

## Einstein missade "spöklik avståndsverkan" men kan ha rätt om verkligheten

Nobelpriset i fysik 2022 gick till John Clauser, Alain Aspect och Anton Zeilinger för att de i olika steg gjort experiment som visar att sammanflätning stämmer med kvantmekanikens beräkningar (FoF 2022/10). Sammanflätning betyder i korthet att två partiklar som varit nära varandra och växelverkat på ett visst sätt fortsätter att vara ett system så att en mätning på en partikel kan tyckas omedelbart påverka den andra partikeln och mätningar på denna, även om de rört sig långt ifrån varandra. Detta ansåg dock Albert Einstein var helt oacceptabelt och beskrev det som "spöklik avståndsverkan" eller "telepati" i sin kritik av kvantmekaniken.

Einstein fick för hundra år sedan (1922) 1921 års Nobelpris i fysik, men inte för relativitetsteorin, som han är mest känd för, utan för förklaringen till den fotoelektriska effekten, som inte kan förklaras med ljus som en elektromagnetisk våg. Einstein hade gått vidare med Max Plancks idé om kvantiserad energi och fastslog att ljusenergi kommer i en ström av små paket, kvanta eller fotoner. Han bidrog med detta avgörande steg till framväxandet av kvantmekaniken, som framgångsrikt beskriver mätningar gällande atomernas värld. Men Einstein slutade aldrig att vara kritisk till den s.k. Köpenhamns-tolkningen av kvantmekaniken. Den säger i korthet att all information som vi kan ha om ett system finns i den s.k. vågfunktionen som t.ex. beskriver sannolikheten för flera möjliga lägen för en partikel men påstår att partikeln saknar verkligt läge innan det görs en mätning.

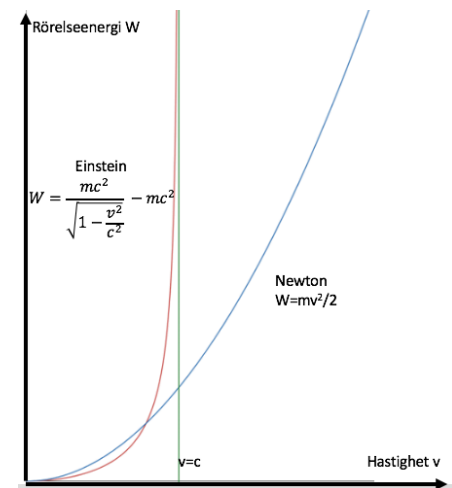
Einstein använde tankeexperiment i sin kritik och ett tidigt exempel är "Einsteins lådor", här i Louis de Broglies version. Om vi har en partikel i en låda så beskriver den kvantmekaniska vågfunktionen sannolikheten för var i lådan partikeln finns vid en mätning. Lådan delas i två lådor och låda L1 förs till Paris och låda L2 till Tokyo. Vågfunktionen är nu sammansatt av två delar: en del som beskriver sannolikheten för att partikeln vid en mätning finns i L1 och den andra delen som beskriver sannolikheten för att partikeln vid en mätning befinner sig i L2.

Om nu någon tittar efter (gör en mätning av partikelns läge) i L1 i Paris och finner att ingen partikel finns där är det omedelbart hundra procent säkert att partikeln finns i L2 i Tokyo redan innan någon mätning görs i Tokyo. Einstein menar att om något kan förutsägas med hundra procents säkerhet måste det vara verkligt och då det som händer i Paris inte omedelbart kan påverka det som händer i Tokyo, måste partikeln efter delningen av lådan ha funnits i L2 hela tiden. Och eftersom kvantmekaniken med vågfunktionen inte kan beskriva partikelns verkliga läge innan en fysisk mätning av partikeln, kan inte kvantmekaniken beskriva hela verkligheten. Alltså är kvantmekaniken ofullständig. Det måste finnas dolda variabler som visar var partikeln finns.

