

Jan-Åke Larsson

är professor och prefekt vid Institutionen för Systemteknik vid Linköpings Universitet. Han har publicerat flera artiklar om Bells olikhet, och bland annat deltagit i dataanalysen vid ett av de tre avgörande experimenten som nämns i artikeln. Hans forskning rör även kvantkryptografi, där säkerheten kan baseras på Bells olikhet, och kvantdatorer, där beräkningskraften beror på kvantmekaniska egenskaper hos de system man använder.

Man har länge debatterat om det finns en beskrivning av små fysikaliska system som är mera fullständig än den i kvantmekanik. Diskussionen är nästan lika gammal som kvantmekaniken själv, men avslutades 2015 med hjälp av tre experiment, som vart och ett visar att någon sådan mera komplett beskrivning inte är möjlig. Jan-Åke Larsson beskriver de bakomliggande idéerna och de avgörande testerna.

Bilden: Niels Bohr och Albert Einstein, fotograferade i Paul Ehrenfests hem i Leiden, december 1925. Från Wikimedia Commons.

En värld utan lokal realism

Kvantmekanik sägs vara mycket svår att förstå sig på, och en del av detta beror på att vanliga begrepp som position (Q) och hastighet (egentligen rörelsemängd P , som i klassisk mekanik är massa gånger hastighet) inte är variabler i den klassiska meningen utan snarare uppstår som mätresultat. Man kan inte beskriva rörelsen hos ett kvantmekaniskt system med hjälp av dess position och rörelsemängd, utan använder istället en vågfunktion för att beskriva systemet. Vågfunktionen, som innehåller all information om systemet, kan användas på (minst) två sätt:

1. Om man väljer att mäta position kan man ur vågfunktionen räkna ut sannolikheten för att positionsmätningen ger ett visst resultat, och
2. Om man väljer att mäta rörelsemängd kan man ur vågfunktionen räkna ut sannolikheten för att rörelsemängdsmätningen ger ett visst resultat.

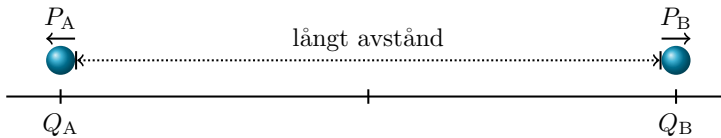
Man kan inte mäta bägge storheterna samtidigt på ett och samma system. Detta är inbyggt i kvantmekaniken på så sätt att en mätning av positionen hos ett system ändrar sannolikhetsfördelningen för rörelsemängden så mycket att man inte ens kan säga vad sannolikhetsfördelningen för rörelsemängden var före positionsmätningen, ännu mindre vad rörelsemängden hade för värde innan – eller att den ens hade något värde!

Man kan fråga sig om det måste vara så, eller om man skulle kunna ha position och rörelsemängd som samtidigt välbestämda variabler i en annan bättre teori. Frågan ställdes först av Einstein, Podolsky och Rosen i artikeln ”Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?”. Författarna (i fortsättningen EPR) argumenterar för att de här två storheterna måste motsvara verkliga egenskaper i vår fysiska verklighet,

att egenskaperna faktiskt finns och att en mätning bara talar om för oss vilket värde egenskapen har. En fullständig teori, menar de, måste innehålla allt som finns i verkligheten, så en sådan teori måste innehålla position och rörelsemängd som vanliga variabler. Därför, fortsätter de, kan inte den kvantmekaniska beskrivningen anses vara fullständig.

Ett experimentförslag från EPR

Argumentet som EPR använder är baserat på ett tankeexperiment med två delsystem, A och B , där man tänker mäta antingen rörelsemängden P eller positionen Q . Systemen förbereds så att de är korrelerade med varandra på ett speciellt sätt: en mätning av summan av positionerna ger $Q_A + Q_B = 0$ och en mätning av skillnaden av rörelsemängderna ger $P_A - P_B = 0$. Man kan förbereda systemet på detta sätt eftersom man faktiskt kan mäta $Q_A + Q_B$ och $P_A - P_B$ samtidigt, trots att man inte kan mäta delsystemens individuella positioner och rörelsemängder på samma gång.



