

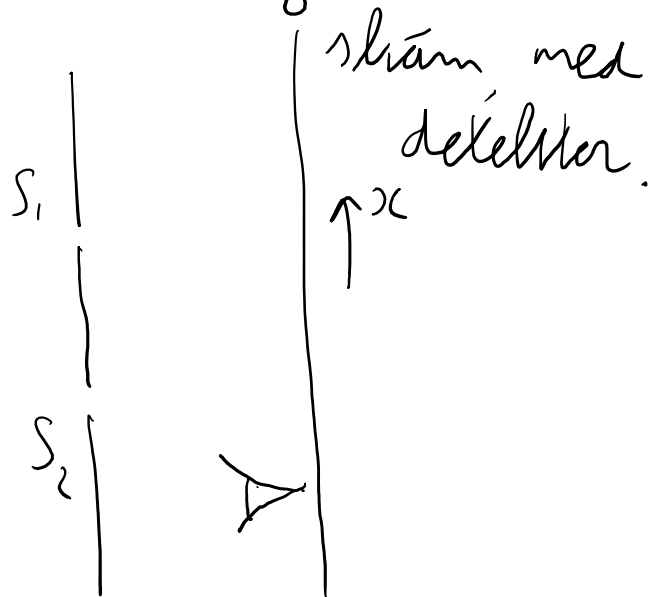
F-02

Dubbel spaltt experiment

Det visar kvant fysikens konstigheter på ett enkelt sätt. Viktigt att förstå det!

Översikt:

S_1, S_2 : spaltar



Vi betraktar olika källor:

- kuler (kl. partikel)
- vatten vågor
- elektroner (kv. partikel)

Vågor eller partiklar går via spaltarna till skärmen, där de detekteras.

Vi kan stänga S_1, S_2 beroende från varandra.

Exp. med kuler:

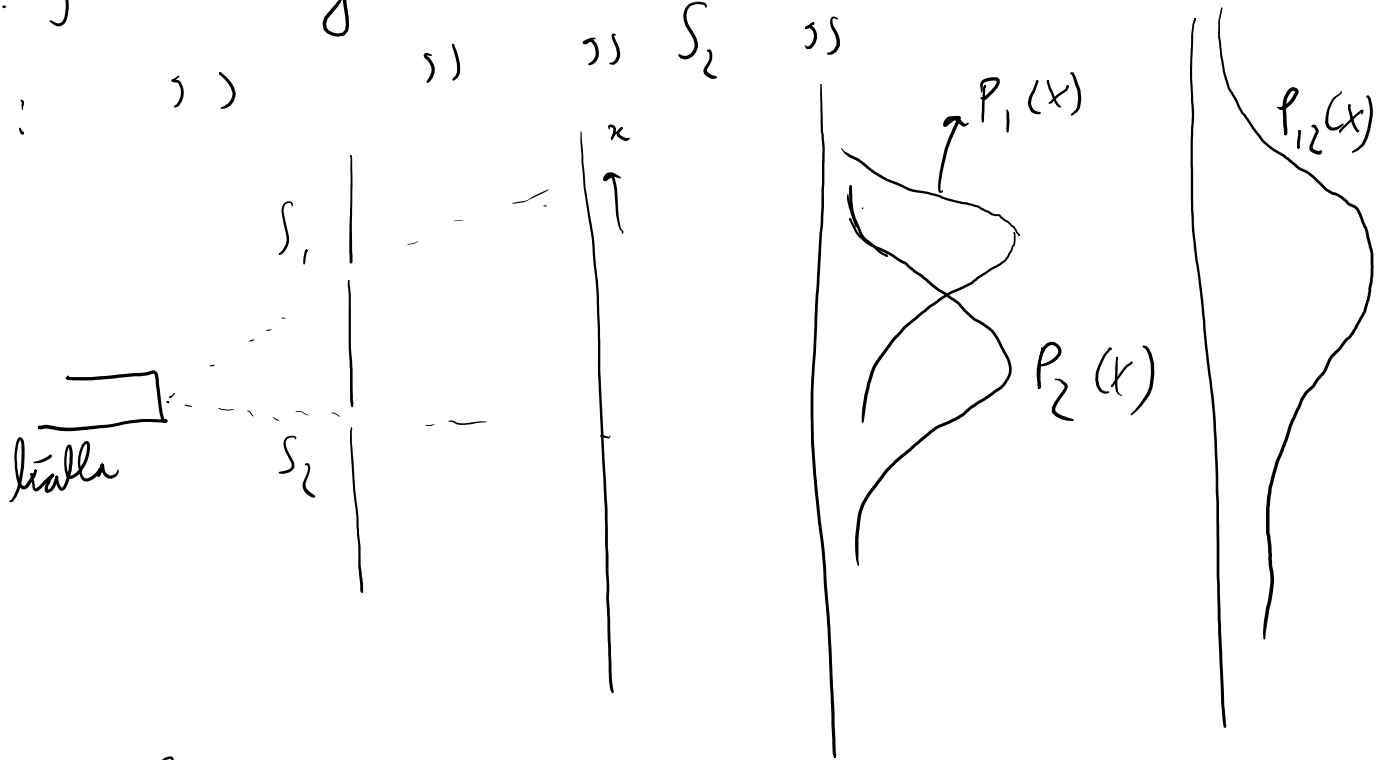
Källan skickar ut kuler, men med variation i riktningen. Vi antar att kulorna inte går

