

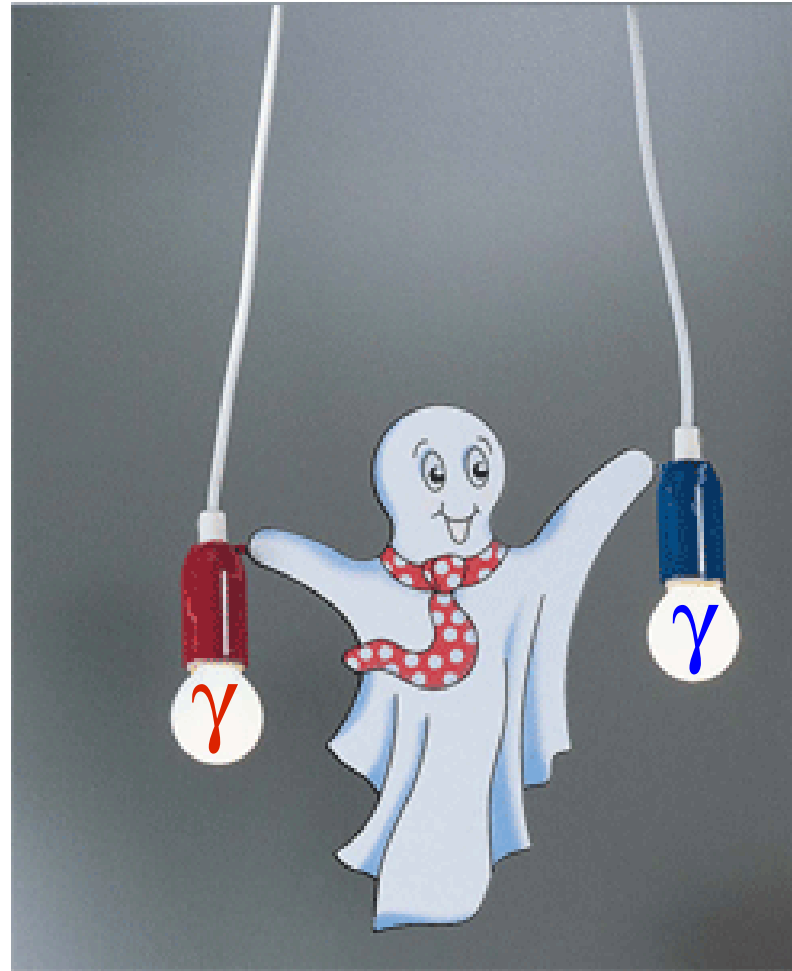


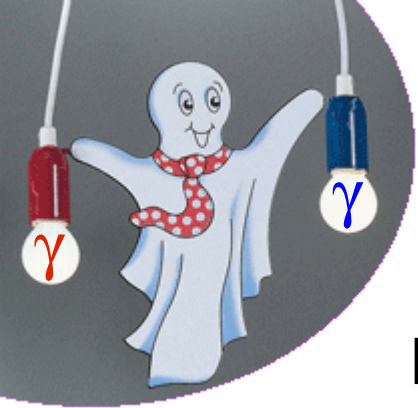
# Sammenfiltrede fotoner

En virkelig spøkelseshistorie

...og Dr. Bertlmanns rosa sokk.

*Bjørn H. Samset*  
Universitetet of Oslo  
Fysikermøtet 2007





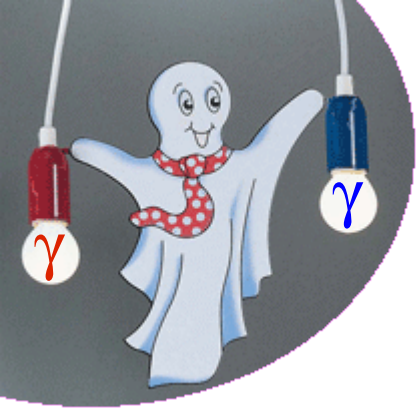
# Innhold

Kan fotoner, under riktige forhold, påvirke hverandre instantant og på tvers av universet, gjennom en slags spøkelsesaktig fjernvirkning?

- En spøkeshistorie
- EPR, Bell, Aspect
- Hva slags natur har vi egentlig?
- Konsekvenser:
  - Kvantekryptografi
  - Kvantedatamaskiner
  - Teleportasjon
  - ???

Mål for opplæringen er at eleven skal kunne beskrive fenomenet sammenfiltrede fotoner og gjøre rede for erkjennelsesmessige konsekvenser av det.