Figur 1: EPR:s experimentförslag. Två små system arrangeras så att $Q_A + Q_B = 0$ och $P_A - P_B = 0$. Dvs. om man mäter Q_A kan man förutsäga Q_B och på samma sätt, om man mäter P_A kan man förutsäga P_B .

EPR tänker sig att de två delsystemen befinner sig på stort avstånd från varandra, och tittar sen på individuella mätningar på delsystemen av antingen position eller rörelsemängd (se figur 1). Om man nu väljer att mäta positionen för det ena delsystemet så kan man förutsäga resultatet av en positionsmätning på det andra systemet (summan av de två värdena är ju noll). Och då måste, enligt EPR, positionen för det andra delsystemet finnas som en verklig egenskap. De skriver

Om vi, utan att störa ett system, kan förutsäga med säkerhet (dvs. med sannolikhet 1) vilket resultat en mätning av en storhet skulle få, så finns en verklig egenskap som motsvarar denna storhet.

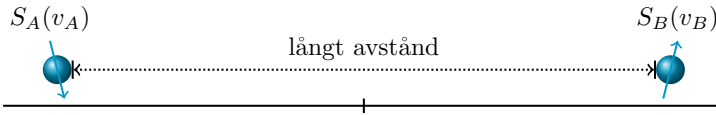
På samma sätt, om man väljer att mäta rörelsemängden för det ena delsystemet så kan man förutsäga resultatet av en rörelsemängdsmätning på det andra systemet (skillnaden mellan de två värdena är ju noll). Så då måste rörelsemängden för det andra delsystemet finnas som en verklig egenskap hos det delsystemet. EPR argumenterar alltså för att *både* position och rörelsemängd samtidigt måste finnas som verkliga egenskaper hos det andra delsystemet, för i annat fall kommer

... existensen av P och Q bero på vilken mätning man har valt att göra på det första delsystemet, men detta val påverkar inte det andra delsystemet överhuvudtaget. Ingen rimlig definition av existens kan förväntas medge detta.

Bara några månader efter EPR:s artikel besvarade Niels Bohr deras kritik i en artikel med samma namn som deras. Bohr skriver:

... vi pratar inte om en ofullständig beskrivning där man fritt kan välja en storhet, och göra så att den blir en verklig egenskap mot att man offerar andra storheter, utan om en rationell uppdelning mellan helt skilda experimentuppställningar och -procedurer lämpliga för antingen en otvetydig användning av idén om position i rummet, eller en berättigad användning av lagen om rörelsemängdens bevarande.

Bohr ansågs ha vunnit debatten: den allmänna åsikten var att det inte verkar finnas någon verklighet att beskriva, att egenskaperna helt enkelt inte finns utan att resultaten skapas i mätningen. Först långt senare insåg John S. Bell att Bohrs argument är ofullständigt. Han upptäckte nämligen att precis det system som EPR använder i sitt argument *faktiskt medger* en mer fullständig beskrivning. Men kanske var det som Bell antyder, att Bohr förväntade sig att det finns system som *inte* kan ha någon mer fullständig beskrivning. Men det behövs förstås ett tydligt exempel som visar att detta faktiskt är fallet.



Figur 2: EPR-Bohm-Bells experimentförslag. De två delsystemen är spinn-1/2 system, och spinn-mätningarna görs var och en längs en riktning v_A eller v_B . Systemet är förberett så att om riktningarna väljs lika ($v_A = v_B = v$) så är $S_A(v) + S_B(v) = 0$.

Exemplet man behöver föreslås av Bohm utan bevis, se figur 2. Skillnaden mot EPR:s förslag är att man istället för position och rörelsemängd använder spinnmätningar, dvs. mätningar av magnetisk fältstyrka längs en vald riktning (egentligen s.k. dipolmoment). Vi kan inte här gå in på alla detaljer men några få saker är bra att veta. De två delsystemen har spinn (dipolmomentet) kvantiserat till två värden: ”spinn upp” eller ”spinn ned”, och för det mesta använder man ± 1 som etiketter på dessa värden. Man måste förstås välja längs vilken riktning man ska mäta spinnets i förväg, och man kan inte mäta längs två riktningar samtidigt, precis på samma sätt som man inte kan mäta P och Q samtidigt.

