



Sammanflätade öden

Nobelpriset i fysik 2022

Oscar Henriksson

Fysikersamfundets och kemistsamfundets julfest 15.12.2022

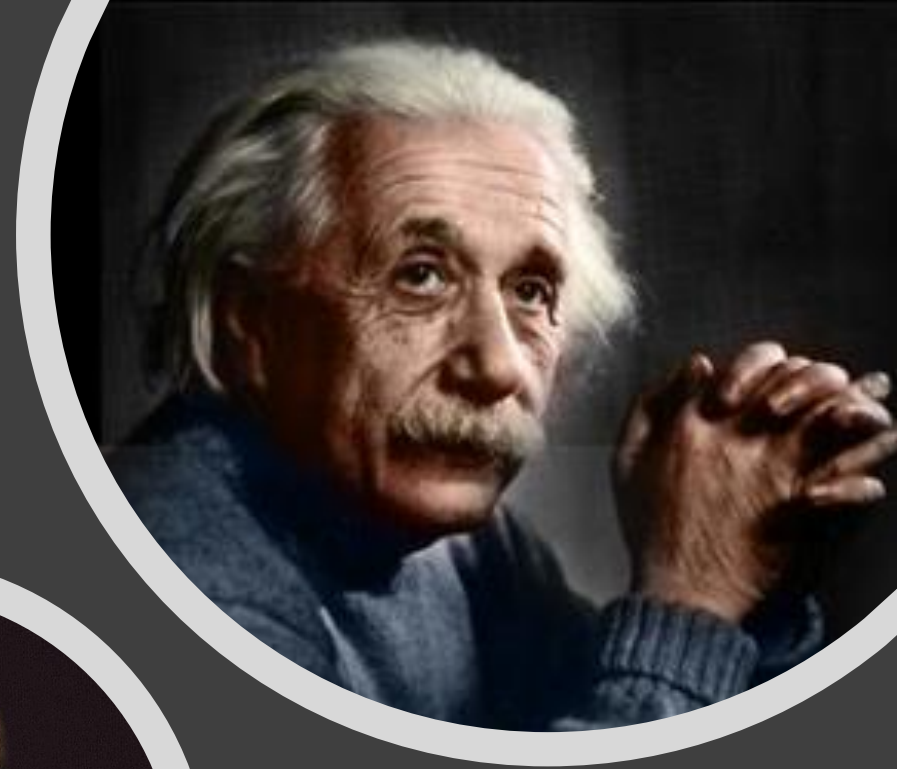


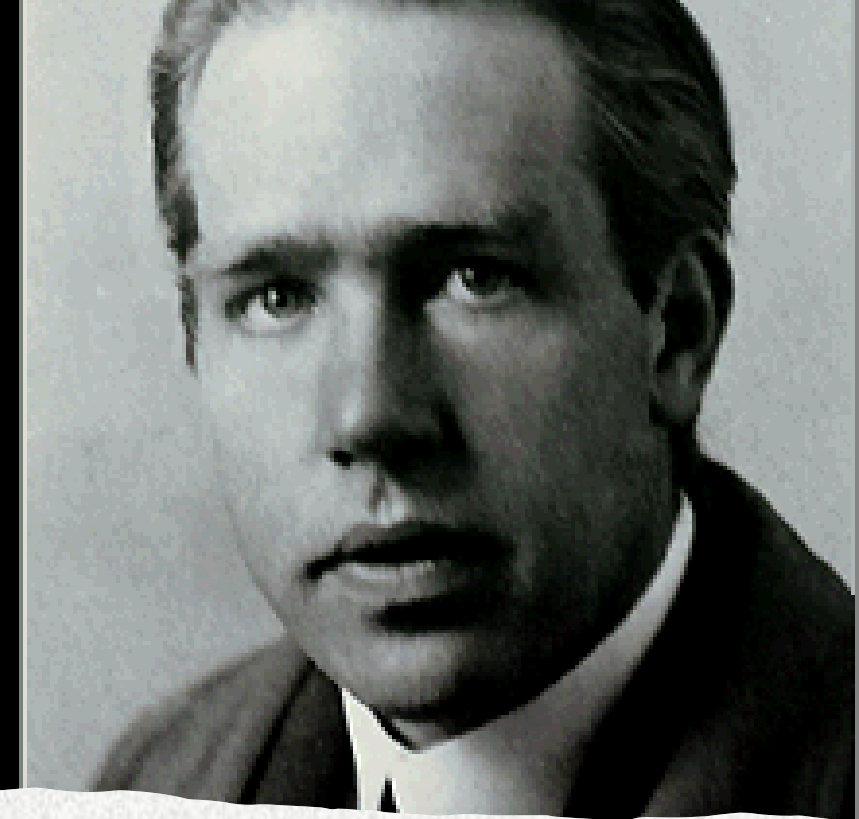
