

# Bombproblemet

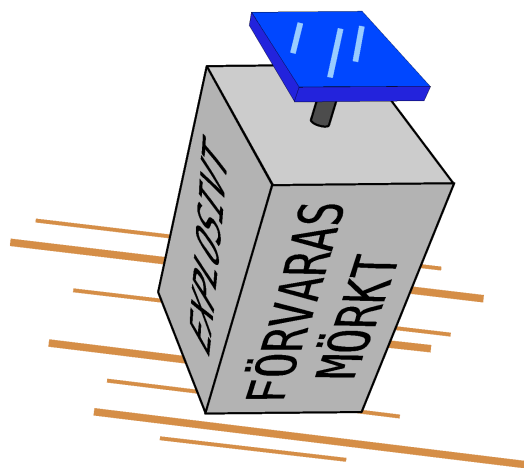
Att enstaka partiklar, som exempelvis fotoner, kan interferera med sig själva tillhör ett av kvantfysikens ofta omskrivna mysterier. Mindre välkänt är en lika häpnadsväckande som oundviklig följd av detta: den roll kontrafaktiska skeenden spelar i kvantfysiken. Ett tankeexperiment, konstruerat 1993 av Avshalom Elitzur och Lev Vaidman, belyser saken.

Begrunda följande problem.

*Du har en uppsättning bomber. Varje bomb är försedd med en ytterst känslig avtryckare i form av en liten spegel: det räcker med att en enda foton reflekteras i spegeln för att bomben ska utlösas. Bombernas bäst före-datum har dock passerat. Det innebär att den känsliga utlösningmekanismen kan ha rostet igen och fastnat. Bomber där detta har skett utlöses inte när deras spegel träffas av en foton.*

*Du behöver nu en bomb. Men hur ska du hitta en som du kan vara säker på fungerar? Ett sätt är förstås att pröva bomberna, en i taget, genom att skicka fotoner mot deras speglar. Förr eller senare kommer du att hitta en som fungerar. Men när så sker har du inte längre kvar bomben i outlöst skick. Att undersöka en bomb utan att råka belysa dess spegel är för riskabelt och dessutom känner du inte till den exakta konstruktionen.*

*Så hur gör du?*

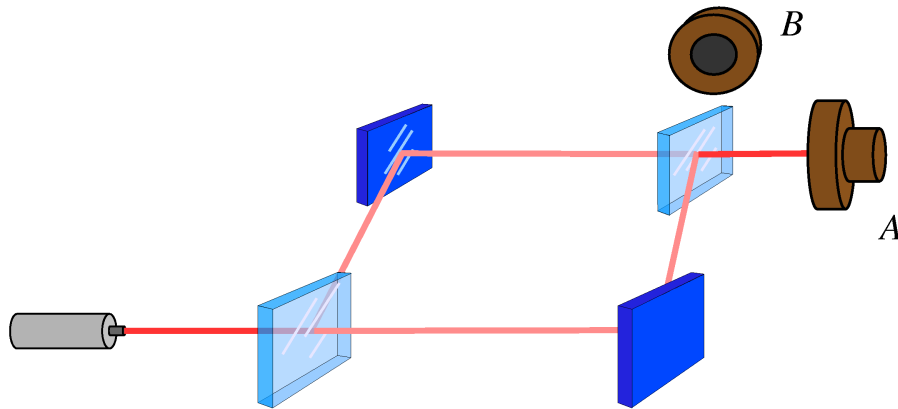


Problemet verkar sakna lösning. Om enda sättet att fastställa att en bomb verkligen fungerar är att låta en foton reflekteras i dess spegel så finns förstås ingen möjlighet att hitta en säkert fungerande bomb med mindre än att den exploderar. Eller?

Faktum är att kvantfysiken tillhandahåller en lösning. Vi ska strax se hur detta är möjligt, men låt oss börja med att betrakta ett klassiskt interferensexperiment (se figuren på nästa sida).

En ljusstråle faller in mot en halvgenomskinlig spegel, som delar upp strålen i två. De två strålarna reflekteras åter samman (med hjälp av två vanliga speglar) mot en andra halvgenomskinlig spegel. Bakom denna finns ett par ljusdetektorer, *A* och *B*. Man kunde tro att ljuset skulle fördela sig lika i detektorerna, men så är inte fallet – allt ljus kommer att hamna i detektor *A* (förutsatt att de två strålvägarna är exakt lika långa).

Fenomenet är ett exempel på interferens. För att förstå hur det uppstår måste man känna till att de två strålar som skapas i en halvgenomskinlig spegel – den transmitterade och den reflekterade strålen – är fasförskjuna i förhållande till varandra med en fjärdedels våglängd.



Betrakta nämligen de två tänkbara vägarna – den nedre respektive den övre i figuren – som ljuset skulle kunna ta för att nå detektor *B*. Ljus som tar den nedre vägen reflekteras inte i någon av de halvgenomskinliga speglarna, medan ljus som tar den övre vägen reflekteras i båda. Om varje reflektion i de halvgenomskinliga speglarna ger upphov till en förskjutning med en fjärdedels våglängd, innebär det att den sammanlagda förskjutningen mellan de två vägarna blir precis en halv våglängd. Men om en våg läggs ihop med en likadan våg som är förskjuten en halv våglängd, så släcker de två vågorna förstås ut varandra. Därför blir det mörkt i detektor *B*.