Systemet förbereds så att det har totalt spinn 0, dvs. så att summan av delsystemens spinn är noll om man mäter längs samma riktning v vilken riktning man än väljer: $S_A(v) + S_B(v) = 0$. Återigen ordnar man så att delsystemen är långt från varandra, och resonemanget är likadant som förut: Om man väljer att mäta längs en viss riktning för ena delsystemet så kan man förutsäga mätresultatet längs samma riktning för det andra delsystemet, eftersom summan av resultaten måste bli noll. Och eftersom valet av mätriktning för det ena delsystemet inte kan påverka det andra delsystemet, så måste spinnets värde (upp eller ned) finnas för det andra delsystemet som en verklig egenskap för *alla* möjliga mätriktningar. Skillnaden är att medan man i EPR:s experiment bara har två alternativ (P eller Q), finns här många fler riktningar att välja bland, faktiskt oändligt många.

Enligt kvantmekaniken finns inte spinnets värden innan de har uppmätts, så i EPR:s mening kan teorin inte utgöra en fullständig modell för experimentet. Men även för detta experiment finns faktiskt en annan, mera fullständig modell som innehåller värden för spinnets i alla riktningar. Modellen fungerar bra så länge man bara betraktar fall där mätriktningarna för de två delsystemen är lika, varvid summan av spinnvärdena alltså är noll. Men om man

tillåter olika mätriktningar för de två delsystemen, så får man inte samma förutsägelser som från kvantmekanik. Detta är huvudingrediensen i något som Bell observerade: man kan dra nytta av att man har fler än två val i Bohms version av experimentet.

Bells olikhet

Bell bevisade att om experimentet följer kvantmekanikens förutsägelser, så *kan* det inte finnas någon mera fullständig beskrivning. Mer specifikt lyckades Bell härleda en statistisk olikhet som kvantmekaniken bryter mot. Den kallas numera Bells olikhet och gäller under två antaganden som sammantaget brukar benämnas *lokal realism*:

Realism: Mätresultaten för alla val av mätriktningar ges av verkliga egenskaper, som existerar oberoende av om de mäts eller ej. (Dessa kallas ibland ”dolda variabler”).

Lokalitet: Valet av mätriktning för ena delsystemet påverkar inte mätresultatet vid det andra.

Dessa två antaganden är förstås helt i EPR:s anda.

Den olikhet som Bell härleder begränsar korrelationen mellan de två mätvärdena. I matematisk notation använder man bokstaven E så att korrelationen skrivs $E(S_A(v_A) S_B(v_B))$. Detta är ett tal mellan $+1$ och -1 som berättar om mätvärdena $S_A(v_A)$ (spinn för delsystem A längs riktning v_A) och $S_B(v_B)$ (spinn för delsystem B längs riktning v_B) ofta är lika eller olika: om talet är nära $+1$ så är mätvärdena ofta lika, medan om talet är nära -1 så är mätvärdena ofta olika. Man kan nu uttrycka villkoret $S_A(v) + S_B(v) = 0$ (dvs. att resultatet vid mätning i samma riktning alltid är olika) som $E(S_A(v) S_B(v)) = -1$.

Olikheten förekommer i flera olika versioner. Den version som Clauser, Horne, Shimony och Holt¹ (CHSH) tog fram lyder

$$\left| E(S_A(v_1)S_B(v_2)) + E(S_A(v_3)S_B(v_2)) \right| + \left| E(S_A(v_3)S_B(v_4)) - E(S_A(v_1)S_B(v_4)) \right| \leq 2$$

¹ J. F. Clauser, M. A. Horne, A. Shimony och R. A. Holt, *Proposed Experiment to Test Local Hidden-Variable Theories*, Phys. Rev. Lett. **23**, 880–884 (1969) (DOI: 10.1103/PhysRevLett.23.880).

och fungerar som följer. Den innehåller fyra riktningar v_1, v_2, v_3 och v_4 , där de med udda nummer avser mätning på det ena delsystemet och de med jämnt nummer avser mätning på det andra. Om man skriver om olikheten lite grann så får man

$$E(S_A(v_1)S_B(v_4)) \leq E(S_A(v_1)S_B(v_2)) + E(S_A(v_3)S_B(v_2)) + E(S_A(v_3)S_B(v_4)) + 2$$