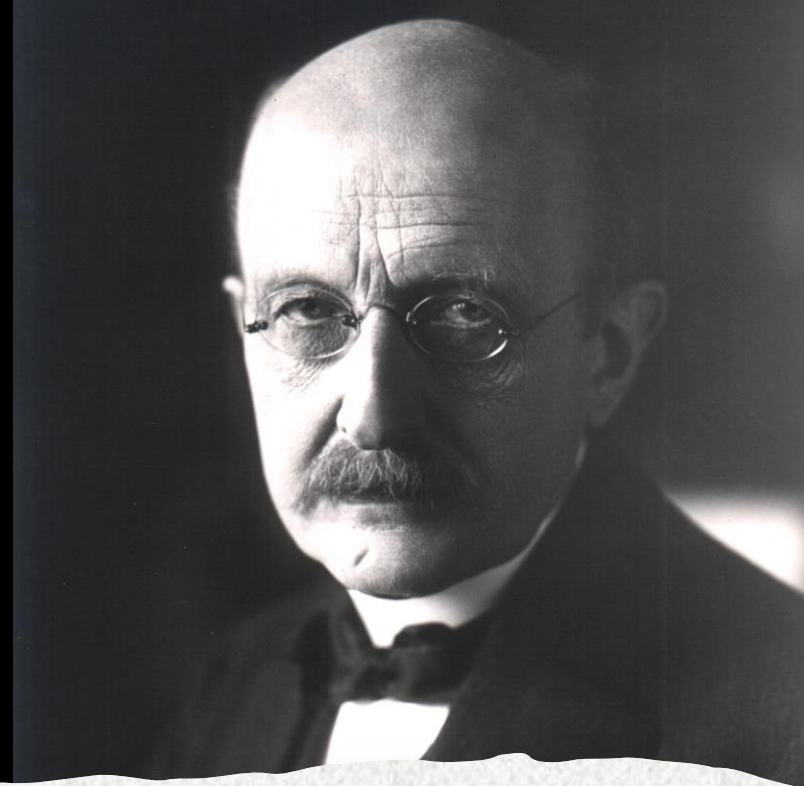
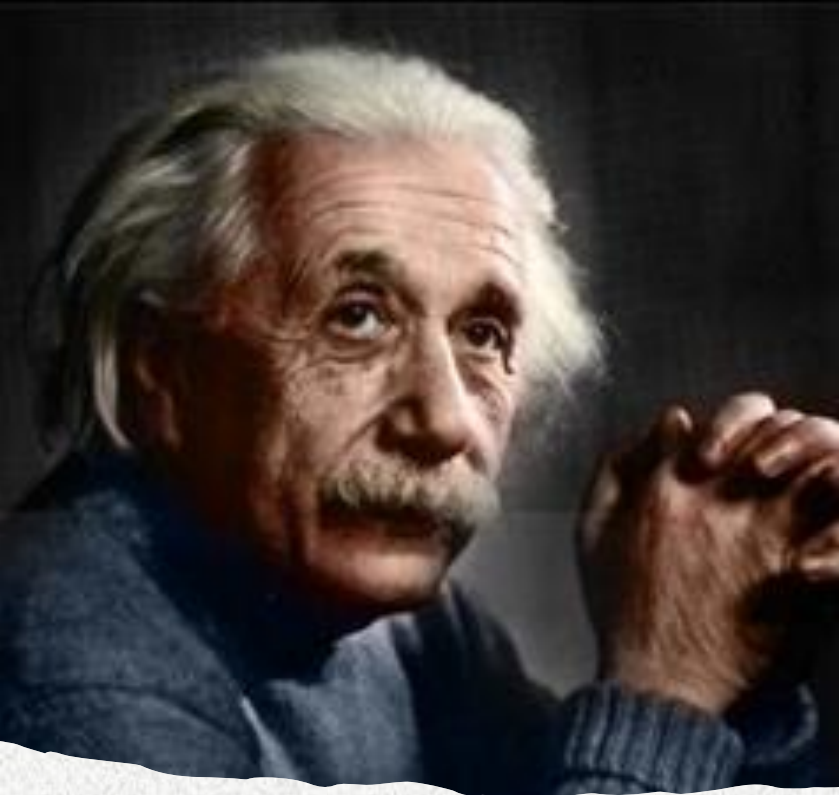
Den klassiska världen...

Den klassiska fysiken

Vissa – **naturliga!** – antaganden om världen...