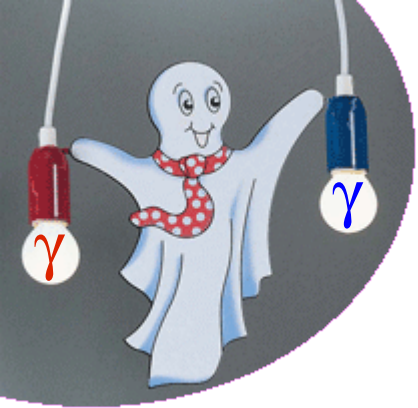


# Historien om Dr. Bertlmanns mystiske sokker

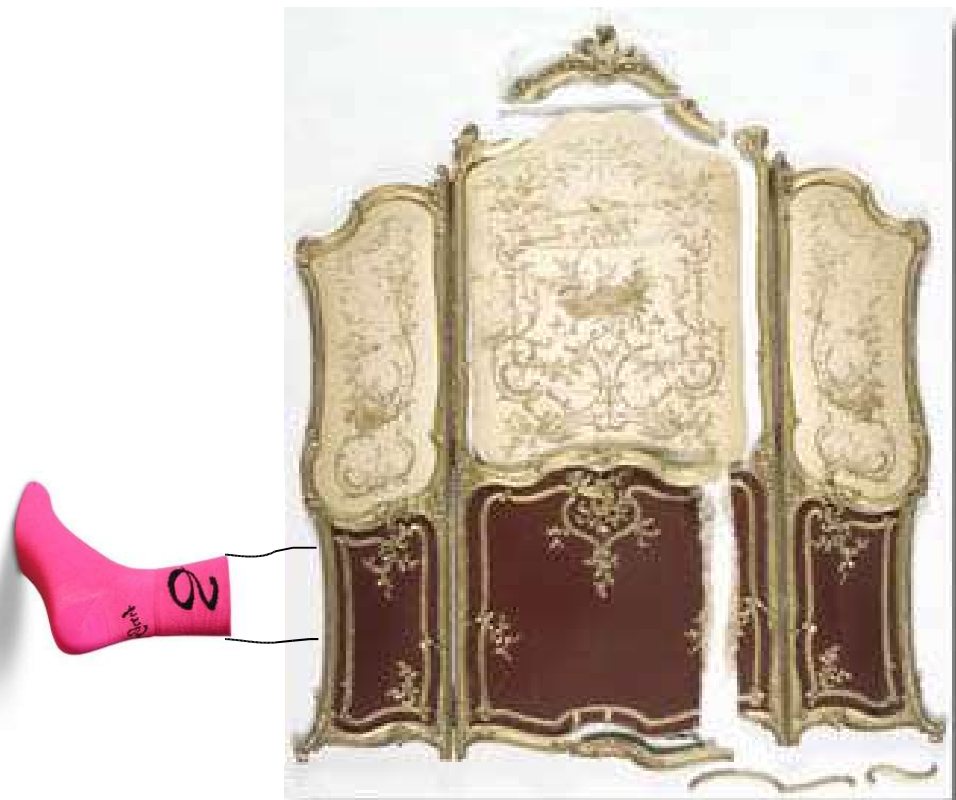


Ludvig XV's påkledningsskjem



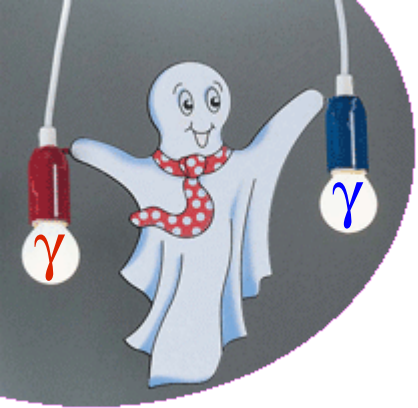


# Historien om Dr. Bertlmanns mystiske sokker



Ludvig XVs påkledningsskjem





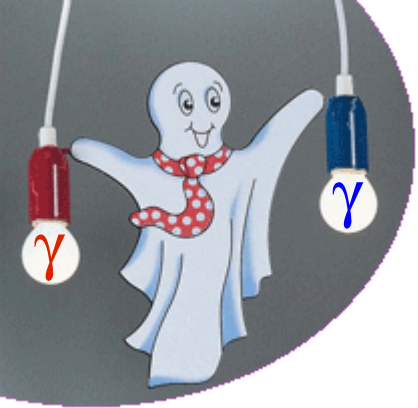
# Historien om Dr. Bertlmanns mystiske sokker



Ludvig XV's påkledningsskjem

Vi vet at Dr. Bertlmann aldri har samme farge på sokkene. Dermed vet vi, med en gang vi ser den rosa, at den andre *ikke* er rosa.



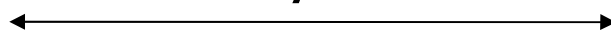


# Historien om Dr. Bertlmanns mystiske sokker



Jorden

20 lysår



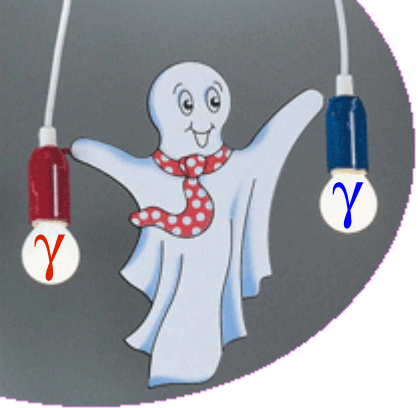
Alikevel vet vi, umiddelbart, når vi ser den rosa sokken, at den andre ikke er rosa.



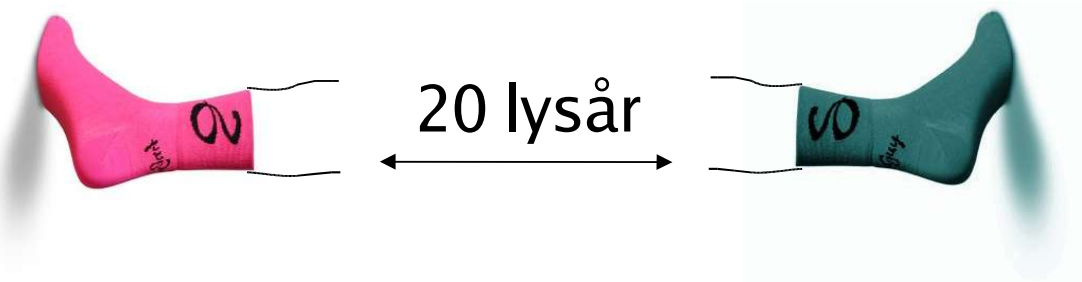
Gliese 581c

(Veldig jord-lignende planet, oppdaget i april i år. Se f.eks.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Gliese\\_581\\_c](http://en.wikipedia.org/wiki/Gliese_581_c))



# Historien om Dr. Bertlmanns mystiske sokker



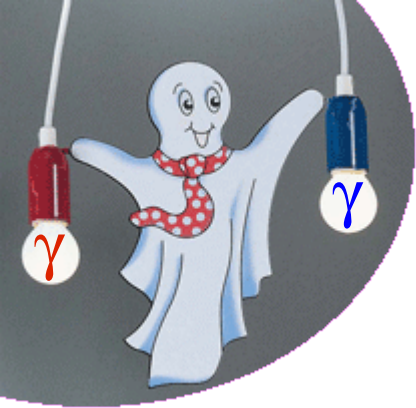
Så langt er alt vel. MEN:  
Dr. Bertlmann går med *kvantesokker*.