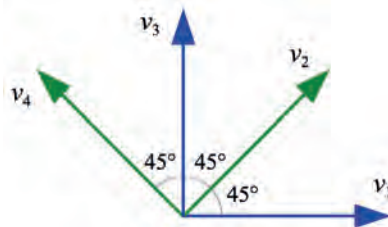
Detta innebär till exempel att om korrelationen är nära -1 (dvs. mätresultaten är oftast olika) om man väljer riktning 1 för det ena delsystemet respektive riktning 2 för det andra, och likadant för riktning 2 respektive 3, och likadant för riktning 3 respektive 4, då *måste* korrelationen vara nära $3 \cdot (-1) + 2 = -1$ om man väljer att mäta i riktning 1 respektive riktning 4. Det räcker med att de tre korrelationerna i högerledet alla är mindre än $-2/3$ för att tvinga korrelationen i vänsterledet att vara mindre än noll, vilket ju innebär att resultaten är olika oftare än de är lika.

När man testar olikheten i experiment använder man oftast riktningar i ett plan som är 45° åtskilda i nummerordning, så att vinkeln mellan v_1 och v_4 blir 135° , se figur 3. Då ger kvantmekaniken (KM) följande förutsägelser för de fyra termerna i olikheten:

$$\begin{aligned} E_{KM}(S_A(v_1)S_B(v_2)) &= -\frac{1}{\sqrt{2}} < -\frac{2}{3} \\ E_{KM}(S_A(v_3)S_B(v_2)) &= -\frac{1}{\sqrt{2}} < -\frac{2}{3} \\ E_{KM}(S_A(v_3)S_B(v_4)) &= -\frac{1}{\sqrt{2}} < -\frac{2}{3} \\ E_{KM}(S_A(v_1)S_B(v_4)) &= +\frac{1}{\sqrt{2}} > 0 \end{aligned}$$

Enligt Bells olikhet måste den fjärde termen, $E(S_A(v_1) S_B(v_4))$, vara negativ för ett lokal-realistiskt system, men förutsägelsen från kvantmekanik anger alltså att den är positiv. Slutsatsen är att om man har ett system som följer förutsägelsena från kvantmekanik så kan det inte finnas någon lokal-realistisk modell som beskriver systemet. Detta *brott mot lokal realism* säger oss att det helt enkelt inte kan finnas en mera fullständig modell för kvantmekaniska system.

Figur 3: Det val av mätriktningar som diskuteras i texten, och som leder till ett brott mot Bells olikhet. De två färgerna motsvarar mätriktningarna vid respektive delsystem.



Experiment och luckor i resonemanget

Vi har därmed sett att kvantmekanikens förutsägelser bryter mot lokal realism. Men den verkligt brännande frågan är förstås: Bryter *världen* mot lokal realism? Det skulle ju kunna vara så att kvantmekanik fungerar bra så länge man beskriver system som inte bryter mot lokal realism, men att teorins förutsägelser fallerar i just de här specialfallen. Därför är det viktigt att testa detta i riktiga experiment.

Och här märker man skillnaden mellan resonemanget i EPR-Bohm och Bells olikhet. EPR-Bohm använder enbart korrelation -1 (alltid motsatt resultat) vid val av lika mätriktningar. Men i ett verkligt experiment kommer det alltid att finnas brus, så man kommer aldrig att få ett perfekt resultat med korrelation -1 . Man kan inte testa EPR i ett experiment; minsta brus förstör resultatet. Men så är det inte för Bells olikhet. Bell-CHSH behöver bara tre korrelationer som är mindre än $-2/3$ och en som är större än 0 , vid olika val bland fyra *olika* mätriktningar. Detta är orsaken till att Bells olikhet är ett så mycket starkare argument än EPR.

