

Einsteins paradoxala fotonvägning

En av de första och mest ihärdiga kritikerna av kvantfysiken var Albert Einstein. Under åren kring 1930 förde han livliga diskussioner med Niels Bohr och konstruerade flera tankeexperiment i försök att kullkasta teorin.

Åtminstone ett av dem orsakade Bohr ordentligt huvudbry, i alla fall om man får tro kollegan Léon Rosenfeld:

It was quite a shock for Bohr to be faced with this problem; he did not see the solution at once. During the whole evening he was extremely unhappy, going from one to the other and trying to persuade them that it couldn't be true, that it would be the end of physics if Einstein were right; but he couldn't produce any refutation... The next morning came Bohr's triumph and the salvation of physics...

Vad var det Einstein hade kommit på som oroade Bohr så?

Betrakta en låda upphängd i en fjäder. I lådans ena sida finns ett litet hål som, med hjälp av en inbyggd mekanism, kan öppnas under ett kort ögonblick. När så sker slipper en foton ut ur lådan. Einstein föreslår en metod att fastställa energin hos denna foton. När den far iväg minskar nämligen lådans energiinnehåll och därmed, enligt den speciella relativitetsteorin, även dess massa. Efter att fotonen lämnat lådan hänger den därför något högre än tidigare. Genom att mäta denna höjdförändring får man således reda på den energimängd som fotonen fört bort.

Även tidpunkten vid vilken fotonen slipper ut bör kunna fastställas exakt: öppningsmekanismen kan helt enkelt förprogrammeras att aktiveras vid en viss tidpunkt, och tidsintervallet under vilket hålet är öppet – slutartiden – kan göras godtyckligt kort. En alltför kort slutartid kan visserligen innebära att ingen foton hinner ut. Men enligt kvantfysiken är detta en fråga om sannolikhet. Om ingen foton lämnar lådan i första försöket kan vi alltid upprepa experimentet tills en foton gör det. Då vet vi flyktögonblicket för just den fotonen. Och dess energi kan som sagt bestämmas ur lådans höjdförändring.

Problemet är att detta strider mot en av kvantfysikens många osäkerhetsrelationer, nämligen den som handlar om tid och energi. Den föreskriver bland annat att energin hos en foton inte kan vara välbestämd på samma gång som den tid vid vilken fotonen passerar en viss punkt (i detta fall lådans öppning). Så Bohr var bekymrad. Mycket bekymrad.

Redan morgonen därpå hade han dock funnit en lösning.

Bohr tyckte sig se räddningen i en av Einsteins egna teorier, den allmänna relativitetsteorin, och gravitationens inverkan på tiden: en klocka på hög höjd tickar snabbare än en likadan klocka på låg höjd. I tankeexperimentet vägs lådan med hjälp av en fjädervåg: lådans massa fastställs genom att man läser av på vilken höjd den befinner sig. Men inuti lådan finns en klocka – den som bestämmer när fotonen ska släppas ut. Hur snabbt klockan tickar beror på lådans exakta höjd. Så en osäkerhet i lådans höjd innebär med nödvändighet även en osäkerhet i den tidpunkt då fotonen släpps ut. Einstein antog att höjdmätningen – som måste utföras både före och efter att fotonen lämnar lådan – kunde få ta obegränsad tid. Men Bohr noterar att ju längre tid denna mätning tar desto värre blir effekten av tidens höjdberoende – en osäkerhet i tickhastighet ackumuleras allteftersom tiden går.

Genom att uttrycka dessa insikter kvantitativt lyckas Bohr visa att tid-energirelationen är uppfylld även för Einsteins hypotetiska fotonvåg.¹

¹ En utförlig redogörelse av Bohrs lösning finns i kapitel 2 i boken "Quantum Paradoxes" av Aharonov och Rohrlich

Det är symptomatiskt för Bohr att han fokuserar på själva mätningen och dess utförande. Det finns en mer grundläggande invändning mot scenariot, en som är mer tillfredställande på åtminstone två sätt: dels genom att den tar fasta på systemet självt snarare än på mätningen, dels för att den undviker att dra in den allmänna relativitetsteorin i resonemanget.

Låt mig först påminna om en aspekt av osäkerheten i tid och energi. Ett system som har välbestämd energi är ett stationärt system, dvs. ett system i vilket ingenting händer (litet ΔE innebär stort ΔT , alltså lång "livstid"). Ett system som däremot förändras snabbt kan inte ha välbestämd energi (snabb förändring motsvarar litet ΔT vilket innebär stort ΔE).

Einstein antar att lådan som helhet har en väldefinierad energi både före och efter att fotonen lämnat den. Att lådans energi är väldefinierad innebär att öppningsmekanismens också är det. Men att denna mekanism har en bestämd energi innebär enligt osäkerhetsrelationen att den är oförmögen till snabba förändringar: den kan i så fall inte öppna och sluta hålet under hur kort tid som helst. Om lådans energi var helt entydig skulle den befinna sig i ett stationärt tillstånd: den skulle inte kunna undergå någon förändring alls, och öppningsmekanismen skulle aldrig utlösas.

