi frågar Rupert om syftet med hans sammanflätade fotoner ler han och säger: »Det är det som är trolleritricket.« Han låter den ena av de två fotonerna stanna kvar i minilaboratoriet under floden och skickar den andra genom en glasfibernkabel till mottagaren på andra sidan floden.

Rupert talar om att »Alice« och »Bob« skickar fotoner till varandra och pratar med varandra som om de vore människor. Men vi förstår snart att det handlar om fiktiva forskare – Alice sitter i laboratoriet här nere och Bob befinner sig på andra sidan floden.

När vi frågar Rupert varför han kallar dem Alice och Bob, säger han att det inte är hans idé. Namnen började användas i kryptografikretsar, där man måste vara säker på att meddelanden som skickas mellan två personer inte kan läsas eller höras av obehöriga tredje parter. Det får oss genast att tänka på spioner i en spännande miljö, men Rupert lugnar ner oss. Han förklarar att kryptografi används nästan överallt nuförtiden. Till och med när man loggar in på internet och till exempel skickar sitt kreditkortsnummer brukar det vara krypterat för att ingen annan ska kunna läsa det. Han fortsätter: »I början kallade man sändaren för »A« och mottagaren för »B«, men sedan tyckte någon att det var enklare att kalla dem »Alice« och »Bob«, för att det skulle bli lättare att prata om dem.«

Rupert visar oss den tunna glasfibernkabeln där Bobs foton kommer in, och den skiljer sig inte märkbart från de kablar som används inom telekommunikationen nuförtiden.

Vi följer med blicken glasfiberkabeln som går från Ruperts laser genom väggen i hans lilla laboratorium upp till ett ställe där den förenar sig med alla de andra kablarna som löper genom de stora tunnlarna under Donau. Rupert följer vår blick och frågar: »Vill ni se vart den går?« Vi svarar ivrigt ja, och vi påbörjar vår lilla upptäcktsfärd ner i Wiens underjord.

Först går vi in i en ungefär fyra meter bred, cirkelformad tunnel som går brant neråt. Under oss ser vi två rör, båda ungefär en meter i diameter, som leder bort avloppsvatten. Eftersom de är tätt förslutna stör det inte oss särskilt mycket, även om en lite märklig lukt hänger i luften. Tunneln är inte särskild bred, men vi har inga problem med att gå upprätt. Både till vänster och höger är väggarna täckta av kabelstegar. Någonstans på en av de här kabelstegarna löper vår lilla optiska fiberkabel. En av oss utbrister: »Det är precis som i *Den tredje mannen*«, en av de bästa filmerna någonsin, vilken utspelar sig i Wien efter andra världskriget. De vilda jakterna i stadens underjordiska avloppssystem hör till filmens höjdpunkter. Det är nästan så att vi förväntar oss att Orson Welles när som helst ska dyka upp runt nästa hörn, och det musikaliska temat Harry Lime, spelat av Anton Karas på cittra, tycks ringa i öronen.

Efter en stund når vi den lägst liggande punkten på vår lilla utfärd, och Rupert berättar att floden flyter alldeles ovanför våra huvuden. Det är svårt att låta bli att föreställa sig vad som skulle hända om det uppstod en spricka i väggarna och flodvattnet började forsa in. Åt vilket håll skulle vi fly? Som tur är händer ingenting och vi spatserar vidare. Vi börjar röra oss en aning uppåt igen. Efter ett tag kommer vi in i ett litet rum, och när vi tittar ut inser vi att vi inte bara gått under floden, utan också under en liten angränsande park, en järnväg och en stor trafikled.

I rummet blottas glasfibernkabeln från sitt plasthölje och slutar i en likadan apparatur som den på ön, fast mycket mindre. Bredvid den står också här en dator, liksom ett antal optiska instrument såsom speglar och prismor, och mängder av elektronisk utrustning. Rupert förklarar att det är här mätningen av den teleporterade fotonen sker, och i synnerhet verifikationen av att dess egenskaper och särdrag är intakta. Bland de kablar som leder till Ruperts lilla bord ser vi en som fortsätter uppåt och slutar i taket på den byggnad vi befinner oss i. Rupert säger med stolthet att kabeln är den »klassiska« kanal som förbinder Alice och Bob – en vanlig radioförbindelse mellan de två parterna. Nu blir vi en aning förvirrade. Vad ska den här klassiska kanalen vara bra för? Vad är det här med sammanlänkade fotoner för något? Vad är teleportering?

Innan vi fördjupar oss i de frågorna klättrar vi upp på taket till byggnaden där en storslagen vy väntar oss. På andra sidan floden ligger byggnaden där Alice befinner sig. Mellan henne och oss strömmar floden förbi i ganska strid fart. Båtar glider sakta förbi. Några ankor och svanar simmar i det rena vattnet. På vår sida av floden, bredvid den byggnad där vi befinner oss, ligger en liten pagod uppförd av Wiens buddhistsällskap, och genast glider våra tankar in på filosofiska frågor som: Vad betyder allt det här? Vilken är vår roll i universum? Vad är det egentligen vi gör när vi observerar världen? Och vad sjutton har kvantfysik med allt det här att göra?

När vi vänder blicken västerut ser vi kullarna i Wienerwald – som faktiskt är en del av Alpernas östligaste delar – och österut ser vi utkanterna av de vidsträckta ungerska slätterna. Vi börjar tänka i historiska termer och drar oss till minnes att turkarna två gånger stormat in från öster och gjort två misslyckade försök att inta Wien. Vi kan föreställa oss hur historien hade sett ut om turkarna hade lyckats med sitt erövringsförsök. Vi tänker

också på att de frågor vi ställer, de djupa frågorna om meningen med vårt liv, kan bero på vilken kultur vi tillhör – om den är präglad av buddhism, islam eller kristendom. Det börjar bli kallt, och vi återvänder så sakteliga till livet i det moderna Wien.