- Kvantemekanikk: Sokken kan, med en viss sannsynlighet, ha alle farger. Den velger en farge i det vi ser på den. Rosa.
- Samtidig velger den andre sokken også en farge. Ikke rosa.  
(NB: Dersom sokkene er *sammenfiltrede*. Forklaring kommer.)
- Men hvordan kan sokken på Gliese 581c vite at den på jorden valgte rosa? Umiddelbart? Umulig?

To muligheter:

- 1) Avtalt spill. F.eks. velger sokken på jorden alltid rosa, og den andre aldri. Dette kalles en skjult variabel.
- 2) Sokkene må ses på som en «ting», selv om de er 20 lysår fra hverandre. Dette er kvantemekanikkens tolkning.





# 1935: EPR

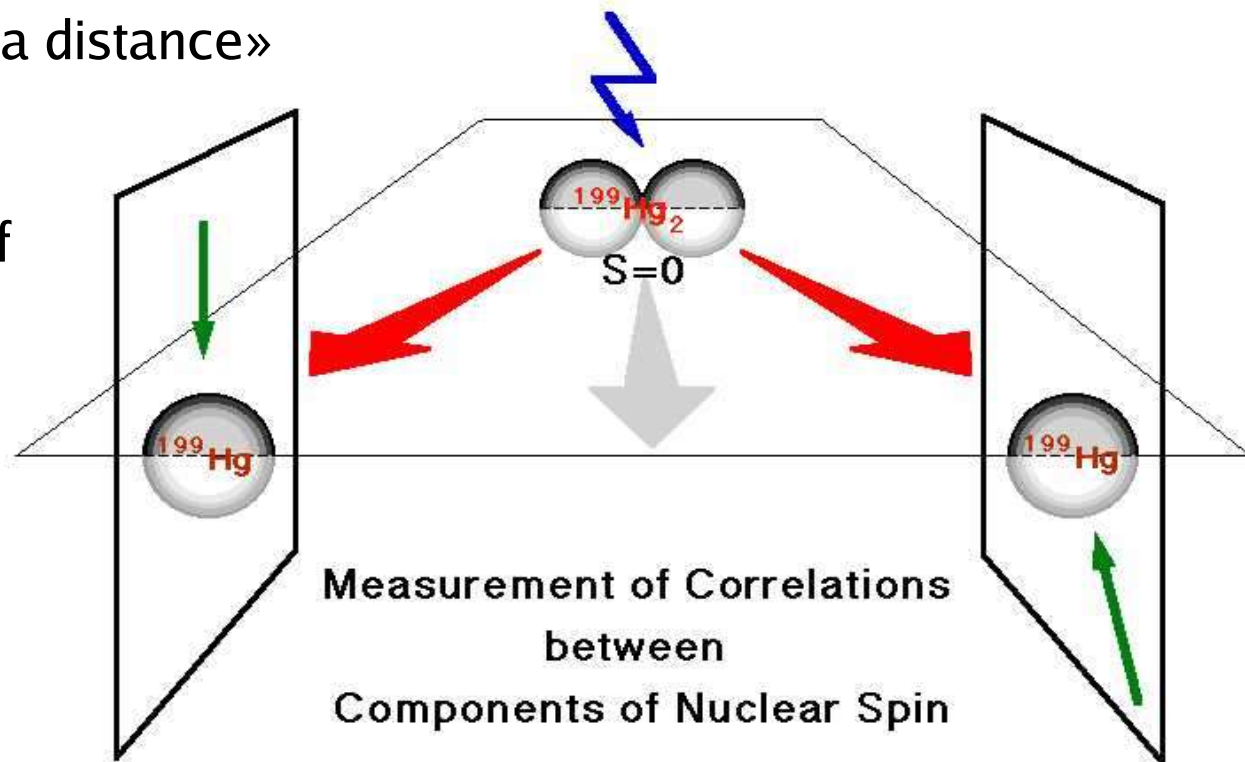
(Einstein, Podolsky, Rosen: Physical Review Vol 47 (1935) s. 777)

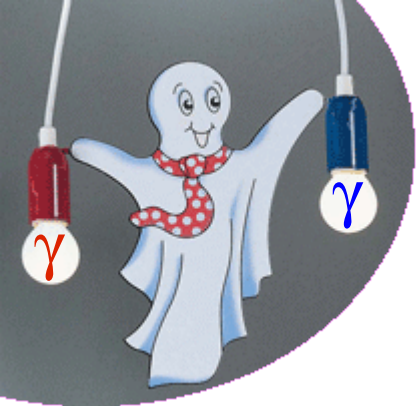
«Kan kvantemekanikkens beskrivelse av virkeligheten regnes som fullstendig?»

- Satte opp et tanke-eksperiment a'la Dr. Bertlmanns sokker (dog noe mer matematisk...)
- De kunne ikke godta at en måling et sted umiddelbart skulle påvirke et objekt et annet sted, slik kvantemekanikken sa.
- Einsten: «spooky action at a distance»
- Lokalitet må holde.

«No reasonable definition of reality could be expected to permit this.»

Siden kvantemek. tross alt beskriver målinger, må det finnes skjulte variable.





# 1964: John Bells teorem

«Ingen fysisk teori basert på lokale, skjulte variable kan gjenskape alle forutsigelsene til kvantemekanikk.»

eller:

Det går an å gjøre et eksperiment som viser forskjell på lokale, skjulte variable og det kvantemekanikk forutsier.