Därmed undgår Einsteins fotonlåda att bryta mot Heisenbergs relation, och det alldeles oavsett vilka mätningar den utsätts för. Antingen kan vi konstruera lådan så att den släpper ut en foton vid ett mycket väldefinierat ögonblick. Men i så fall kommer den foton som skapas med nödvändighet att ha en obestämd energi – för lådans egen energi måste i detta fall vara obestämd. Eller så kan vi tillverka en låda som skapar en foton med mycket väldefinierad energi. Men slutarmekanismen hos en sådan låda kommer att behöva en viss tid på sig, och ögonblicket när fotonen faktiskt släpps ut kan inte vara välbestämt.

Einstein själv skrev aldrig ner den version av scenariot som han lär ha konfronterat Bohr med under en fysikkonferens år 1930. Deras diskussion nedtecknades först tjugo år senare av Bohr. Man har ifrågasatt om hans återgivning verkligen speglar Einsteins egentliga syften med resonemanget. Kanske var Bohr så entusiastisk över lösningen på den paradox han själv tyckte sig se i den hypotetiska fotonvägningen – en paradox som förmodligen orsakade honom en sömnlös natt – att hans minnesbild av Einsteins faktiska argumentation förvrängdes?

Faktum är att Einstein, bara något år senare, använder samma scenario för att dra andra slutsatser än de Bohr beskriver. Einstein verkar då ha accepterat att osäkerhetsrelationen för tid och energi faktiskt begränsar den information vi kan ha om ett system: vi kan aldrig få reda på både i vilket ögonblick som fotonen lämnar lådan och hur mycket energi den då för med sig. Om vi nöjer oss med att ta reda på *en* av foton-egenskaperna ska det dock inte vara några problem; kvantfysiken låter oss alltid bestämma en av två komplementära storheter exakt. I princip ska vi också kunna vänta med att bestämma vilken av fotonens egenskaper som vi vill mäta tills efter att den lämnat lådan.

Detta utnyttjar Einstein och argumenterar nu så här. Efter att fotonen farit iväg gör vi vårt val: antingen väger vi lådan och får reda på fotonens energi, eller så öppnar vi den och läser av klockan därinne för att få reda på den exakta tidpunkten för fotonens avfärd. Men när vi väl fattar beslutet om vad vi ska mäta kanske fotonen redan är miljontals mil bort, och dess tillstånd kan då knappast påverkas av vår mätning. Ändå säger kvantfysiken att fotonen, om vi väljer att väga lådan, måste ha en energi som exakt motsvarar lådans viktninskning. Kvantfysiken säger också att om det i stället är tidpunkten för fotonens avfärd som vi väljer att fastställa, så måste fotonen ha egenskaper som är förenliga med resultatet av *den* mätningen: fotonen måste då exempelvis nå fram till ett visst mål vid en bestämd tidpunkt. Om vi alltså antar att fotonens tillstånd inte påverkas av vår mätning långt

(där resonemanget för övrigt är betydligt klarare än hos Bohr själv).

bort, måste fotonen, redan när den lämnar lådan, vara beredd att uppfylla båda egenskaperna. Med andra ord: fotonen själv måste besitta båda egenskaperna energi och flykttid, i strid med Heisenbergs relation.

Slutsatsen synes vara att kvantfysikens osäkerheter bör förstås blott som begränsningar av våra möjligheter att ta reda på tillståndet hos partiklar – inte som uttalanden om deras inneboende egenskaper. Enligt Einstein handlar osäkerhetsrelationen om vår kunskap, inte om hur tillvaron egentligen är beskaffad. I den här tappningen är scenariot med fotonvägningen en föregångare till EPR-paradoxen (se Tankeexperimentet i Fysikaktuellt nr 2, 2011).

Det finns en tydlig utvecklingslinje i Einsteins livslånga kritik mot kvantfysiken. Till en början försökte han konstruera tankeexperiment i syfte att visa att kvantfysiken är *logiskt ohållbar*, att den måste leda till motsägelser om den kombineras med andra kända principer inom fysiken, som till exempel konserveringslagar. Men från omkring 1930 övergår hans argumentation mer och mer till att fokusera på kvantfysikens *fullständighet*. Einstein verkar då betrakta kvantfysiken som en väsentligen korrekt teori; han accepterar att osäkerhetsrelationerna faktiskt ger absoluta gränser på vad som är mätbart. Men han ser kvantfysikens verklighetsbeskrivning som blott preliminär: det måste finnas en underliggande verklighet beskriven av en mer fundamental teori. I denna mer grundläggande beskrivning menar Einstein att de komplementära storheterna faktiskt har bestämda värden. Och kvantfysikens inbyggda slumpmässighet betraktar han som resultatet av i grunden deterministiska, men ännu okända, lagar.

Einsteins ihärdiga kritik av kvantfysiken kom att spela en central roll, inte bara för utvecklingen av kvantfysiken själv, utan för fysikens världsbild i stort. Men inte på det sätt som han själv hade hoppats. Kvantfysiken står alltjämt stadigt; men den verklighetsuppfattning som var Einsteins utgångspunkt framstår inte längre som hållbar.