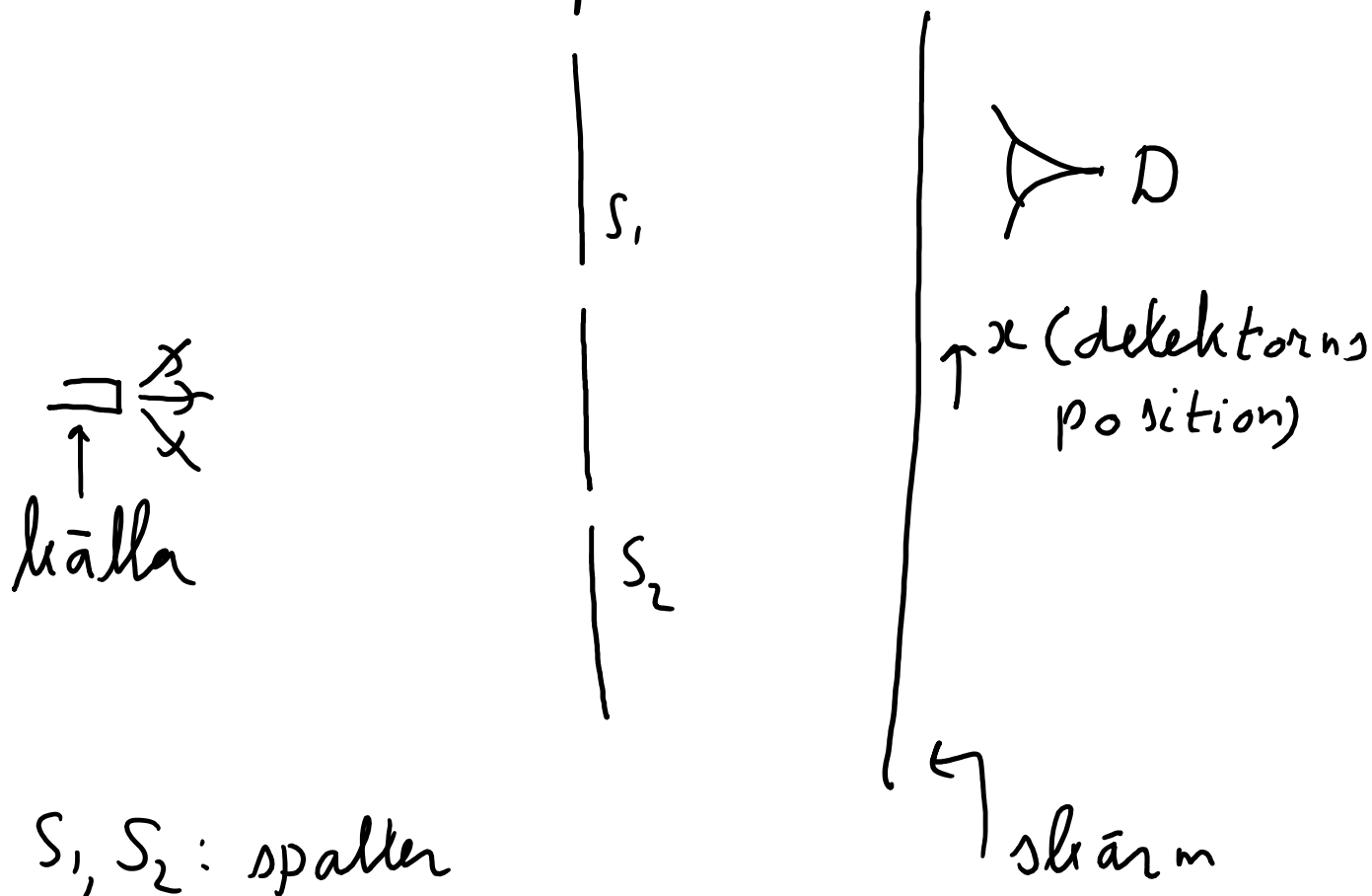


Dubbel spalts experimentet.