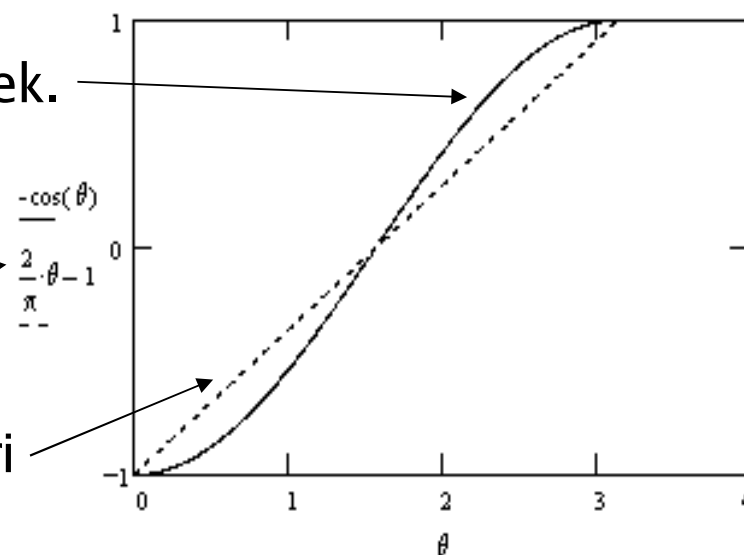


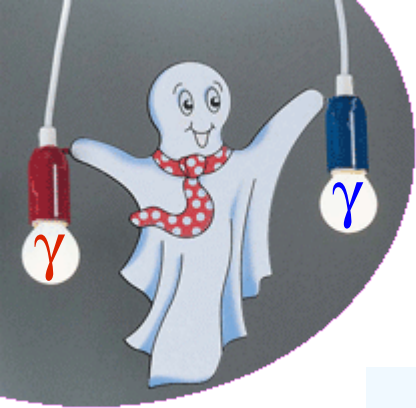
John Bell,  
Dr. Bertlmanns venn.

Grense for kvantemek.

Hvor sterk sammenheng  
kan det maksimalt være  
mellom to målinger?

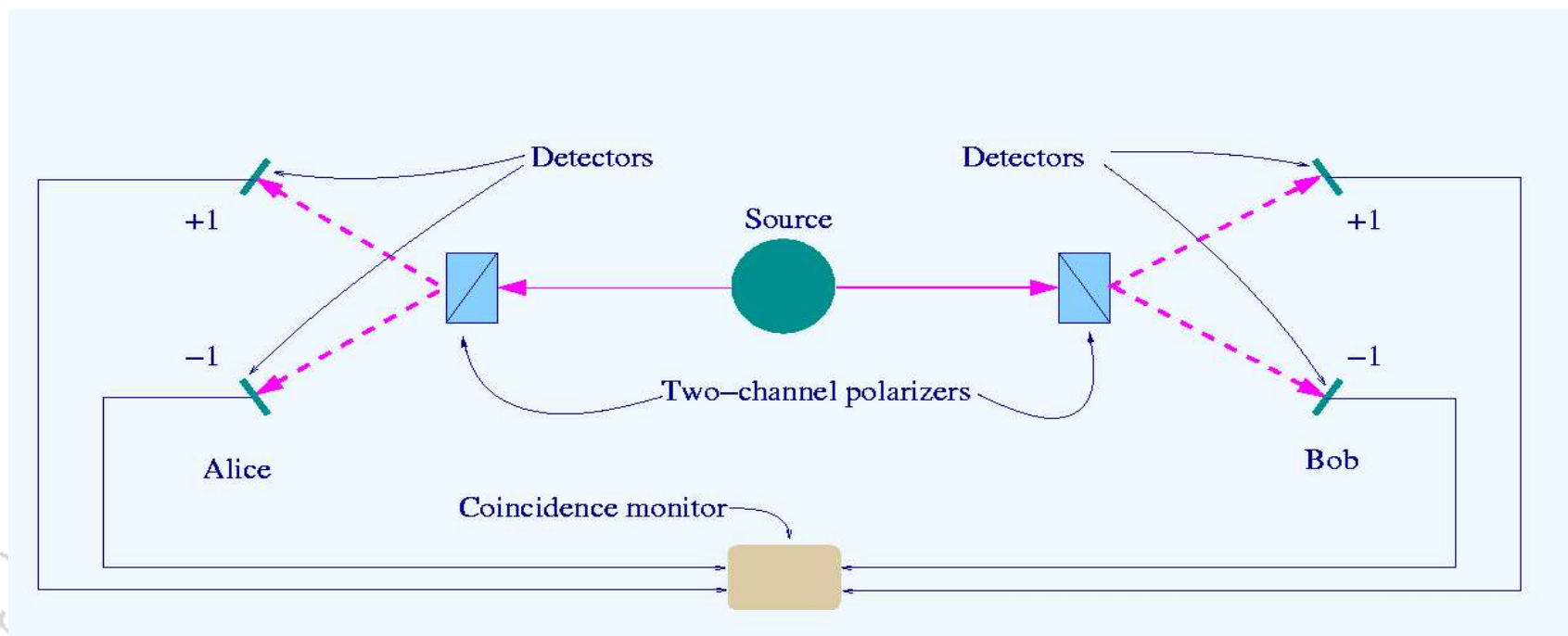
Grense for lokal teori



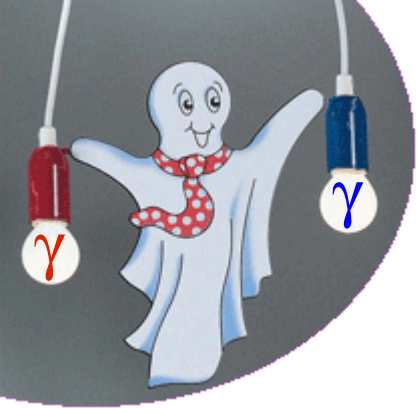


# 1982: Alain Aspects forsøk

(Strengt tatt først gjort av Freedman and Clauser i 1972)