i riktningen. ...
 Sönder, och delatkom delatkom bara hela kulan.
 Vid varje läge x : räknar hur många kulan
 hamnar där under en viss tid.

Vi får sannolikheten att en kula hamnar
 vid läge x . Vi tittar på sannolikhetsfördelning_{er}.

P_1 : fördelning med bara S_1 öppet

P_2 :)))))) S_2))



S_1 och S_2 öppet: vid varje x finns det
 en chans att en kula hamnar där via
 S_1 eller S_2 : man måste addera

sannolikheterna: $P_{12} = P_1 + P_2$

Sammanfattning . 12 - 11 - 2

* kullor går inte sönder, hela kullor
delektteras

* $P_{12} = P_1 + P_2$: ingen interferens.

Exp. med vatten vågor:

Källan skickar ut vågor med konstant
amplitud och frekvens. Vid skärmen absorberas
vågorna, och intensitet, dvs (amplitud)² ell. energi
observeras.

Vi beskriver vågorna som komplexa vågor;
räkningen blir enkla, och vi tar real delen
i slutet (komplexa vågor behövs senare i alla fall).

Energi är positiv, och man ta godtyckliga
värden (inte kvadrerat!)





Bara S_1 öppet: ^{skärm}
 Intensitet $I_1 = |h_1|^2$, med $h_1 = A_1(x) e^{i\omega t}$
 komplex amplitud; $A_1(x)$ beror på x , och
 amplituden hos källan \rightarrow reell

$I_1 = A_1^2(x)$: ser ut som P_1 för kulor.

Samma sak om bara S_2 är öppet:

$$I_2 = |h_2|^2 = A_2^2(x)$$

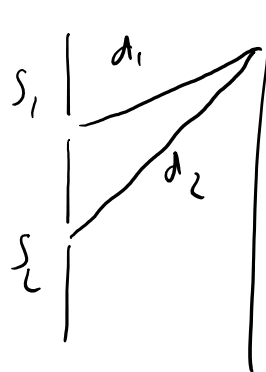
S_1 och S_2 öppna: vågorna från S_1 och S_2
 kan försärkas eller stärkas ut varandra!

Vi får interferens!

Superpositionsprincipen: man adderar
 amplituder, och då sedan beräknar man
 intensiteten: $h_{12} = h_1 + h_2$

$$I_{12} = |h_{12}|^2 = |h_1 + h_2|^2 \neq |h_1|^2 + |h_2|^2 = I_1 + I_2$$

... i d. \rightarrow Maximum i I_{12} : vågor i fas



Maximum i I_{12} : vågor i fas

$$d_2 - d_1 = n \lambda$$

hel tal \swarrow våglängd

Minimum i I_{12} : vågorna ur fas

$$d_2 - d_1 = \left(n + \frac{1}{2}\right) \lambda$$

hel tal

Beräkning av I_{12} : $h_1 = A_1 e^{i\varphi}$; $h_2 = A_2 e^{i\varphi_2}$

$$I_{12} = |h_{12}|^2 = |h_1 + h_2|^2 = |A_1 e^{i\varphi_1} + A_2 e^{i\varphi_2}|^2$$

$$= (A_1 e^{i\varphi_1} + A_2 e^{i\varphi_2})(A_1 e^{-i\varphi_1} + A_2 e^{-i\varphi_2})$$

$$= A_1^2 + A_1 A_2 e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)} + A_1 A_2 e^{-i(\varphi_1 - \varphi_2)} + A_2^2$$

$$= A_1^2 + A_2^2 + A_1 A_2 (e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)} + e^{-i(\varphi_1 - \varphi_2)})$$

$$= A_1^2 + A_2^2 + 2 A_1 A_2 \cos \delta, \text{ med } \delta = \varphi_1 - \varphi_2$$

Fas skillnad.

$I_1 = A_1^2$; $I_2 = A_2^2$, så $I_1 I_2 = A_1^2 A_2^2$, eller

$$A_1 A_2 = \sqrt{I_1 I_2}, \text{ så: } I_{12} = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$$

interferens
term!

Om $\delta = 0$: $I_{12} = I_1 + I_2$

Om $\delta = \pi$ och $A_1 = A_2$: $I_{12} = A_1^2 + A_1^2 - 2 A_1^2 = 0$

$$\text{Om } \delta = \pi, \text{ och } A_1 = A_2 : I_{12} = A_1^2 + A_1^2 - 2A_1^2 = 0$$

Experiment med elektroner.