- **Lokalitet** – orsak/verkan måste förmedlas av någon slags signal (Einstein: med fart $\leq c$)
- **Realism** – egenskaper hos objekt existerar oberoende av vad omgivningen (t.ex. en fysiker) gör





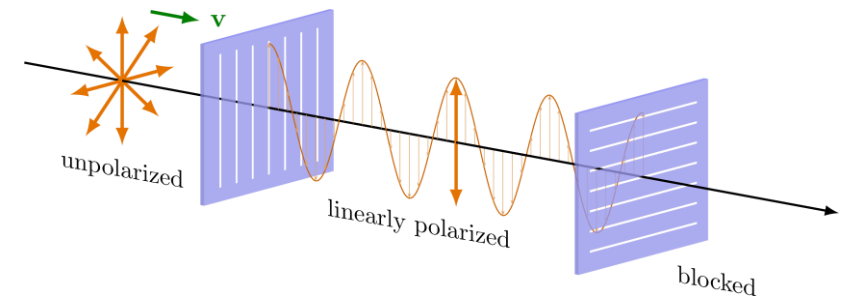
Kvantfysiken *bryter* mot
den klassiska intuitionen!

Kvantfysik – tillstånd, superpositioner

De enklaste möjliga kvantsystemen: de med **två** oberoende tillstånd, ”**tvånivåsystem**”

- En foton (eller vanligt ljus) – två oberoende polariseringar
→ färdas i z-riktningen, kan polariseras längs x- eller y-riktningen

$$|\psi\rangle = a|+\rangle + b|-\rangle$$



- Kan också ta en partikel med spinn $\frac{1}{2}$, t.ex. en elektron. Spinnet kan peka antingen upp eller ner längs en given axel.

Kvantfysik – tillstånd, superpositioner

Om vi mäter polarizationen av en foton i tillståndet $|\psi\rangle = a|+\rangle + b|-\rangle$ får vi

- resultatet "+" (polariserad i x-riktningen) med sannolikhet $|a|^2$
- resultatet "-" (polariserad i y-riktningen) med sannolikhet $|b|^2$

Efter mätningen är tillståndet antingen $|\psi\rangle = |+\rangle$ eller $|\psi\rangle = |-\rangle$ (vågfunktionen "kollapsar")

(Tänk på polariserade solglasögon... Håll två par vinkelrätt mot varandra
→ inget ljus kommer igenom)

Från $1 \times 2 \dots$

\dots till $2 \times 2!$

Två tvånivåsystem

Ett system som är en kombination av två tvånivåsystem har $2^2 = 4$ oberoende tillstånd:

$$|\psi\rangle = a|+\rangle|+\rangle + b|-\rangle|-\rangle + c|-\rangle|+\rangle + d|+\rangle|-\rangle$$

Ett intressant tillstånd är t.ex. $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|+\rangle|+\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|-\rangle|-\rangle$

I detta tillstånd säger vi att de två fotonerna är **sammanflätade** (*entangled*).

Om tillståndet kan skrivas som en produkt $|\psi\rangle = |\psi_1\rangle|\psi_2\rangle$ är det **inte** sammanflätat.

Vadå sammanflätning?

$$|\psi\rangle = a|+\rangle|+\rangle + b|-\rangle|-\rangle$$

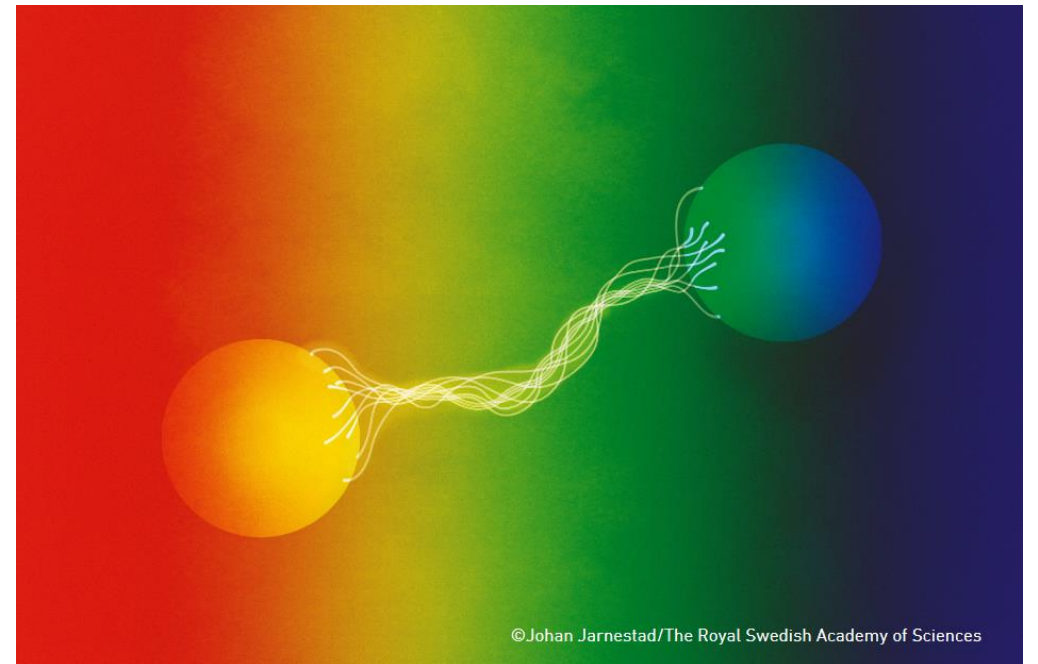
→ I detta tillstånd finns en **stark korrelation** mellan de två fotonerna

Om vi mäter den ena fotonens polarisation och får resultatet “+”...