När Bell formulerade olikheten på sextioalet hade man ännu inte gjort korrelationsexperiment på denna typ av system. Det skulle dröja ända till sjuttioalet innan man började göra experiment som var tillräckligt bra. Experimenten använder i regel polariserade fotoner som har samma beteende som spinn- $1/2$ -system (först på 2000-talet finns det några undantag, mer om det nedan). Ett tidigt fotonexperiment gjordes av Freedman och Clauser som använde stora lådor med glasskivor för att skilja horisontell polarisation (som motsvarar ”spinn upp”) från vertikal polarisation (”spinn ner”). De hade varje låda i en vridbar ram för att kunna ändra mätriktning, men eftersom de bara kunde vrida ramarna långsamt, gjorde de många experiment i rad med samma val av mätriktning. Ett sådant förfarande gör det svårt att vara säker på att valet av mätriktning för det ena delsystemet inte påverkar mätresultatet vid det andra.

Detta gör att man inte riktigt kan veta om förutsättningen ”lokal” i Bells olikhet är uppfylld. Man brukar prata om en ”lucka” i resonemanget (på engelska används termen ”loophole”): Hur vet man om det som ser ut som ett brott mot Bells olikhet verkligen är det, om inte experimentet uppfyller alla förutsättningar? Det finns i huvudsak tre olika typer av luckor som man kan råka ut för i detta sammanhang:

1. att vara säker på att experimentet är ”lokalt”,
2. att få data från samtliga försök i ett experiment, och
3. andra antaganden som förenklar experimentet.

Den tredje punkten, om förenklande antaganden, kan man numera undvika, men experimenten är svåra att utföra och speciellt var det så på sjuttioalet. I artiklar från den tiden kan man ibland se att de till exempel antagit att delsystemen är rotations-symmetriska. Om så är fallet behöver man nämligen inte använda alla fyra kombinationer av mätriktningar, utan det räcker med två. Ett annat antagande kan vara att bruset i systemet har speciella egenskaper. Om man låter bli att anta sådana här saker blir experimenten mera komplicerade eller mera känsliga för brus, men det är något man får hantera, och den här typen av antaganden är idag ovanliga.

För att experimentet ska uppfylla förutsättningen ”lokalt” måste man vara säker på att valet av mätriktning för ett delsystem inte ska kunna påverka mätresultatet för det andra. Därför brukar man använda snabbt varierande mätriktningar, valda så nära inpå sin mätning i både rum och tid att informationen om mätinställningen inte skulle kunna nå fram till det andra delsystemet ens med ljusets hastighet. Det experiment som först lyckades göra detta är också det mest kända Bell-experimentet, utfört av Aspect, Dalibard och Roger 1982². Här väljs mätinställning med hjälp av ett separat snabbt roterande system.

Om man gör så får man dock ett annat problem: även om mätinställningen varierar snabbt så kan den i princip förutsägas långt i förväg, och då kan förstås den informationen finnas tillgänglig i förväg också vid det andra delsystemet. Därför vore det ännu bättre att välja mätinställning med hjälp av en riktig slump-talsgenerator. Det första experimentet som gjorde detta är Weihs m.fl.³

Moderna experiment använder snabba och vältestade slump-talsgeneratorer, men man kan fortfarande ha invändningar. Hur vet man att slump-talsgeneratorerna, trots att de ser ut att generera helt slumpmässiga mätinställningar, inte har en gemensam orsak med det system man mäter på? Man diskuterar att använda ljus

2 A. Aspect, J. Dalibard och G. Roger. *Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers*, Phys. Rev. Lett. **49**, 1804-1807 (1982) (DOI: 10.1103/PhysRevLett.49.1804).

3 G. Weihs m.fl., *Violation of Bell's Inequality under Strict Einstein Locality Conditions*, Phys. Rev. Lett. **81**, 5039-5043 (1998) (DOI: 10.1103/PhysRevLett.81.5039).

från avlägsna kvasarar som slumptalskälla, för att på så sätt tvinga en eventuell gemensam orsak så långt tillbaka i tiden som möjligt, ju längre tillbaka desto bättre. Det verkar inte rimligt att ett slumpstal från en foton skapad för miljarder år sedan skulle ha en gemensam orsak med ett mätresultat från en foton skapad i ett experiment här på jorden. Extremvarianten av detta, så kallad ”superdeterminism”, är att hela universums utveckling (för all framtid) är förutbestämd, men detta kan man aldrig motbevisa med vetenskapliga metoder, så de flesta aktiva i fältet ägnar inte mycket uppmärksamhet åt denna idé.

