

Komplementaritetsprincipen

19 okt. 2026, 4 min läsning

UTKAST

#fysik #kvantfysik #princip

Kurs: F0005T Förkunskaper: Fotonen, Diffraction

Ljusets vågnatur och partikelnatur utesluter inte varandra utan behövs båda för en fullständig bild. Samma diffractionsexperiment visar det: mönstrets form förklaras av vågnaturen, medan det faktum att en fotomultiplikator räknar diskreta energipaket förklaras av partikelnaturen. Mönstret byggs upp statistiskt av enskilda fotoner. En foton är inte ett objekt i en punkt, och fotoner med samma initiala rörelse följer inte alla samma väg — newtonsk mekanik kan inte ange dess framtida bana, bara sannolikheten att den träffar en viss punkt.

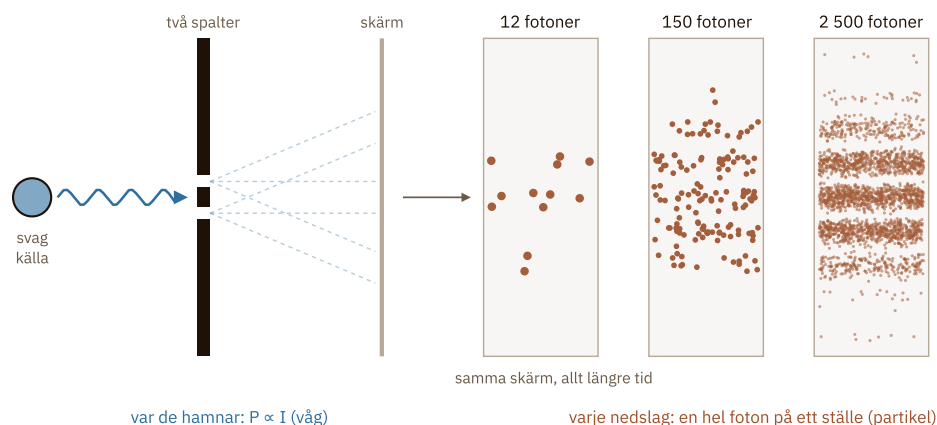
1. Principen

Niels Bohr formulerade **komplementaritetsprincipen** år 1928: våg- och partikelbeskrivningen kompletterar varandra. Båda behövs för en fullständig bild av ljuset, men för att beskriva en och samma del av ett experiment används bara den ena. Vilken som gäller avgörs av vad vi frågar efter.

Fenomen	Beskrivningen som förklarar det
Interferens och diffraction , mönstrets form på skärmen	Våg
Att detektorn registrerar enskilda nedslag med energin hf	Partikel
Fotoelektriska effekten , Comptonspridning, Parproduktion	Partikel

2. Mönstret byggs upp av enskilda fotoner

Gör vi ljuset i ett **dubbelspaltexperiment** så svagt att fotonerna kommer en och en, ger varje foton ett enda nedslag på en slumpmässig plats. De första nedslagen ser helt oordnade ut. Efter tusentals fotoner framträder ändå samma interferensmönster som vågteorin förutsäger.



Dubbelspalt med så svagt ljus att fotonerna kommer en och en. Varje foton ger ett enda nedslag på ett slumpmässigt ställe, men efter tusentals nedslag framträder vågteorins interferensmönster.

Tolkningen är statistisk. Vågteorins intensitet $I(y)$ anger inte hur stor del av en foton som hamnar vid y , utan hur **sannolikt** det är att en hel foton hamnar där:

$$P(y) dy \propto I(y) dy$$

Mönstret uppstår även när det i genomsnitt bara finns en foton åt gången i apparaten (se exemplet). Det är alltså inte olika fotoner som interfererar med varandra; det är varje fotonens våg som passerar båda spalterna.

3. Vilken väg tog fotonen?

Frågan “genom vilken spalt gick fotonen?” är ställd i partikelspråk, men det är vågnaturen som bestämmer var fotonerna hamnar. Försöker vi ta reda på vägen, till exempel genom att låta en partikel vid ena spalten rekylera när fotonen passerar, ändrar själva växelverkan fotonens rörelsemängd så mycket att interferensmönstret försvinner. Vi kan få väginformation eller interferens, men aldrig båda i samma experiment. Samma gräns uttrycks kvantitativt i **Heisenbergs osäkerhetsprincip**.

Principen gäller inte bara ljus. Elektroner som skickas en i taget genom en dubbelspalt bygger upp samma slags mönster (se **Elektrondiffraktion** och **De Broglie-våglängd**).

⚠ Vanliga fel

- **“Ljuset är ibland våg och ibland partikel.”** Ljuset är detsamma hela tiden. Det är *beskrivningen* som väljs efter vilken fråga som ställs.
- **Mönstret förklaras med att fotoner interfererar med varandra.** Mönstret uppstår även när fotonerna kommer en och en.
- **Intensiteten tolkas som en del av en foton.** En foton registreras alltid hel och på ett ställe. Intensiteten anger en sannolikhet.
- **Banan förutsägs.** Två fotoner med samma begynnelsestillstånd kan hamna på olika ställen. Bara fördelningen går att förutsäga.

4. Lösta exempel

☰ Exempel – En foton i taget

En dubbelspalt belyses med ljus med våglängden 550 nm och effekten $1,0 \cdot 10^{-13}$ W. Avståndet från ljuskällan till skärmen är 1,20 m. Hur många fotoner passerar per sekund, hur långt är det i genomsnitt mellan två på varandra följande fotoner, och hur många fotoner finns i genomsnitt i apparaten samtidigt? Vad säger resultatet om hur interferensmönstret uppstår?

✎ Lösning

Fotonenergin.

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 2,998 \cdot 10^8}{550 \cdot 10^{-9}} = 3,61 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Fysika: $Fd3$ (fotonenergi), Te (h , c)

Antal fotoner per sekund. Som i **Fotonen**:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{P}{E} = \frac{1,0 \cdot 10^{-13}}{3,61 \cdot 10^{-19}} = \boxed{2,77 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}}$$

Avståndet mellan fotonerna. På tiden $1/(dN/dt)$ mellan två fotoner hinner den första färdas

$$d = \frac{c}{dN/dt} = \frac{2,998 \cdot 10^8}{2,77 \cdot 10^5} \approx \boxed{1,08 \text{ km}}$$

Antal fotoner i apparaten.

$$\bar{N} = \frac{1,20}{1,08 \cdot 10^3} \approx \boxed{1,11 \cdot 10^{-3}}$$

Tolkning. I genomsnitt finns det nästan aldrig mer än en foton i apparaten. Ändå byggs interferensmönstret upp efter tillräckligt lång tid. Mönstret kan alltså inte komma från att fotoner växelverkar med varandra, utan varje foton landar enligt sannolikhetsfördelningen $P(y) \propto I(y)$ från vågbeskrivningen.

Ej kontrollerat mot facit – två oberoende lösningar stämmer överens.

Läsning

- 38.4 Wave–Particle Duality, Probability, and Uncertainty