...så vet att om vi mäter den andras polarisering blir resultatet också “+”

(Ingen chans att vi få $|+\rangle|-\rangle$)

Men det här är **märkligt!** Fotonerna kan vara långt ifrån varandra. Hur vet den ena vad som händer med den andra?

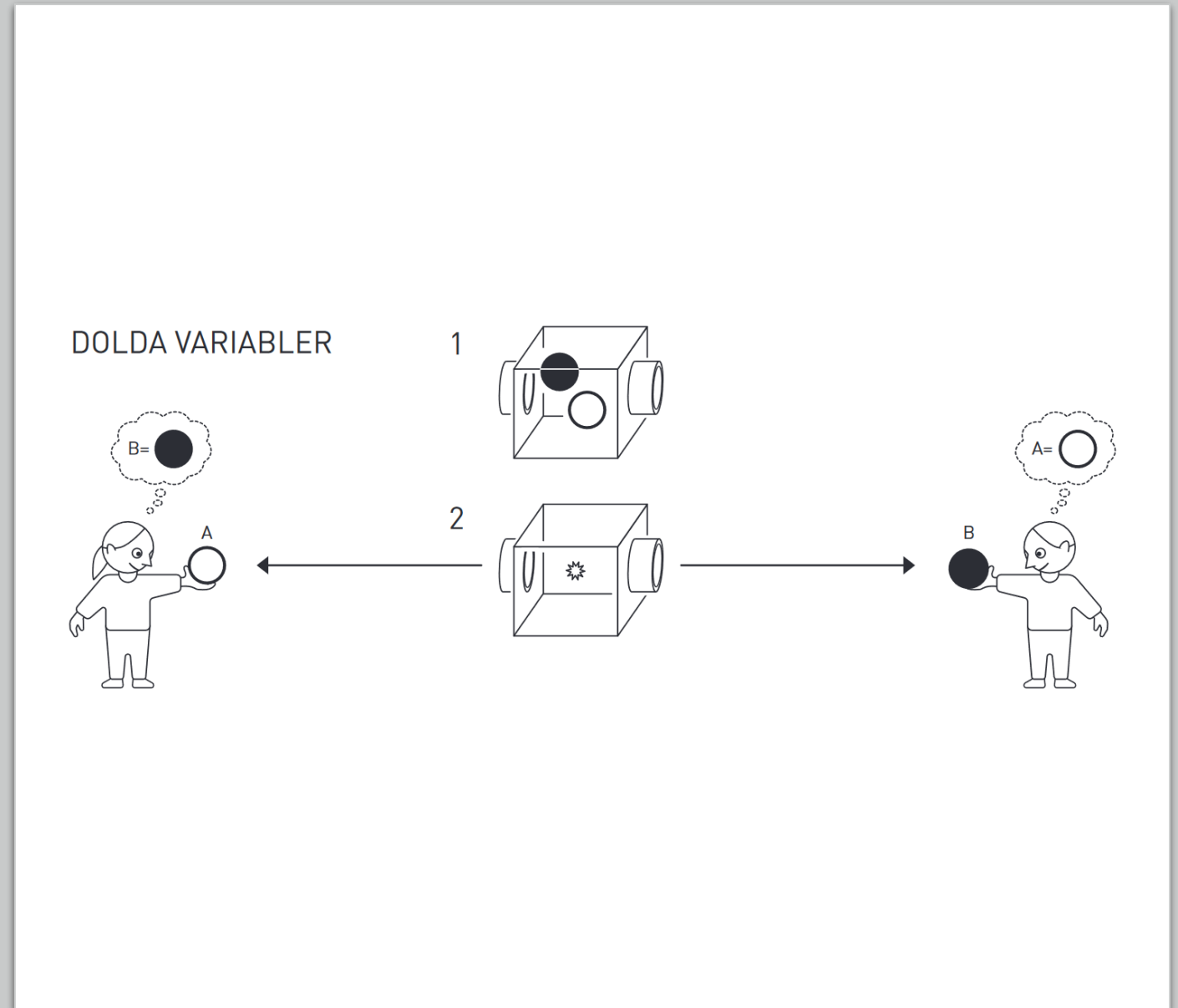


En klassisk analogi

Ta två bollar, en svart & en vit.
Sätt dem i varsin (omärkt) låda,
skicka iväg dem åt olika håll till
Alice & Bob.

Om Alice öppnar den ena lådan
och hittar en vit boll, vet hon
omedelbart att den andra lådan
har en svart boll.

Inget märkligt!



En klassisk analogi – som inte riktigt fungerar!

