

EPR och den överkliga verkligheten

Sören Holst

Albert Einstein kunde inte acceptera kvantfysikens besynnerliga bild av verkligheten. Han vägrade tro att fysikens grundläggande processer skulle vara slumpmässiga eller att naturens minsta enheter skulle vara behäftade med inneboende osäkerhet.

I en berömd artikel från år 1935 ifrågasätter Einstein, tillsammans med Boris Podolsky och Nathan Rosen, kvantfysikens anspråk på att utgöra en grundläggande verklighetsbeskrivning. Redan artikelns titel skvallrar om författarnas tvivel: *Can quantum-mechanical description of reality be considered complete?* Här formuleras det som skulle komma att bli 1900-talets mest omskrivna och kontroversiella tankeexperiment: EPR-paradoxen, uppkallad efter författarnas initialer.

Resonemanget kretsar kring Heisenbergs osäkerhetsrelation: den ömsesidiga obestämdheten i en partikels läge och rörelsemängd. Bara en av dessa storheter kan, enligt kvantfysiken, ha ett entydigt och välbestämt värde åt gången; ju mer välbestämd den ena storheten är, desto osäkrare är den andra. Men hur ska detta påstående egentligen uppfattas? Ligger osäkerheten i partikelns *faktiska* egenskaper, eller handlar det snarare om att vår *kunskap* om partikeln är begränsad?

För att finna svaret föreställer sig artikelförfattarna två partiklar, 1 och 2, på stort avstånd från varandra. Partiklarnas positioner x_1 och x_2 är helt okända, liksom deras rörelsemängder, p_1 respektive p_2 . Man vet således varken var partiklarna befinner sig eller hur de rör sig. Dock känner man till något om *kombinationen* av deras egenskaper. För det första vet man vilket avståndet är mellan dem: skillnaden mellan deras positioner, $x_1 - x_2$, är välbestämd. För det andra känner man till partiklarnas sammanlagda rörelsemängd, $p_1 + p_2$.

Denna vetenskap är helt i linje med Heisenbergs relation. Den förbjuder nämligen bara samtidig kännedom om läget och rörelsemängden hos varje enskild partikel. Men skillnaden $x_1 - x_2$ kan vara välbestämd och känd på samma gång som summan $p_1 + p_2$.

Säg nu att partikel 2 befinner sig mycket långt bort, att det i själva verket endast är partikel 1 som man har tillgång till och kan utföra mätningar på. Är det då ändå möjligt att få reda på något om partikel 2?

Ja. Eftersom avståndet mellan partiklarna är känt, så behöver man bara ta reda på var partikel 1 är för att också få veta var partikel 2 är. En mätning av partikel 1:s läge x_1 avslöjar partikel 2:s läge x_2 .

På motsvarande sätt kan man få reda på rörelsemängden hos partikel 2: Man mäter partikel 1:s rörelsemängd p_1 , och utnyttjar sedan kunskapen om partiklarnas sammanlagda rörelsemängd.

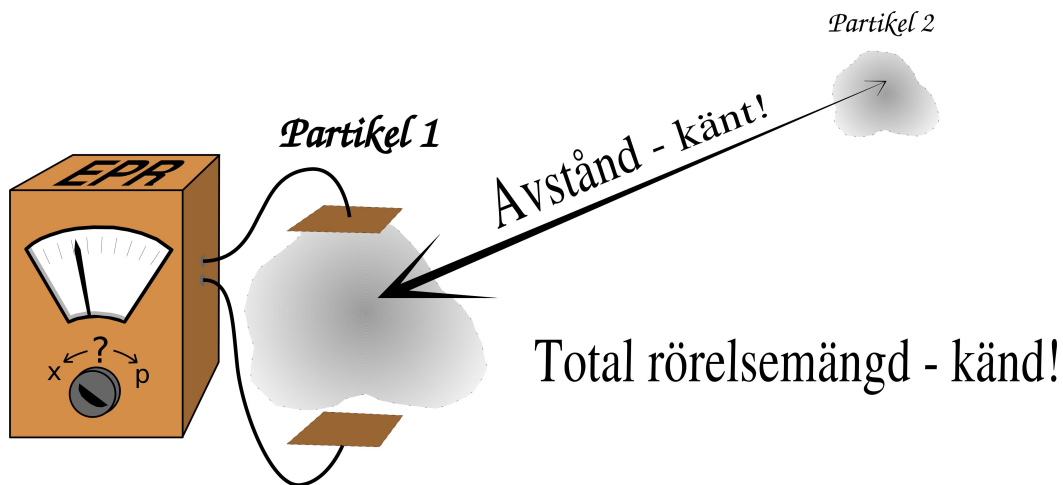
Dock kan man inte på detta sätt få reda på partikel 2:s rörelsemängd om man redan har gjort en lägesmätning på partikel 1. En lägesbestämning påverkar ju, enligt Heisenbergs relation, värdet på rörelsemängden på ett oförutsägbart sätt. I och med lägesmätningen går man därför miste om

informationen om partiklarnas sammanlagda rörelsemängd. Av samma skäl kan man inte använda informationen om avståndet mellan partiklarna efter det att rörelsemängden p_1 har fastställts.

När man har förberett sina två partiklar i EPR:s korrelerade tillstånd står man alltså inför ett val: att mäta antingen läget, x_1 , eller rörelsemängden, p_1 , för partikel 1. Väljer man lägesmätningen får man även reda på x_2 ; väljer man att mäta rörelsemängden får man även reda på p_2 . Man kan dock aldrig få reda på både läget eller rörelsemängden för partikel 2. Så långt är allt i linje med Heisenbergs relation.