Einstein, Podolsky och Rosen utvecklar 1935 kritiken av kvantmekaniken, i den berömda EPR artikeln, med ett tankeexperiment gällande par av partiklar som växelverkat en begränsad tid. Efter mätning på en partikel kan vi omedelbart med 100 procent säkerhet veta vad resultatet av en mätning på den andra partikeln skulle bli, fast partiklarna är på långt avstånd från varandra och kan antas inte växelverka. Slutsatsen är den samma som med Einsteins lådor: Det finns en verklig egenskap innan mätningen som inte beskrivs av kvantmekaniken. Så kvantmekaniken är ofullständig och det måste finnas en fullständigare beskrivning, med dolda variabler. För att undvika denna slutsats, skriver Einstein senare, kan man förneka att partiklarna har oberoende verkliga egenskaper när de är på långt avstånd (förneka realism) eller tillåta att en mätning på den ena partikeln telepatiskt påverkar den andra, (dvs. omedelbart eller snabbare än ljuset) (förneka lokalitet). Båda alternativen anser Einstein är helt oacceptabla. Men varför är det oacceptabelt med påverkan snabbare än ljuset?

I Newtons mekanik finns ingen hastighetsgräns. Och fysiker som t.ex. Arnold Sommerfeld diskuterade elektroner med överljushastighet så sent som ett par månader innan Einsteins berömda artikel om den speciella relativitetsteorin 1905.

Där härleder Einstein ett nytt samband mellan energi, massa och hastighet som visar att energin ökar mycket snabbare än enligt Newtons formel och att det krävs oändlig energi för att nå ljushastigheten. Einstein skriver "Således när  $v=c$  [hastigheten=ljushastigheten] blir  $W$  [energin] oändlig. Hastigheter större än ljusets ... har ingen möjlighet att existera." (min övers.)



Märkligt nog, förutom ett par artiklar på 20-talet som diskuterar överljushastighet, dröjde det nästan 60 år, och 7 år efter Einsteins död, innan tre fysiker i American Journal of Physics 1962 påvisade att Einsteins slutsats inte är korrekt. Det Einstein hade visat var det skulle gå åt oändlig energi att *accelerera* (dvs starta långsamt och öka) en elektron till ljushastigheten. Men acceleration är inte det enda sättet att få hög fart, vilket ljus tydligt visar. Ljus startar inte långsamt och ökar sin hastighet utan "föds med ljushastigheten". Einsteins teori kan alltså inte utesluta att det också kan finnas något som från börjar har en hastighet större än ljusets. De har spekulerats om det kunde vara partiklar, som då kallas tachyoner från grekiskans "tachy"= snabb. De första försöken i världen för att experimentellt försöka påvisa tachyoner gjordes i mitten på 60-talet på Vetenskapsakademins forskningsinstitut för experimentell fysik ("Nobel institute for Physics") av Torsten Alväger, Peter Erman och Jan Blomqvist. Men dom hittade med sina metoder inga tachyoner. Och det har ingen annan heller gjort. Vilket inte bevisar att de inte kan finnas, men att det kanske inte är partiklar utan något annat fenomen som kan beskrivas med överljushastighet.

David Bohm utvecklade 1952 EPR:s ide genom tankeexperimentet att på sammanflätade partiklar mäta spinn i flera olika riktningar, ja hur många olika riktningar som helst, men alltid samma riktning på båda partiklarna i ett givet par. Här går det ännu att formulera en lokalt realistisk teori, med lokala dolda variabler, som ger samma resultat som kvantmekaniken.

John Bell gör 1962 ett teoretiskt genombrott. Hans geniala drag är att om man mäter spinn i *olika riktningar* på de två partiklarna i *samma par*, får han med antaganden i Einsteins anda ett statistiskt resultat för samband mellan mätningarna på de två partiklarna, den s.k. Bells olikhet. Men man får ett annat och starkare samband om räknar enligt kvantmekaniken.

John Clauser vidareutvecklar Bells ide så att det blir möjligt att göra verkliga experiment och de nu prisbelönta experimenten visar att kvantmekanikens beräkningar stämmer. Så något av de antaganden Bell gör måste vara fel. Detta flesta är överens om att de antaganden Bell gör i Einsteins anda kan beskrivas som *lokal realism*:

Realism: partiklarna har verkliga egenskaper oberoende om de mäts eller ej.

Lokalitet: en mätning på den ena partikeln kan inte påverka den andra partikeln snabbare än ljuset.