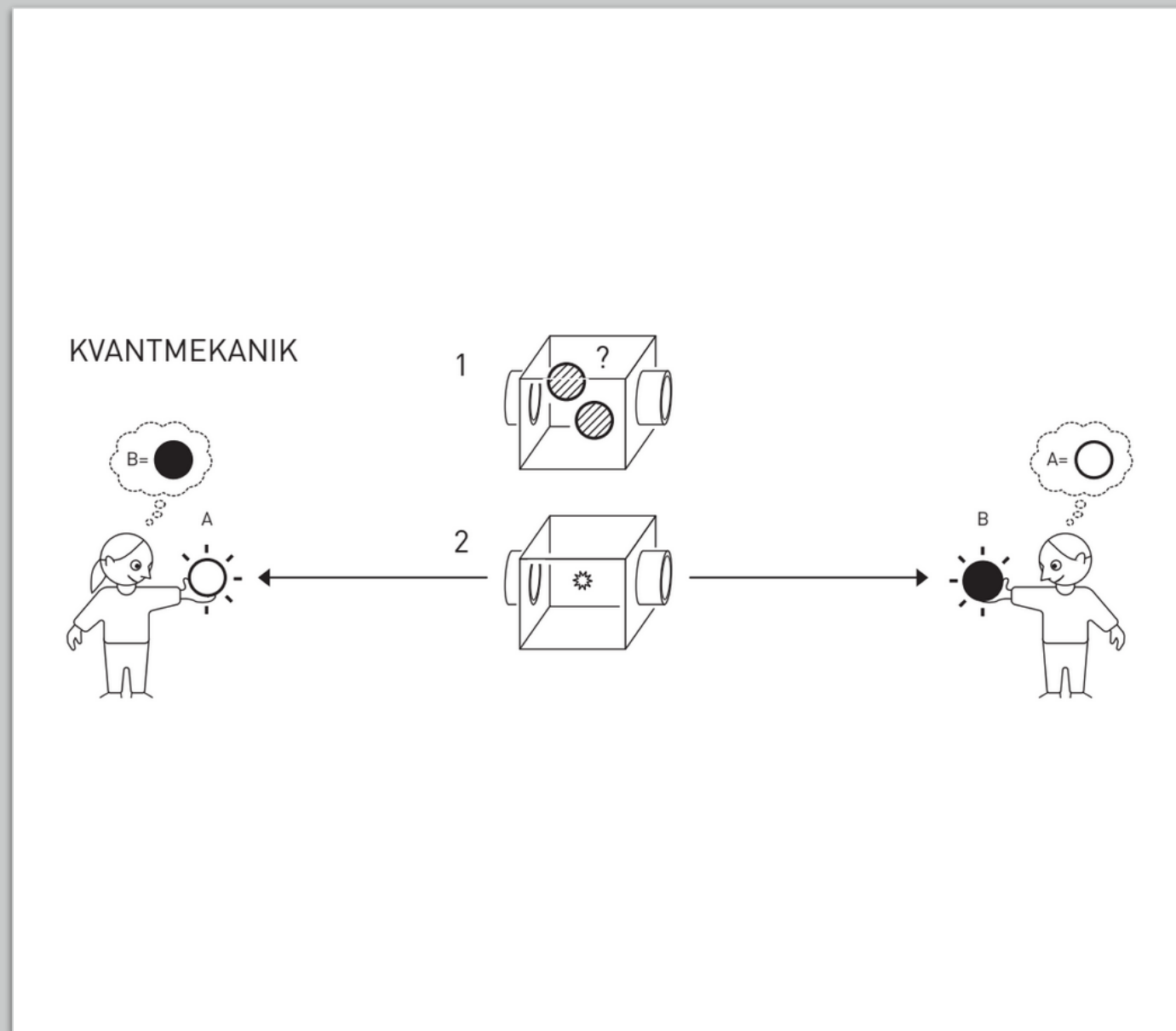
Enligt kvantmekaniken, om partiklarna
är i tillståndet

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|+\rangle|+\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|-\rangle|-\rangle$$

så är det *omöjligt* att säga att en av dem
var "+" eller "-" före mätningen...

Försök att *komplettera* kvantmekaniken
så att vår klassiska analog fungerar
kallas **dolda variabel-teorier**.

Kan vi skilja på dolda variabler och
"vanlig" kvantmekanik?



Bellolikheterna

Kan vi skilja på dolda variabler och "vanlig" kvantmekanik?