Det visar kvantfysikens konstigheter på ett enkelt sätt. Mycket viktigt att förstå det!

Översikt av experimentet:



S_1, S_2 : spalter

Vi betraktar olika källor:

- * kulor (klassiska partiklar)
- * vatten vågor
- * elektron

* vatten vågor
* elektroner (kvantpartiklar)

Vågorna ell. partiklarna åker genom spalterna till skärmen, där de detekteras. Vi kan stänga S_1 och S_2 oberoende av varandra.

Exp. med kulor.

Källan skickar ut kulor, med variation i riktningen.

Vi antar att kulorna inte går sönder, och att detektorn bara detektera hela kulor.

Vid varje läge x räknar vi hur många kulor kommer fram under en viss tid.

Så får vi sannolikheten att en kula

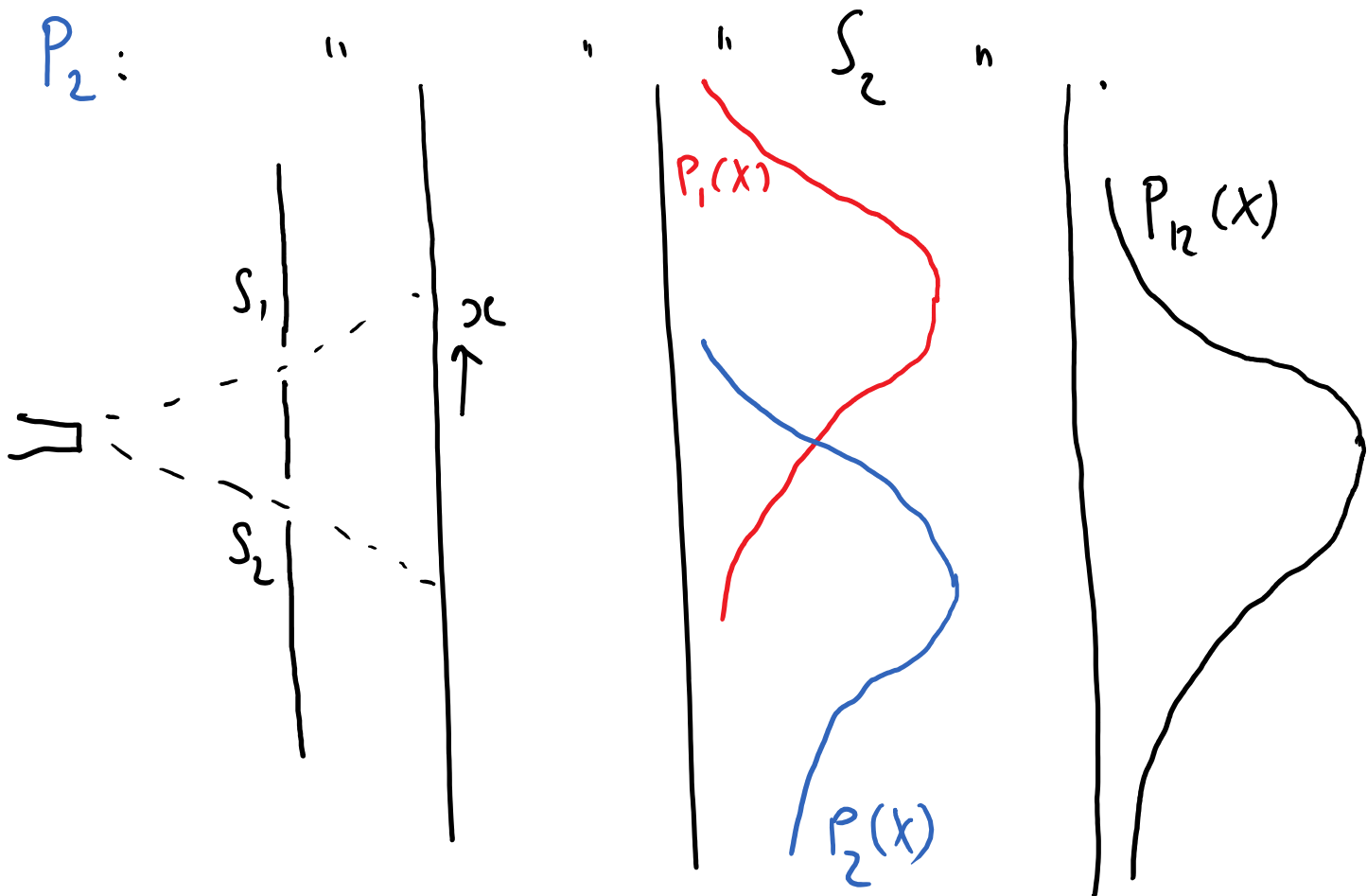
Vissa tld.