Ytterligare en möjlighet är att använda människor som slumpalsgeneratorer, med hänvisning till människors fria vilja. Man gjorde just det i ”The Big Bell test” under november 2016, då människor över hela världen deltog genom att generera slumpmässiga sekvenser av ettor och nollor i ett mobilspel. Slumptalen användes sedan för att välja mätriktningar i 12 olika experiment världen över.⁴ Det är visserligen välkänt att människor är dåliga slumpalsgeneratorer, men det är svårt att argumentera för att över 100 000 människors val skulle ha gemensamma orsaker med ett dussin experiment spridda över världen.

Den andra luckan i listan ovan är en lite mera dold förut-sättning i Bells olikhet. För att kunna testa olikheten måste man göra en uppskattning av hur stor varje korrelation är. Och detta gör man genom upprepade experiment – man tar medelvärdet av många försök. Men speciellt när man använder fotoner råkar man ut för att några av försöken inte ger något resultat alls, varken horisontell eller vertikal polarisation (motsvarande värdena +1 och -1). I tidiga experiment såg man bara 0,1% av alla fotoner, men i moderna experiment handlar det om uppåt 80%. Den data man får ut kommer alltså bara från en delmängd av alla försök, vilket är ett problem när det är en statistisk utsaga som ska testas. Hur vet man att de data man får utgör ett rättvist urval?

Problemet upptäcktes i början av sjuttioalet av Philip Pearle, men i alla experiment fram till tidigt 2000-tal fick man nöja sig med att anta att man hade fått ett rättvist urval. Man hade alltså en lucka i resonemanget: tänk om det inte var så? En ny teknik som användes av Rowe m.fl.⁵ använder inte fotoner utan joner i en jon-

⁴ Se vidare <https://thebigbelltest.org/>.

⁵ M. A. Rowe m.fl., *Experimental violation of a Bell's inequality with efficient detection*, Nature **409**, 791-794 (2001) (DOI: 10.1038/35057215).

fälla, och då får man svar från varje försök eftersom jonerna är lätta att hitta. Problemet där är istället lokalitetsantagandet, eftersom avståndet mellan jonerna endast är 3 μm medan varje mätning tar 1 ms (vilket motsvarar 300 km vid ljusets hastighet). Jonerna är helt enkelt för nära varandra. Om avstånden ska vara stora är det enklast att använda fotoner, men då får man alltså acceptera att man inte har 100% av all data. Man kan dock ta hänsyn till detta i olikheten. Om η är den andel försök från vilka man får data kan man visa en modifierad form av Bells olikhet:

$$\left| E(S_A(v_1)S_B(v_2)) + E(S_A(v_3)S_B(v_2)) \right| + \left| E(S_A(v_3)S_B(v_4)) - E(S_A(v_1)S_B(v_4)) \right| \leq \frac{4}{\eta} - 2.$$

Kvantmekaniken bryter mot olikheten först när $\eta > 83\%$, och det är först helt nyligen som den experimentella utrustningen har blivit tillräckligt bra för att ens komma i närheten.

Man kan säga att experimentet av Weihs m.fl. först stängde lokalitets-luckan, medan experimentet av Rowe m.fl. först stängde effektivitets-luckan, och dessa två ger *tillsammans* ett starkt argument för att världen bryter mot lokal realism. Men man har fortsatt att förbättra experimenten; slutmålet har hela tiden varit att stänga båda luckorna i samma experiment. Ett antal forskargrupper gjorde bättre och bättre experiment under tidigt 2000-tal – det blev lite som en tävling. Och 2015 nådde man fram, med tre experiment som vart och ett för sig *samtidigt* stänger båda två luckorna (och som inte heller gör några andra förenklande antaganden): Hensen m.fl.⁶, Giustina m.fl.⁷, och Shalm m.fl.⁸

Det första experimentet använder kvävedefekter i diamant som delsystem, vilket precis som jonfallor har fördelen att man får mätvärden från 100% av de försök man gör. Man kan alltså direkt använda Bell-CHSH:s olikhet och förbereda systemet enligt ovan. Men en nackdel är att man har ganska högt brus och bara lyckas förbereda delsystemen på rätt sätt cirka en gång per timme (totalt 245 mätresultat) vilket gör att den statistiska signifikansen inte är så bra för experimentet. De andra två experimenten använder fo-

6 B. Hensen m.fl., *Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres*, Nature **526**, 682–686 (2015) (DOI: 10.1038/nature15759).