John Bell:

- *Lokala dolda variabel*-teorier uppfyller vissa **olikheter**.
- Kvantmekaniken bryter mot dessa olikheter!
- Kan testas med experiment





Clauser – de första experimenten

John F. Clauser

Född 1942 (Californien, USA)

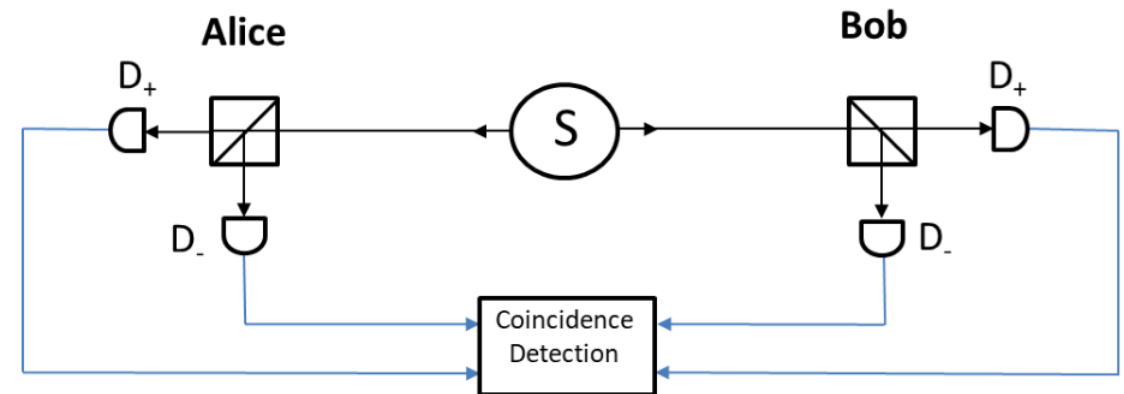
Studerade vid Caltech (BSc) och Columbia (PhD)

Postdoc vid UC Berkley när han genomförde de första "Belltesterna"

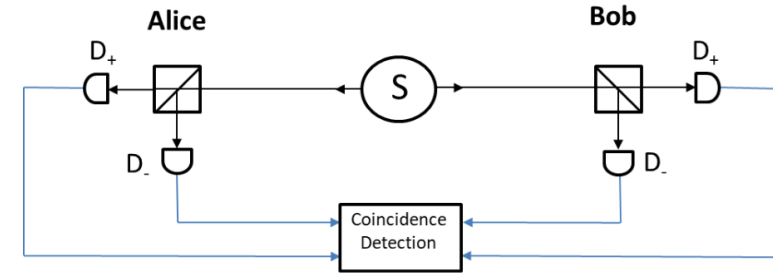
Clauser – de första experimenten

Clauser, med Horne, Schimony och Holt (CHSH), föreslog en mer **praktisk variation** av Bells idé:

- En källa S som genererar sammanflätade fotoner
- De två fotonerna A & B kan mätas på två oberoende sätt (polarizationsaxlar)
- Registreras av detektorer D_{\pm}
- En sista detektor registrerar sammanfallande mätningar



Clauser – de första experimenten



- De två fotonerna A & B kan mätas på två oberoende sätt (polarizationsaxlar)
- Kalla utkomsten av experimenten $A_{1,2}, B_{1,2}$, med värden ± 1
- Då gäller

$$A_1B_1 + A_1B_2 + A_2B_1 - A_2B_2 = A_1(B_1 + B_2) + A_2(B_1 - B_2) = \pm 2$$

- I en typisk dolda variabler-teori kan vi "enkelt" beräkna väntevärden $E(a_1, b_1)$ etc.
- Detta leder till
$$S = |E(a_1, b_1) + E(a_1, b_2) + E(a_2, b_1) - E(a_2, b_2)| < 2$$
- Men i kvantmekaniken kan $S > 2!$