När det gäller de två vägarna som leder till detektor *A* är det annorlunda. Här reflekteras båda strålvägarna precis en gång i var sin halvgenomskinliga spegel. De två strålarna är således förskjutna exakt lika mycket när de passerat spegeln uppe till höger i figuren. Därmed kommer de att förstärka varandra; allt ljus från källan hamnar i detektor *A*.

Låt oss nu göra kvantfysik av detta. Vi tänker oss att strålkällans intensitet reduceras så till den grad att den bara sänder ut enstaka fotoner, säg, en i sekunden. Interferensen kommer trots det att kvarstå: varje foton kommer fortfarande att hamna i detektor *A*. Detta är ett i kvantfysiken typiskt exempel på när enstaka partiklar ger upphov till interferens. Fenomenet förutsätter naturligtvis att båda strålvägarna är öppna för passage – den kvantfysiska förklaringen är ju att varje enskild fotonens superposition faktiskt färdas båda vägarna. Om en av vägarna blockeras upphör således interferensen och fotonerna hamnar lika ofta i detektor *B* som i detektor *A*. Samma sak inträffar om man försöker fastställa vilken väg en viss foton färdas genom att placera in någon form av foton-detektor i en eller båda strålvägarna. Detta eftersom en sådan mätning oundvikligen leder till att fotonens superposition “kollapsar”.

Åter till problemet med bomberna: Hur kan man avgöra om en bomb fungerar utan att samtidigt utlösa den?

Vi föreställer oss att man placerar in den bomb man vill testa i en interferensuppställning som den ovan, närmare bestämt så att dess avtryckarspegel tar rollen som spegeln längst nere till höger i figuren. En foton sänds ut från källan. Vad blir nu experimentets utfall?

Det finns två möjligheter att beakta: antingen fungerar bomben, eller så gör den det inte. Antag först att bomben inte fungerar – att dess avtryckare har rostat igen och fastnat. Då fungerar uppenbarligen dess avtryckare som en helt vanlig spegel. Utfallet blir precis som tidigare: den utsända fotonen hamnar i detektor *A* på grund av interferensen mellan strålvägarna.

Men vad händer om bomben fungerar? En fungerande bomb exploderar så snart en foton reflekteras mot dess spegel. Den kan därmed betraktas som en perfekt foton-detektor: Att bomben sprängs innebär

således att fotonen valde den nedre vägen; att den inte sprängs innebär att fotonen tog den övre. Oavsett vad som sker har fotonens superposition förstörts, och någon interferens kan omöjligt uppstå.

En fungerande bomb kommer alltså att utlösas i hälften av fallen, nämligen i de där den utsända fotonen visar sig ta den nedre vägen. Då har vi den inte kvar, utan får pröva med en ny. Men i hälften av fallen förblir bomben outlöst. I dessa fall färdas fotonen den övre vägen och hamnar lika ofta i detektor *A* som i detektor *B*.

När vi testar en bomb genom att skicka in en foton i uppställningen finns således tre möjliga utfall:

- (1) Uppställningen exploderar. Om detta sker vet vi säkert att bomben fungerade, men dessvärre har vi den inte kvar.
- (2) Detektor *A* ger utslag. Detta utfall säger ingenting om huruvida bomben fungerar – fotonen kan ju hamna i detektor *A* oavsett om någon interferens har ägt rum.
- (3) Detektor *B* ger utslag. Detta kan bara ske om det *inte* äger rum någon interferens. Men att fotonen inte interfererar betyder att bomben fungerar, för en icke-fungerande bomb leder med nödvändighet till interferens.

Så om detektor *B* ger utslag vet vi med säkerhet att bomben fungerar, trots att den inte har utlösts!

Kvantfysiken medger alltså ett sätt att finna en bomb som man säkert vet fungerar utan att behöva utlösa den. Detta är kvantmagi. Förklaringen – i den mån det kan kallas så – ligger i att en fungerande bomb utgör en fotondetektor. Som sådan förstör den fotonens superposition – även i de fall bomben inte utlöses. Det faktum att fotonen *inte* får bomben att explodera bestämmer nämligen dess färdväg till den övre vägen. (Om det i dessa fall hade funnits en fungerande bomb också i den övre strålvägen så hade *den* garanterat utlösts.)

Metoden innebär uppenbarligen ett visst spill – en hel del av de fungerande bomberna kommer att explodera.<sup>1</sup> Men om man, som i exemplet, har en hel uppsättning potentiellt fungerande bomber att tillgå så gör det ju inte något.

Från den klassiska fysiken – liksom från våra vardagliga erfarenheter – är vi vana vid att om något inte sker, så är det oväsentligt huruvida det *hade kunnat* ske. Andra händelser utfaller på samma sätt ändå. Kontrafaktiska förhållanden spelar med andra ord inte någon roll i klassisk fysik. Men det gör de i kvantfysiken. Blotta möjligheten för bomben att explodera påverkar utfallet av experimentet.

Vad Elitzurs och Vaidmans tankeexperiment med bomberna visar är att även det som inte sker – men som hade kunnat ske – faktiskt spelar roll.

---

<sup>1</sup> Om man upprepar försöket med de bomber för vilka detektor *A* gett utslag (och som man därför inte fått reda på om de fungerar eller ej) kan man med denna metod sortera ut en tredjedel av alla fungerande bomber i outlöst skick. Man kan visa att man med hjälp av en mer komplicerad interferensuppställning (innefattandes oändligt många ideala speglar) faktiskt kan göra spillet godtyckligt litet.