Något av dessa antaganden måste vara fel och vi har åtminstone två möjligheter som har helt olika inverkan på vår världsbild:

Att välja bort realism och behålla lokalitet. Det finns då inte någon mer fullständig beskrivning än kvantmekaniken, dvs inga dolda variabler, och inget går fortare än ljuset. Och partiklar finns inte innan det görs någon mätning, vilket ibland drastiskt uttrycks som att verkligheten inte finns innan vi ser på den.

Men varför många tycks välja bort realismen har jag svårt att förstå när det finns ett mindre drastiskt alternativ:

Att behålla realism och välja bort lokaliteten. Då finns en mer fullständig beskrivning än kvantmekaniken, dvs icke-lokala dolda variabler finns och påverkan snabbare än ljuset krävs.

Dock har anförts mot existensen av tachyoner att de skulle kunna röra sig bakåt i tiden och orsaka självupphävande orsakskedjor. Det finns i fysiktidskrifter en rätt omfattande, tidvis komplicerad, diskussion om detta. Ofta beror "paradoxerna" på att man otillbörligt blandar ihop beskrivningar från olika observatörer som rör sig relativt varandra. En del av lösningen på många "paradoxer" är också att i de system där tachyoner rör sig bakåt i tiden har de även negativ energi, så de är istället anti-tachyoner med positiv energi som rör sig framåt i tiden fast åt motsatt håll i rummet. Denna s.k. omkastningsprincip beskrevs redan 1962 och av Alväger i Kosmos 1970. Möjligen kvarstår paradoxer om överljuspåverkan kan användas som signaler, men om överljuspåverkan är relaterad till sammanflätning kan den lika lite som sammanflätning användas till signaler.

Det är däremot lätt att i den speciella relativitetsteorin visa följande: Om en händelse A med överljushastighet påverkar en senare händelse B i samma system S, finns en hel grupp av observatörer, som rör sig snabbare än en viss hastighet men långsammare än ljuset i förhållande till S, för vilka händelsen B kommer före händelsen A. Detta tog Einstein upp redan 1907 och skrev:

"Detta resultat betyder att vi skulle behöva överväga möjligheten av en överföringsmekanism vars användning skulle ge en effekt som *föregår* orsaken (åtföljd av en viljehandling till exempel)." (kursiv i orig, min övers.) Och intressant hur han fortsätter:

"Även om detta resultat enligt min uppfattning inte innehåller någon motsägelse rent logiskt, så strider det så absolut mot karaktären av alla våra erfarenheter att omöjligheten av antagandet [hastighet större än ljusets] är tillräckligt bevisat av resultatet." (min övers.)

Det var alltså för Einstein inte ett logiskt problem utan att det saknades erfarenheter. Men det är nog precis en sådan erfarenhet av överljushastighet vi nu har med sammanflätning - om vi förklarar den med realism och icke-lokalitet, dvs dolda variabler och överljushastighet. Och det finns de som menar att om Einstein fått se de experimentella resultat som tvingar oss till att överge lokal realism hade han valt realism och att påverkan snabbare än ljuset existerar. Och Einstein kan nu mycket väl ha rätt om verkligheten.

Jan Pilotti

[pilotti.jan@gmail.com](mailto:pilotti.jan@gmail.com)

Förslag till vidare läsning:

Albert Einstein. On the inertia of Energy required by the Relativity Principle. The collected papers of Albert Einstein Volume 2: The Swiss Years: Writings, 1900-1909 (English translation supplement), 1907, pp. 238-250

<https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol2-trans/252> pp. 247-248

O. M. P. Bilaniuk, V. K. Deshpande and E. C. G. Sudarshan, 'Meta' Relativity. *Am. J. Phys.* **30**, 718–723 (1962). <https://doi.org/10.1119/1.1941773>

Torsten Alväger. Om överljushastighet. *Kosmos. Svenska Fysikersamfundets Årsbok 1970*, sid 103–106.

Jan-Åke Larsson. En värld utan lokal realism. *Kosmos. Svenska Fysikersamfundets Årsbok 2017*, sid. 28–40  
<http://www.fysikersamfundet.se/wp-content/uploads/2017-02.pdf>