Clauser – de första experimenten

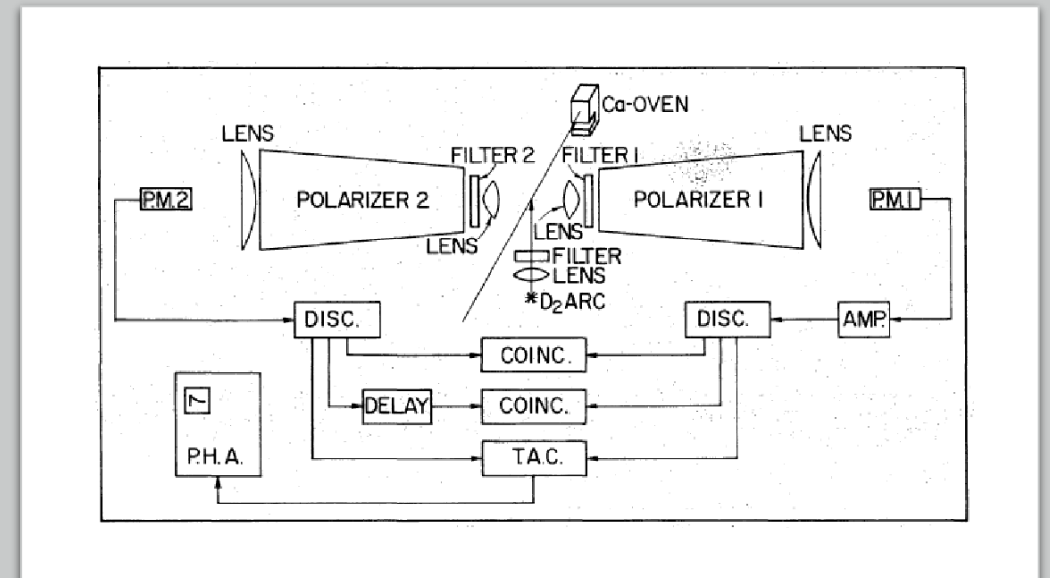
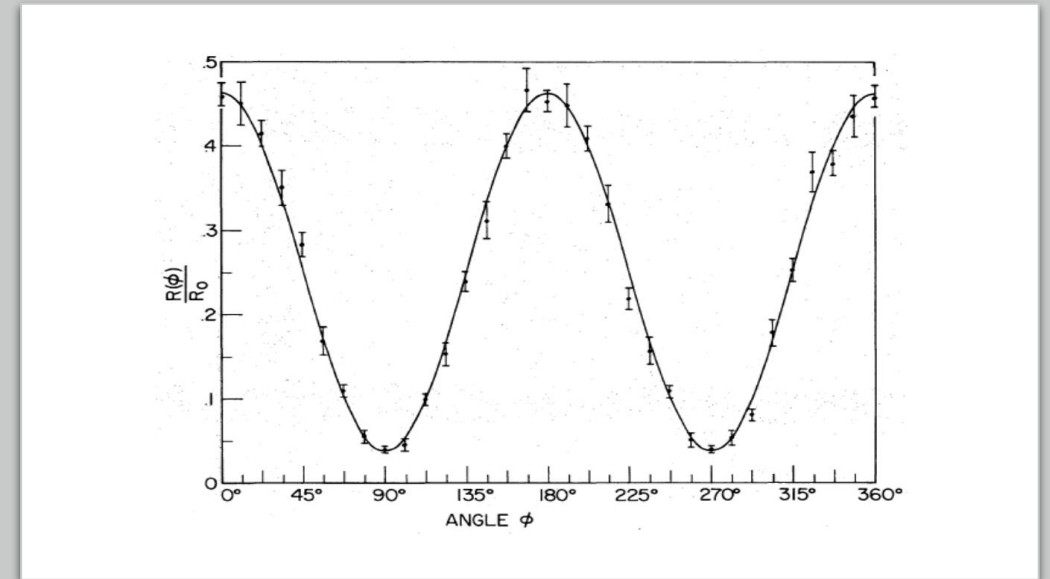
Själva experimentet genomförde Clauser tillsammans med Freedman 1972

Fotonkällan: Calcium – ineffektiv, data måste samlas länge

OBS: Endast en PM=photomultiplier, och en "enkanalspolariserare"

→ Kunde endast observera fotoner med en viss polarisation, t.ex. i x-riktningen

→ Avsaknaden av detektion kan räknas som att polariseringen var i y-riktningen... Men kan också vara ett mätfel



Aspect – kryphålen stängs

Alain Aspect

Född 1942 (Agen, Frankrike)

Studier: ENS de Cachan, Université d'Orsay

Undervisade i Kamerun (!) i tre år (samhällstjänst)

Övriga karriären i Frankrike

Nu: Professor vid Institut d'Optique – Université Paris-Saclay och École Polytechnique, Palaiseau, Frankrike