Så får vi sannolikheten att en kula

hamnar vid läge x . Vi tittar på sannolikhetsfördelningen

P_1 : fördelning med bara S_1 öppet.

P_2 :



S_1 och S_2 öppna: vid varje x finns det en chans att en kula hamnar där via S_1 eller S_2 : vi måste addera sannolikheterna

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

* Kulor går inte sönder; hela kulan

* Kulor går inte sönder; hela kulor detekteras.

* $P_{12} = P_1 + P_2$: inga interferens!

Exp. med vatten vågor:

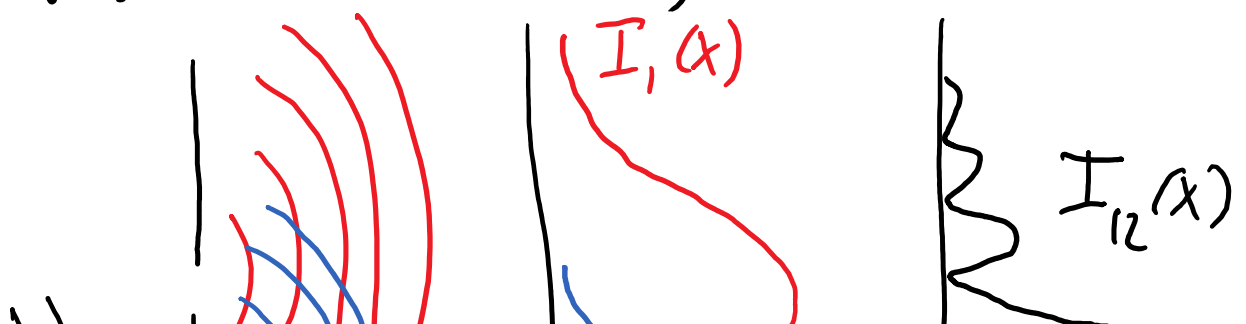
Källan genererar vågor med konstant amplitud och frekvens. Vid skärmen absorberas vågorna. Deras intensitet, dvs. (amplitud)², eller energi, observeras.