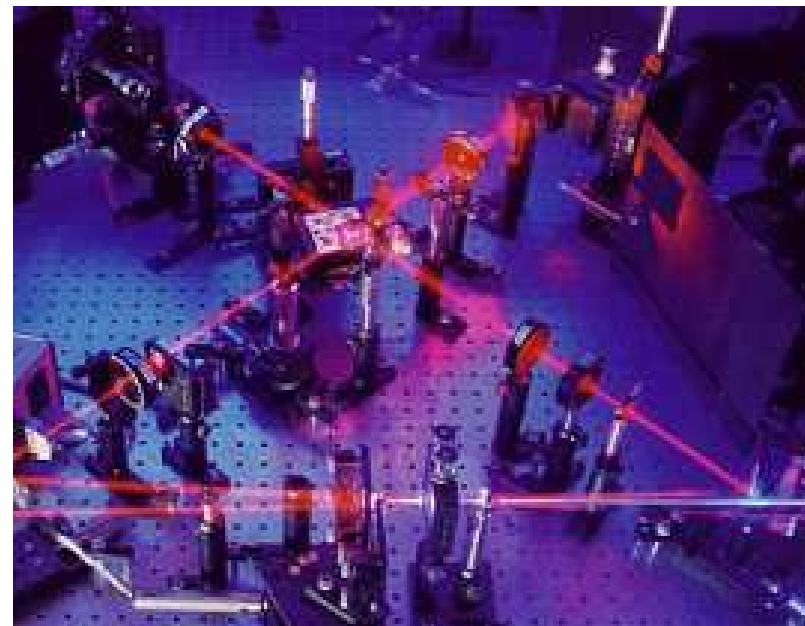
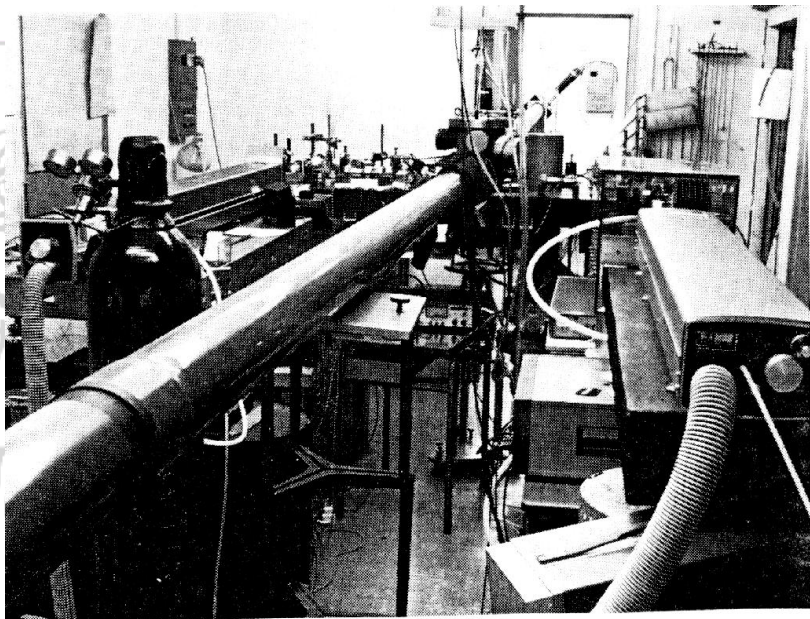
- Kilden sender ut to fotoner, der det vi vet er at de er polarisert hver sin vei («opp» og «ned»).
- Alice kan velge å måle polariseringen langs to vinkler – visse sanns. for å slippe igjennom (+) eller bli stoppet (-).
- Bob kan måle langs to vinkler som er ulike fra Alice's vinkler.
- De bestemmer ikke hvilken vinkel de velger før etter at fotonene er sendt.
- Korellasjoner (++ , +- , -+ , --) måles, og sjekkes mot Bells teorem.



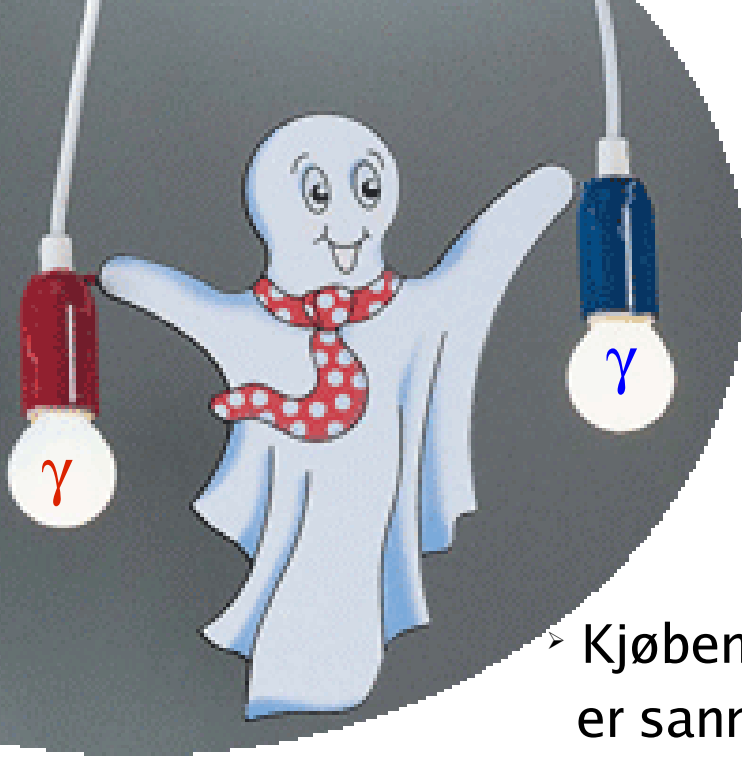
Konklusjon:

# Sammenfiltring er virkelig!

- Alain Aspect viste i 1982 klart at lokalitet er brutt. (I sin dr.avhandling...)
- Mange grupper, fra da og frem til i år, har vist det samme, i mer og mer nøyaktige eksperimenter.
- Og dessuten: Eksperimentene ikke bare bryter lokalitet, de viser nøyaktig det kvantemekanikken forutsier.