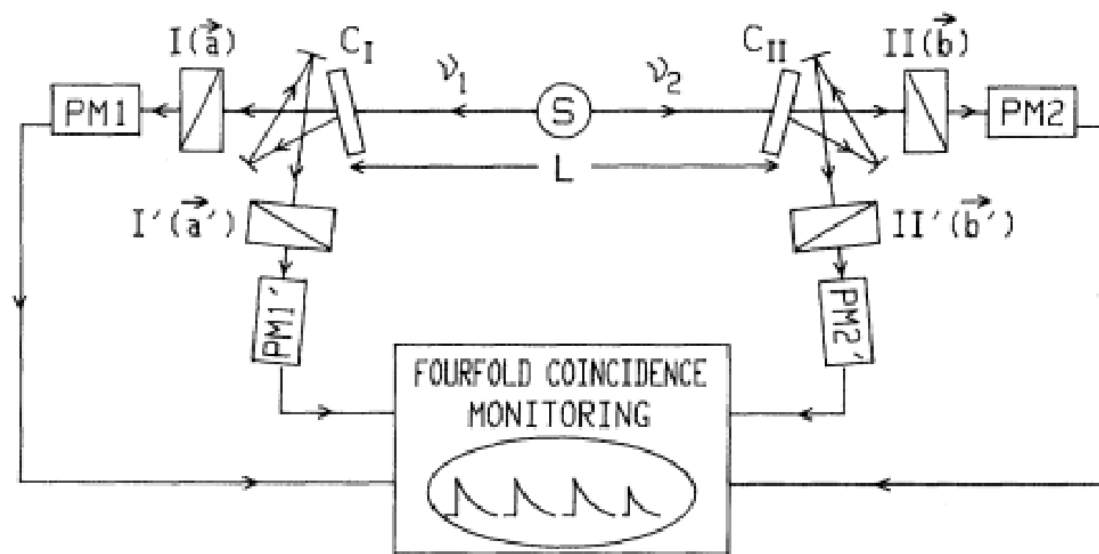
Aspect – kryphålen stängs

Diverse **brister & kryphål** i Clauser-Freedman-experimentet → lokala dolda variabler *kanske* ändå möjliga...

Ett kryphål: **Lokalitet**. De två mätningarna bör vara oberoende (ingen kommunikation tillåten)

Aspect utformade (1980-82) ett experiment där valet av mätning kunde göras *så snabbt* att ingen information hade kunnat förmedlas

Även två-kanalspolariserare, effektivare fotonkälla, etc.



Zeilinger – bortom Bell

Anton Zeilinger

Född 1945 (Reid im Innkreis, Österrike)

Studerade vid Wiens Universitet (doktor 1971)

Habilitation TU Wien 1979

Sedan, olika poster i Österrike, Tyskland (Munchen), USA (MIT)

Nu: Professor vid Universität Wien & Senior Scientist, IQOQI Vienna



Zeilinger – bortom Bell

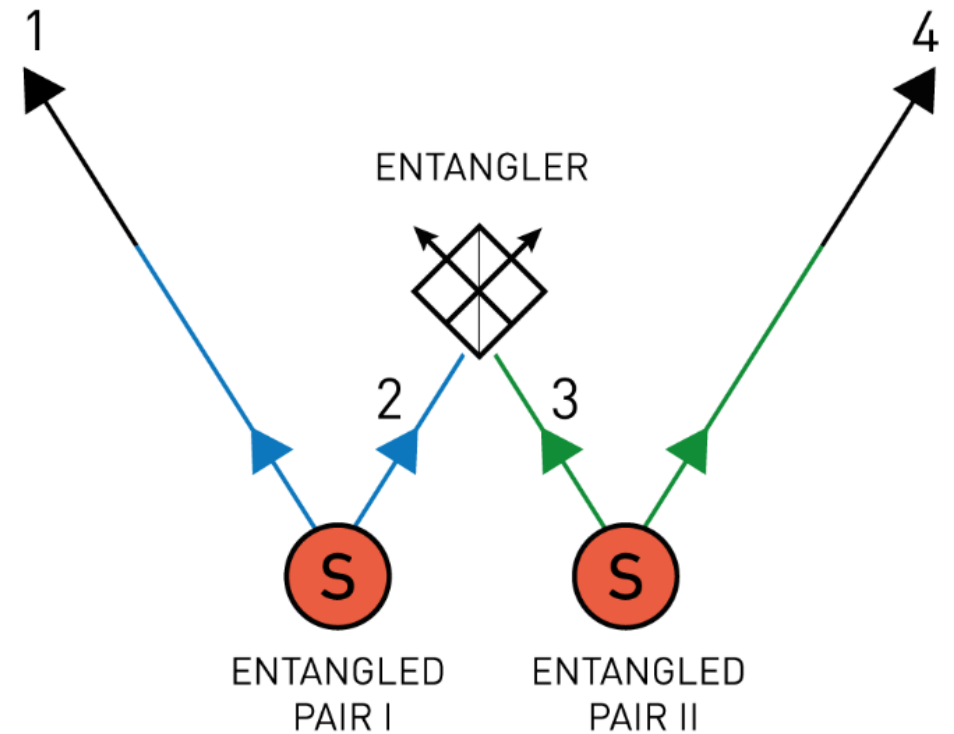
Anton Zeilinger fortsatte att förbättra och förfina Belltesterna ("kryphålsfria" varianter)...

...samt mycket annat:

- Kvantteleportering
- Sammanflätning av partiklar som aldrig möts →
- Studier och experiment med GHZ-tillstånd

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |\uparrow\uparrow\uparrow\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |\downarrow\downarrow\downarrow\rangle$$

Sammanflätning ska ses som en *resurs!*



Sammanfattning

- **Sammanflätning** är den viktigaste egenskapen hos kvantmekaniken (den som skiljer mest jämfört med klassisk fysik) – och en **resurs!**
- Belloliketerna gör det möjligt att experimentellt utesluta en stor klass av möjliga "kompleteringar" av kvantmekaniken.
- Clauser, Aspect och Zeilinger demonstrerade att vår verklighet bryter mot olikheterna, i enlighet med kvantmekaniken.
- Deras arbete har banat väg för nutidens *enorma* mängd forskning inom fundamental kvantmekanik och kvantteknologi.