Beskrivning av resultatet.

Källan skickar ut en elektron åt gången, vi har aldrig mer än en elektron mellan källan och detektor.

Detektor: geiger mätare, ger en 'klikk' när en e^- detekteras.

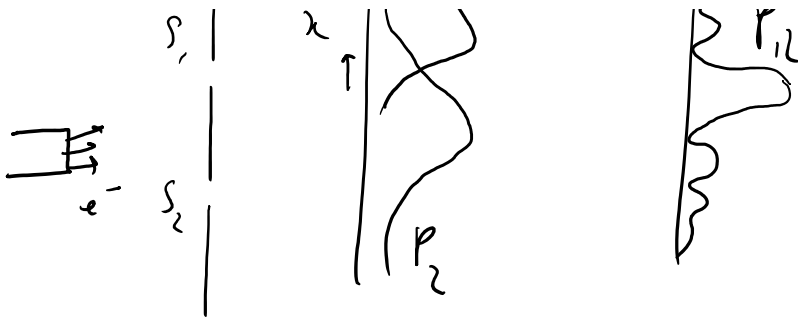
Under experimentet hör vi en klikk då och då, alla är lika dansa: inga 'halva' elektroner detekteras!

* Elektroner hamnar i detektor som hela 'klumpar', precis som i exp. med kornen!

Om vi har fler detektorer: bara en som ger en klikk: elektroner delar inte upp sig!

Sannolikhets Fördelningar:





P_1 : bara S_1 öppet

$P_{1,2}$: S_1 & S_2 öppna

P_2 : bara S_2 öppet

P_1 & P_2 : ser ut som exp. med kulorna.

Vad blir $P_{1,2}$? Man kan förvänta sig $P_1 + P_2$,
men istället får man interferens!


Så, även om det finns bara en e^- i systemet
åt gånger, får vi interferens!

Det kan inte vara så att två e^- passerar S_1 och
 S_2 och stör varandra!

Men elektronerna delar inte upp sig heller, dem
detekteras som hela partiklar!

Kan man förklara detta konstiga beteendet på
ett klassiskt sätt?

Kanske tar elektronerna konstiga banor, och
idén om S_1 och S_2 ?

ansvar
åker genom S_1 och S_2 ?

Men: det finns x så att $P_{12}(x)$ är mindre än $P(x)$ med bara S_1 öppet. Så, när S_2 öppnas minskar sannolikheten att en elektron hamnar där. På andra ställen är det tvärtom.

Experimentet kan inte förklaras med klassiska band!

För elektroner: e^- träffar skärmen som hela partiklar!

* vi har inte färens!

Fråga: kan vi få fram vilken spalt en viss e^- tog?

Sätter en lampa bakom spaltarna, som skiner ljus på elektronerna när de passerar, så att vi kan 'se' vilken spalt de tog.

Nu ser vi en 'blink' varje gång vi tror en 'klick', och 'blinken' är vid en viss spalt.

Så nu vet vi vilken spalt varje e^- tog.

Vivet P_1 och P_2 , så får att få P'_{12} för

Vivet P_1 och P_2 , så för att jä P_{12} jä
detta experiment: $P_{12} = P_1 + P_2$

Nu måste vi addera sannolikheterna, och kan
inte ha interferens.

Detta är precis vad som händer! Med
lampen försvinner interferensen!

P.g.a. att vi tittar vilken spalt e^- tar, förstör
vi interferensen.

Kan vi veta vilken spalt en e^- tar, och
ända ha interferens?

Vi kan använda ljus med längre våglängd.

Men ljus är fotoner, alla har samma $p = h/\lambda$
(eller energi). Nu hör vi ibland en 'bllick',
utan att vi har en 'blisik', och blisiken som
vi ser är likadana.

För visa e^- vet vi vilken spalt de tog, för de
andra inte. Med e^- från första gruppen: ingen
interferens, med e^- från andra gruppen: har

interferens, med e^- från andra gruppen: har interferens!

Annan försök: ta ljus med längre energi, eller längre våglängd. Om λ är stor nog,

kommer interferensen tillbaka. Men, då vet vi inte längre vilken spalt e^- tog:

ljus med större λ har längre upplösningsförmåga!

Så: vi kan inte göra ett experiment, som visar interferens, och där vi samtidigt vet vilken spalt varje e^- tog.

Om vi 'tittar' vilken spalt e^- tar, då har vi ingen interferens. Om vi inte tittar har vi interferens, men då vet vi inte vilken spalt e^- tog.

Detta kallas för Heisenbergs obestämbarhetsrelation (i detta samband),
... .. behövs för

helt varann ...
Mycket viktigt princip, som behövs för
kvantmekanikens konsistens!