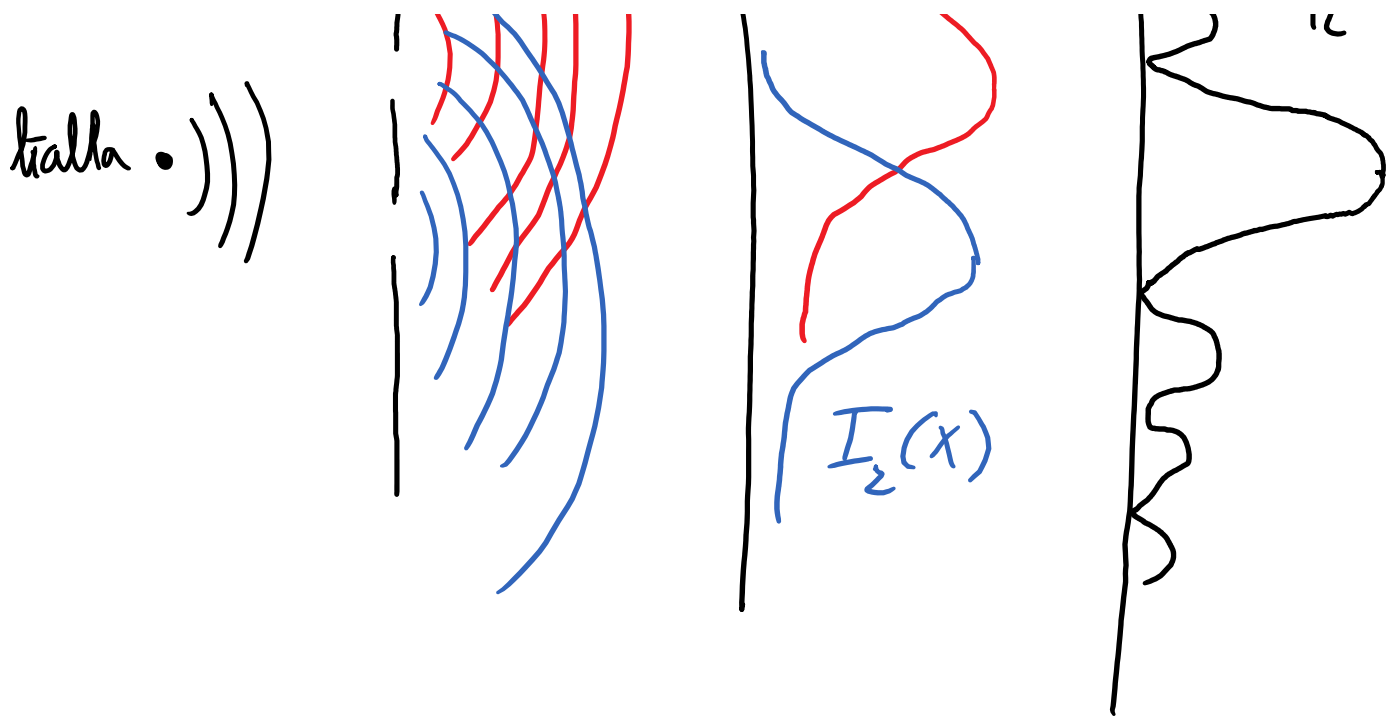
Vi beskriver vågor med komplexa tal

(komplex våg), och tar reella delen i slutet (senare behövs komplexa vågor i alla fall).

Vi för att energin är positiv, och

man tar godtyckliga värden (inte kvantiserat som kulorna).





Bara S_1 öppet:

Intensitet $I_1 = |h_1(x)|^2$, med

$h_1 = A_1(x)e^{i\omega t}$: komplex amplitud

$A_1(x)$ beror på x , och amplituden hos källan.

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

Samma sak om bara S_2 är öppet:

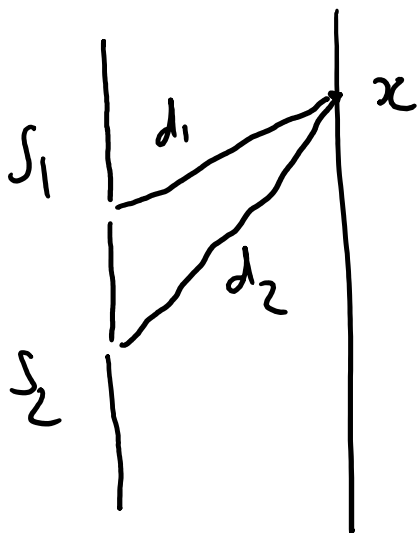
$I_2 = |h_2|^2 = A_2^2(x)$ (med $h_2 = A_2 e^{i\omega t}$)

S_1 och S_2 öppna: vågorna från S_1 och S_2 kan förstärka eller släcka ut varandra! Vi får interferens!