Men Einstein och hans medförfattare noterar nu att vilken mätning man väljer att utföra på partikel 1 knappast kan påverka de faktiska egenskaperna hos den avlägset belägna partikel 2. Eftersom man kan välja om man vill ha reda på x_2 eller p_2 (beroende på om man mäter x_1 eller p_1) måste partikel 2 vara beredd att uppfylla båda egenskapernas värden. Med andra ord, partikel 2 måste i själva verket ha både ett entydigt läge och en entydig rörelsemängd. Partikeln själv måste "känna till" värdet på dessa båda egenskaper, även om det kanske är omöjligt för oss att fastställa dem samtidigt.

Slutsatsen tycks oundviklig: Heisenbergs relation säger på sin höjd något om vad vi kan få reda på; den handlar inte om naturens *egentliga* beskaffenhet. Kvantfysiken utgör därmed, i bästa fall, en ofullständig beskrivning av verkligheten. Författarna medger att argumentet inte bevisar att någon mer fullständig beskrivning är möjlig, med de uttrycker sin fasta övertygelse om att så är fallet: Det borde gå att formulera en mer grundläggande teori, fri från kvantfysikens mystiska osäkerheter.



Man kan mäta antingen läget eller rörelsemängden för partikel 1. Mätningen avslöjar även motsvarande egenskap för partikel 2. Eftersom partikel 2:s verkliga tillstånd inte kan bero på valet av mätning på partikel 1, måste partikel 2 besitta välbestämda värden för båda egenskaperna, i strid med Heisenbergs relation.

Resonemanget vilar förstås på vissa antaganden.

Den mest uppenbara förutsättningen är vad man brukar kalla *lokalitet*: antagandet att det som sker på en plats i universum inte omedelbart kan påverka det som sker någon annanstans. Utan detta antagande faller argumentet. Då skulle man kunna hävda att partikel 2 faktiskt ändrar sina egenskaper i det ögonblick man utför mätningen på partikel 1: om man väljer att mäta x_1 påverkas inte bara p_1 utan också p_2 ; om man väljer att mäta p_1 påverkas inte bara x_1 utan också x_2 . Heisenbergs relation tillämpad på partikel 2 skulle därmed fortfarande kunna handla om denna partikels verkliga egenskaper, och inte enbart om vår möjlighet att nå kunskap om dessa.

Antagandet om lokalitet är inte bara intuitivt. Det har också kraftfullt stöd i den speciella relativitetsteorin, som utesluter påverkan mellan rumsligt avlägsna händelser.

Ett annat viktigt antagande i resonemanget är *realism*. Detta är, något förenklat, uppfattningen att fysikaliska storheter och deras värden existerar oberoende av våra mätningar. Bollen har en hastighet, partikeln en laddning och pinnen en längd även om ingen någonsin mäter upp värdet på dessa egenskaper.

Var någonstans i tankeexperimentet kommer antagandet om realism in? Jo, det är bara med ett realistiskt synsätt som man kan hävda att partikel 2 verkligen besitter båda egenskaperna – läge och rörelsemängd – på samma gång. I praktiken är det ju bara en av dessa som faktiskt fastställs.

Einstein, Podolsky och Rosen gör i sitt resonemang ytterligare några antaganden. Som att tillståndet hos partiklarna, innan man har mätt något, inte beror på vilken mätning man *kommer* att göra. Eller att den som gör mätningen faktiskt är fri att göra vilken mätning som helst, att detta val kan betraktas som oberoende av partiklarnas tillstånd.

Samtliga EPR:s antaganden är högst naturliga. De handlar bara om sådant som vi alla tar för givet.

Tankeexperimentet tvingar oss alltså till slutsatsen att en världsbild präglad av realism, lokalitet och kausalitet är oförenlig med att kvantfysiken skulle utgöra en fullständig teori. Kvantfysiken beskriver, under dessa antaganden, i bästa fall vår maximala kunskap om verkligheten, men inte verkligheten själv.

Bara några månader efter EPR:s angrepp på kvantfysiken publicerade Niels Bohr sitt svar. Han försvarar teorin och menar att den är det närmaste en fullständig verklighetsbeskrivning som vi någonsin kan komma. Han underkänner författarnas realistiska anspråk, som han anser ligga bortom vad man kan förvänta sig av en fysikalisk teori.

Detta skulle kunna ha varit sagans slut. Tankeexperimentet skulle ha kunnat sluta i en filosofisk återvändsgränd, en diskussion där ord stod mot ord. Å ena sidan övertygelsen att en acceptabel fysikalisk teori måste uppfylla kraven på lokalitet, realism och kausalitet. Å andra sidan Bohrs hållning

att dessa krav är för starka, att vi inte kan förvänta oss att i fysiken finna svar på frågor om hur världen egentligen är beskaffad.

Med tiden skulle dock EPR:s tankeexperiment ge upphov till ett helt forskningsfält – fast knappast med den inriktning och de följder som författarna själva hade önskat. Idag vet vi, tack vare *verkliga* experiment som bygger på deras resonemang, att minst ett av antagandena i det är felaktigt. Problemet ligger således inte i kvantfysiken. Det är verkligheten själv som inte lever upp till EPR:s krav.

Vår värld är antingen icke-lokal, icke-realistisk eller icke-kausal. Det är bara att välja.