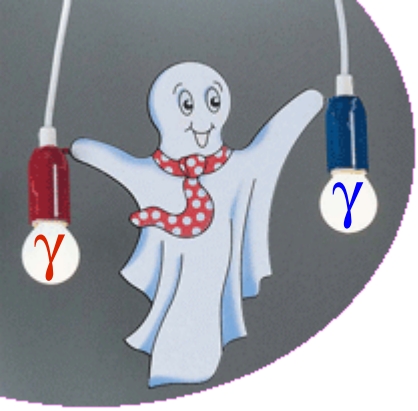


# Sammenfiltring: en tolkning



Mål for opplæringen er at eleven skal kunne beskrive fenomenet sammenfiltrede fotoner og gjøre rede for erkjennelsesmessige konsekvenser av det.

- Kjøbenhavntolkningen av kvantemekanikken sier at alt er sannsynligheter, inntil vi måler og finner et eksakt svar.
- En kilde sender ut to fotoner i en sammenfiltret tilstand.
- Det eneste naturen har bestemt, er at de må være polarisert hver sin vei.
- I utgangspunktet er alle polariseringer mulige, helt til det gjøres en måling på en av dem.
- Vi måler på den ene, og tvinger den til å velge en polarisering.
- Dermed velger den andre – samtidig – den motsatte polariseringen, uansett hvor langt unna hverandre de er.
- Det er *ikke* slik at de hadde disse polariseringene fra starten av.
- En “måling” er dermed en veldig fundamental ting, som tvinger naturen til å avgjøre noe.



# ...men er det noe vits i det?

«I cannot seriously believe in quantum theory because the theory cannot be reconciled with the idea that physics should represent a reality in time and space, free from spooky actions at a distance.»

Albert Einstein

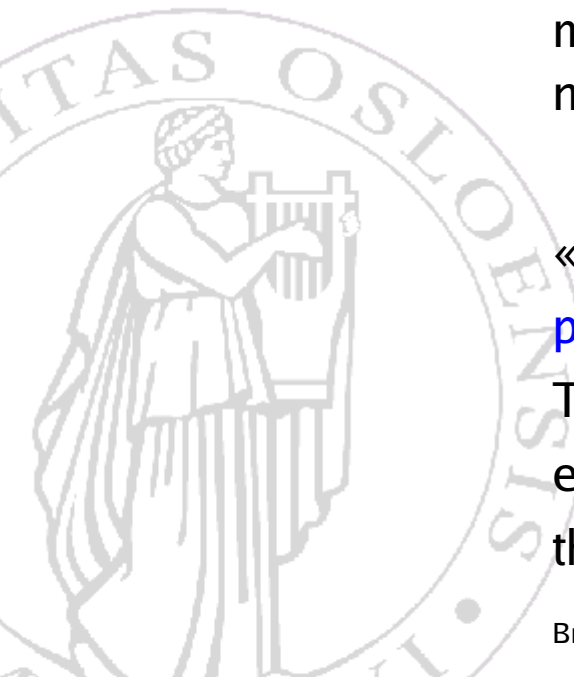
«I think it is not an exaggeration to say that the realization of the importance of entanglement and the clarification of the quantum description of single objects have been at the root of a second quantum revolution and that John Bell was its prophet. And it may well be that this once purely intellectual pursuit will lead to a new technological revolution.»

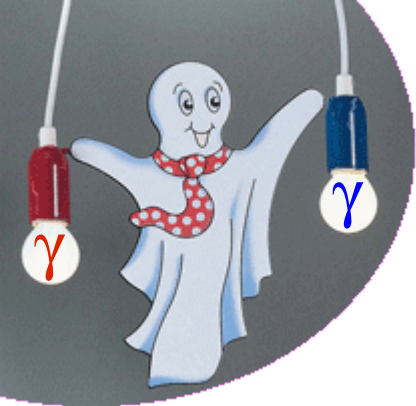
Alain Aspect

«Quantum encryption, quantum computing and quantum teleportation could be just the start of the new quantum revolution.

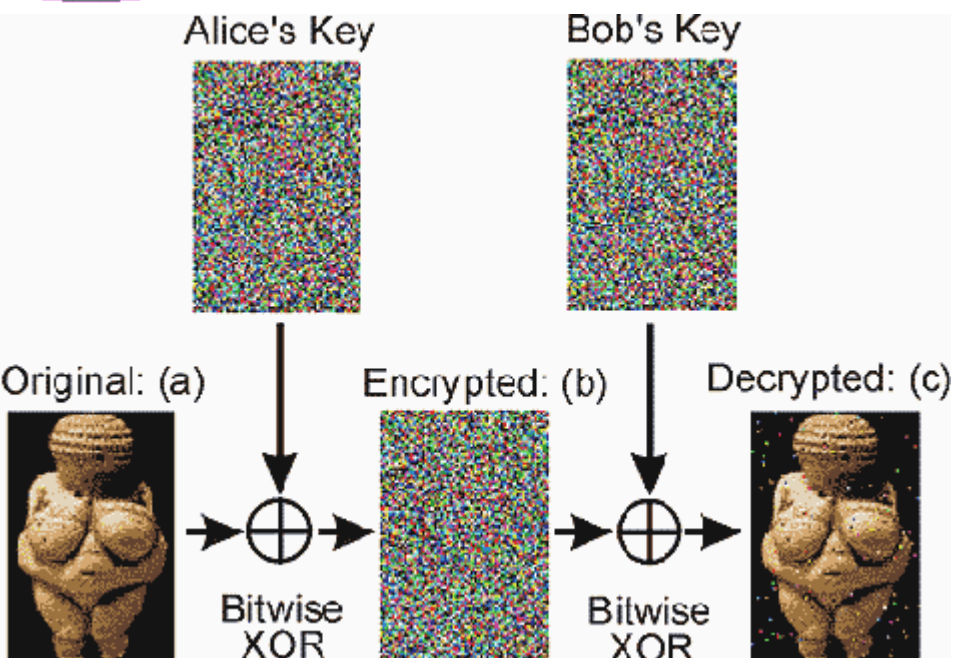
Through quantum entanglement, new quantum effects are exploding onto the practical world scene. There can be little doubt that quantum entanglement, the God Effect, is the next big thing.»