Vi måste tillämpa superpositionsprincipen:
addera amplituderna, och sedan räkna ut intensiteten.

Så: $h_{12} = h_1 + h_2$.

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



Maximum i I_{12} :
vågorna i fas

$$d_2 - d_1 = n \lambda$$

↑
heltal

← våglängd

Minimum i I_{12} : vågorna ur fas:

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

.. . . .

Hur ser vi ut I_{12} ?

$$h_1 = A_1 e^{i\varphi_1}; \quad h_2 = A_2 e^{i\varphi_2}$$

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

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

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

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

$$= A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\delta), \quad \text{med } \delta = \varphi_1 - \varphi_2 \\ \text{fas skillnad}$$

$$I_1 = A_1^2; \quad I_2 = A_2^2, \quad \text{så } I_1 I_2 = A_1^2 A_2^2,$$

$$\text{detta ger: } A_1 A_2 = \sqrt{I_1 I_2}$$

$$\text{Vi kan skriva: } I_{12} = I_1 + I_2 + \underbrace{2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta}_{\text{interferens term.}}$$

$$\text{Om } \delta = 0: \quad I_{12} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$$

$$\text{Om } \delta = \frac{\pi}{2}: I_{12} = I_1 + I_2 + 0$$

Om $\delta = \pi$, och $A_1 = A_2$ ($I_1 = I_2$):

$$I_{12} = I_1 + I_1 - 2\sqrt{I_1 I_1} = 2I_1 - 2I_1 = 0$$

Vi har interferens!

—

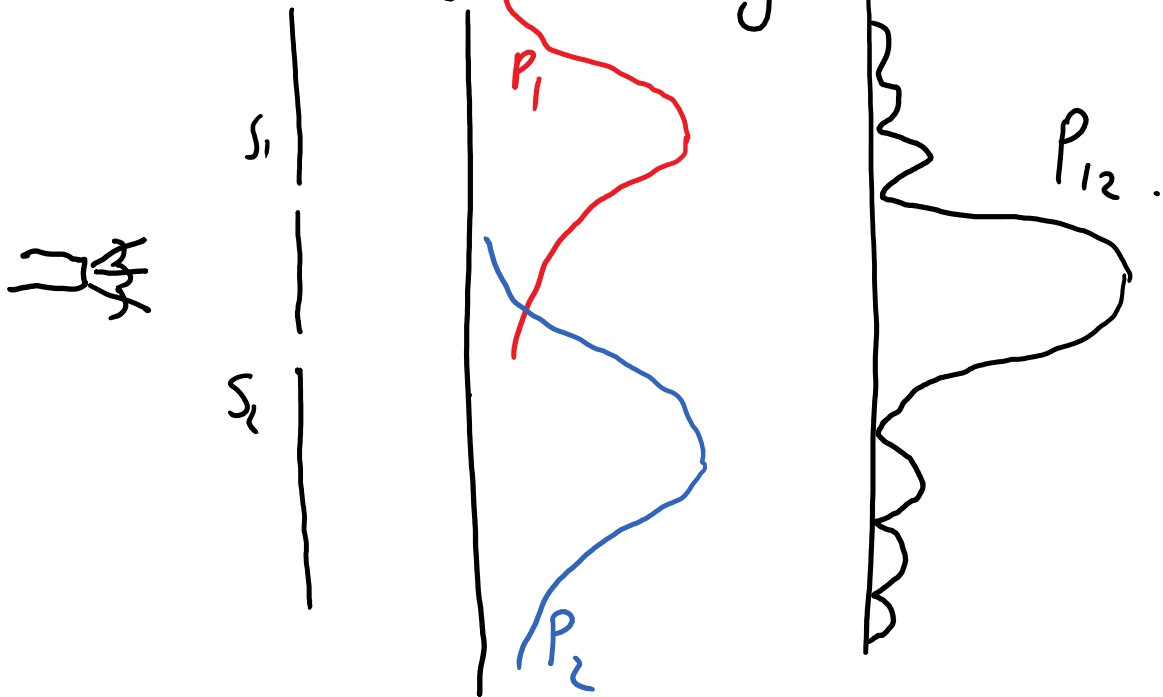
Experimentet med elektroner.