7 M. Giustina m.fl., *Significant-Loophole-Free Test of Bell's Theorem with Entangled Photons*, Phys. Rev. Lett. **115**, 250401 (2015) (DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.250401).

8 L. K. Shalm m.fl., *Strong Loophole-Free Test of Local Realism*, Phys. Rev. Lett. **115** (2015). (DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.250402).

toner, en annan Bell-olikhet och ett system förberett lite annorlunda, i ett annat kvanttillstånd (för mer detaljer, se lästipsen nedan). Med dessa modifieringar kan man bryta mot lokal realism ända ner till 67% effektivitet, och bägge experimenten når strax över 75%. Dessa experiment har mindre brus och ger i storleksordningen miljarder mätresultat per timme, så de har mycket bättre statistisk signifikans än det förstnämnda experimentet. Mätdata från alla tre bryter mot olikheten.

Avslutande kommentarer

Slutsatsen är att världen bryter mot lokal realism. Det finns två sätt att se på det här, att släppa realism, eller ha realism kvar men släppa lokalitet. Första alternativet innebär att det inte finns någon mer fullständig beskrivning av naturen än kvantmekanik. Vi kan helt enkelt inte förutsätta att små system har egenskaper som position och rörelsemängd som verkliga egenskaper. En foton eller en elektron är inte någon särskild stans förrän vi mäter dess position. Partikeln finns inte där förrän vi tittar på den. Och i förlängningen består ju all materia av elementarpartiklar. Så slutsatsen tycks bli att månen inte finns där, om inte någon tittar på den. Eller?

Det andra alternativet, att ge upp lokaliteten till förmån för realismen, innebär att det finns en mer fullständig beskrivning men att den är icke-lokal, dvs. tillåter påverkan snabbare än ljuset. Men då uppstår genast andra frågor, som om man skulle kunna använda kvantmekaniska system för att kommunicera snabbare än ljuset. Just den frågan har ett negativt svar vilket man kan bevisa med hjälp av en kvantmekanisk beräkning, men det finns andra saker att fundera på, som om det finns någon ny kraft som förmedlar påverkan eller om det finns en annan högre gränshastighet för den. Hur som helst måste man bestämma sig för vilket av alternativen man gillar mest (eller kanske ogillar minst!): att det inte finns någon verklighet, eller att påverkan kan ske snabbare än ljuset.

Vetenskapligt sett är den mest svårlösta frågan hur man sammanfogar kvantmekanik och relativitetsteori. Båda teorierna fungerar bra inom sitt användningsområde, men kvantmekanik (och världen) tillåter ingen lokal-realistisk modell, medan relativitetsteori i grunden *är* just en sådan modell. Det finns ingen direkt motsägelse eftersom man inte kan kommunicera snabbare än

ljuset med kvantmekaniska system, men teorierna fungerar dåligt tillsammans. Och det är en öppen fråga vad man kan eller bör göra. Idag har man rätt få bra idéer. Kanske kan man ändra relativitetsteori på något sätt, eller också måste man modifiera både kvantmekanik och relativitetsteori så att de passar ihop.

Efter drygt hundra år med kvantmekanik och lite drygt femtio år med Bells olikhet har vi nu i alla fall ett tydligt svar på en av våra frågor: naturen bryter mot lokal realism. Men det finns obesvarade frågor kvar, så arbetet går vidare. ❖

För vidare läsning

- A. Einstein, B. Podolsky och N. Rosen, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?* Phys. Rev. **47**, 777-780 (1935) (DOI: 10.1103/PhysRev.47.777).
- N. Bohr, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?* Phys. Rev. **48**, 696-702 (1935) (DOI: 10.1103/PhysRev.48.696).
- J. S. Bell. *On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox*, Physics (N. Y.) **1**, 195-200 (1964).
- J.-Å. Larsson, *Loopholes in Bell inequality tests of local realism*, J. Phys. A **47**, 424003 (2014) (DOI: 10.1088/1751-8113/47/42/424003).