Brian Clegg



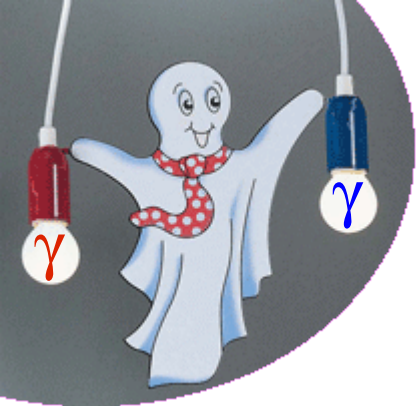


# Uknekkbare koder



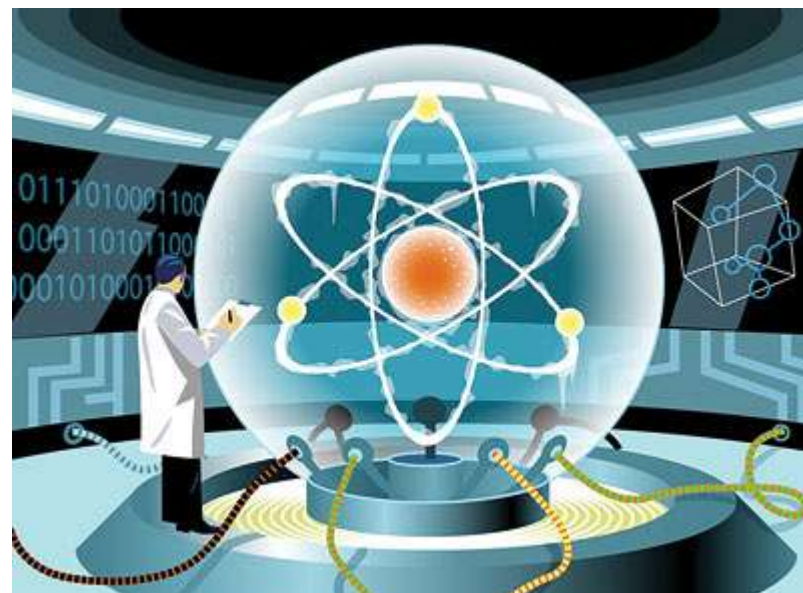
- Vi vil gjerne ha sikre koder...
- I prinsippet finnes det en helt uknekkbar kode – du må bare ha en nøkkel som er like lang som selve beskjednen, og den kan bare brukes en gang.
- Hvordan kommuniserer vi denne nøkkelen sikkert?
- Sammenfiltrering kan fikse det!
- Kommersiell systemer finnes, lengste forbindelse er 148.7km lang.

|                                  |   |   |   |   |   |   |   |   |
|----------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Alice's random bit               | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Alice's random sending basis     | + | + | x | + | x | x | x | + |
| Photon polarization Alice sends  | ↑ | → | ↘ | ↑ | ↘ | ↗ | ↗ | → |
| Bob's random measuring basis     | + | x | x | x | + | x | + | + |
| Photon polarization Bob measures | ↑ | ↗ | ↘ | ↗ | → | ↗ | → | → |
| PUBLIC DISCUSSION OF BASIS       |   |   |   |   |   |   |   |   |
| Shared secret key                | 0 |   | 1 |   |   | 0 |   | 1 |

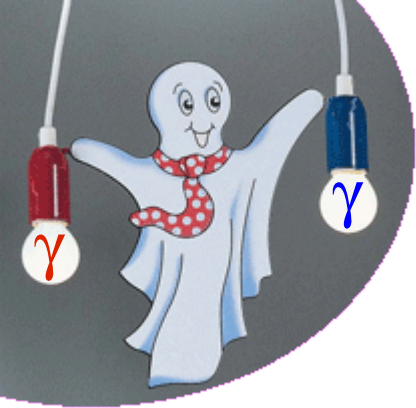


# Kvantedatamaskiner

- Datamaskiner øker i kapasitet enormt raskt (jmf. Moores lov)
- Vi når etter hvert fysiske grenser
- Neste fundamentale skritt: bit  $\rightarrow$  qbit
- En qbit(=quantum bit) er ikke 0 eller 1, men en kvantetilstand, som i prinsippet kan lagre et uendelig langt tall.
- En kvantedatamaskin vil kunne gjøre beregninger mye fortere enn vanlige PCer.
- Faktorisere store tall, simulere kvantesystemer, sortering...
- Men hvordan?