Beskrivning av resultatet.

- Källan skickar ut en elektron åt gången. Vi har aldrig mer än en elektron mellan källan och detektorn.
- Detektorn: geiger mätare, ger en 'klick' när en e^- detekteras.
- Under experimentet hör vi en 'klick' då och då; alla 'klicks' är likadana: inga 'halva klicks', så e^- hamnar i detektorn i hela klumpar, som i exp. med kuler.

- Om vi har fler detektorer: bara en som ger en klick: elektronerna delar inte upp sig!

Sannolikhets för delning som man väntar:



P_1 : bara S_1 öppet P_{12} : S_1 och S_2 öppna .

P_2 : bara S_2 öppet

P_1 och P_2 ser ut som i esq. med kuler na.

Vad blir P_{12} ? Man skulle förvänta

$P_1 + P_2$, men istället får vi interferens!

Detta händer, även om bara en

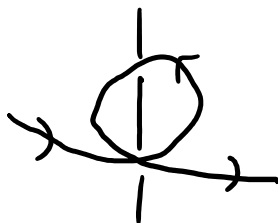
elektron är i systemet, aldrig två samtidigt!

Så, det kan inte vara så att två e^- passerar S_1 och S_2 , och stör varandra.

Och e^- delar inte upp sig, de detekteras som hela partiklar!

Kan man hitta en förklaring med klassisk fysik?

Kanske tar de konstiga banor, genom S_1 och S_2 :



Men: det positioner där $P_{12}(x) < P_1(x)$, så när man öppnar S_2 , då blir sannolikhet att detektera en e^- mindre.

På andra ställen är det tvärtom.

Det går inte att förklara experimentet med konstiga banor.

Exp. med elektroner: e^- träffar skärmen ||

Exp. med elektroner: e^- träffar skärmen
som hela partiklar.
• vi har interferens.

Fråga: Kan vi veta vilken spalt en viss e^- tog?

Vi ha en lampor bakom spalterna, som skiner ljus på e^- när de passerar. Då ser vi en 'blink' vid en spalt, och vet vilken spalt elektronen tog.

Nu ser vi en 'blink' varje gång en elektron detekteras. Så vi vet vilken spalt den tog.

Vi vet P_1 , och P_2 . Eftersom vi vet vilken spalt e^- tar, måste vi addera sannolikheterna:
 $P_{12} = P_1 + P_2$, så vi kan inte ha interferens!

Detta är precis vad som händer: med lampan på har vi ingen interferens!

Interferensen förstörs, p.g.a. att vi tittar vilken spalt e^- tar!!

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

Kan vi ha interferens och veta vilken spalt en \bar{e} tar?

Låt oss försöka ljus med lägre intensitet. Men: ljus är fotoner, alla har samma $p = h/\lambda$, så samma energi.

Så, ibland hör vi en 'klid' utan att se en blixst (som är alla likadana).

För vissa \bar{e} vet vi vilken spalt de tog. Med de får vi ingen interferens, För de andra \bar{e} vet vi inte vilken spalt de tog. Med de får vi interferens!

Annat försök: Ta ljus med lägre energi (eller längre våglängd).

Om λ är tillräcklig stort, kommer interferensen tillbaka!

Men: då vet vi inte längre vilken spalt elektronerna tar: ljus med längre våglängd har mindre upplösning^s-förmåga!

Så: vi kan inte göra ett experiment
som visar interferens, och där vi
samtidigt vet vilken spalt elektronerna
tar! (Om vi 'tittar', försvinner
interferensen.)

Detta kallas för Heisenbergs
'obestämbarshets' relation (i detta
samband)

Det är en viktig princip, som
behövs för att kvantfysik ska
vara konsistent.