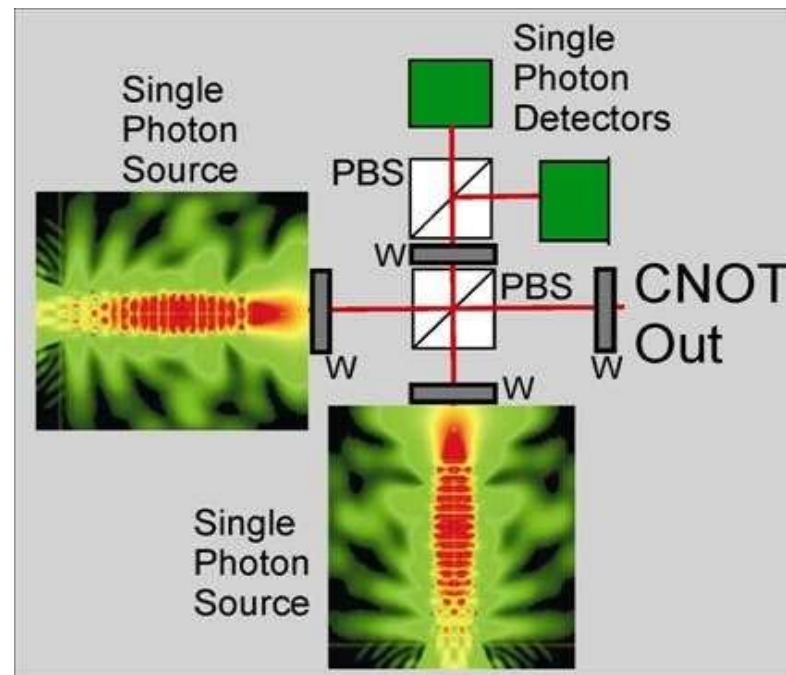
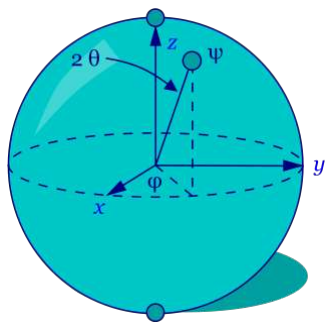


Kan da knekke nesten  
alle dagens koder!

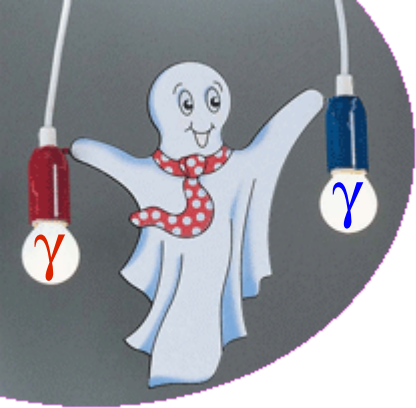


# Kvantedatamaskiner

- Må kunne manipulere qbits, og kunne lese ut informasjon fra dem.
- Ingen av delene er lette...
- I en vanlig PC: logiske porter
- For å lage en kvanteport: bruke sammenfiltrering?
- Manipuler på ett av de to fotonene med porten

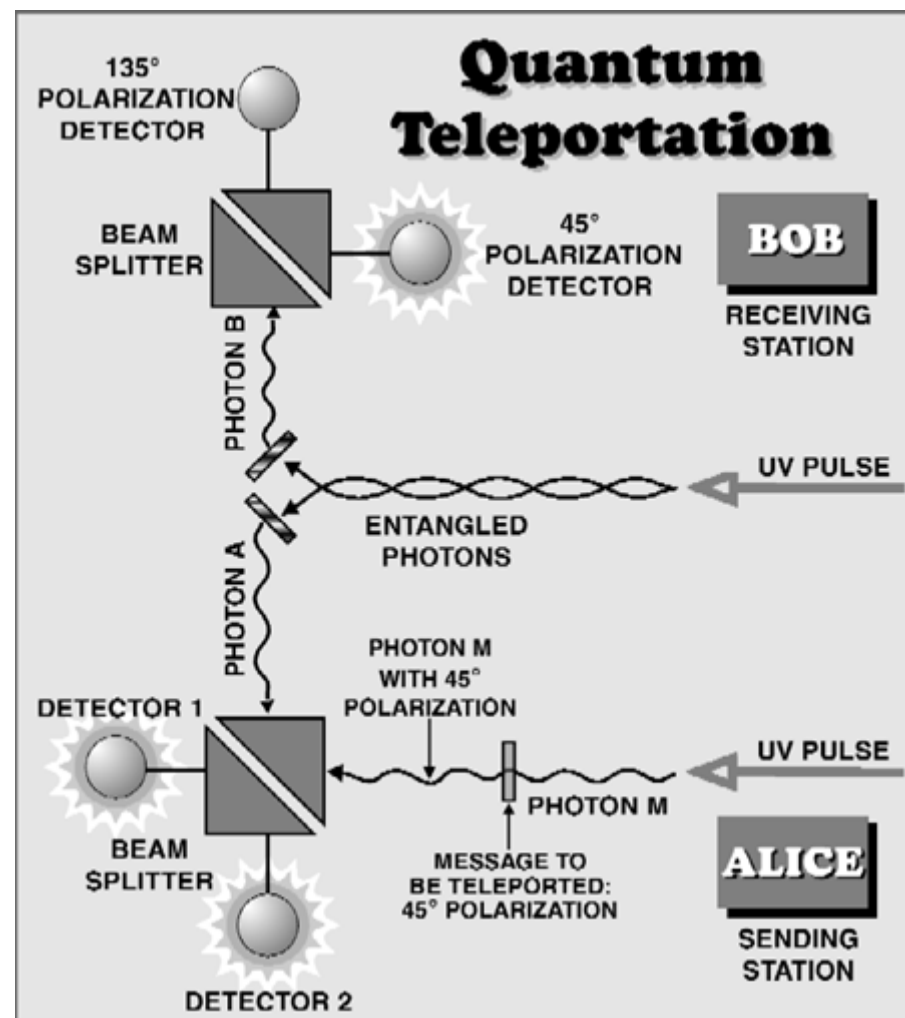
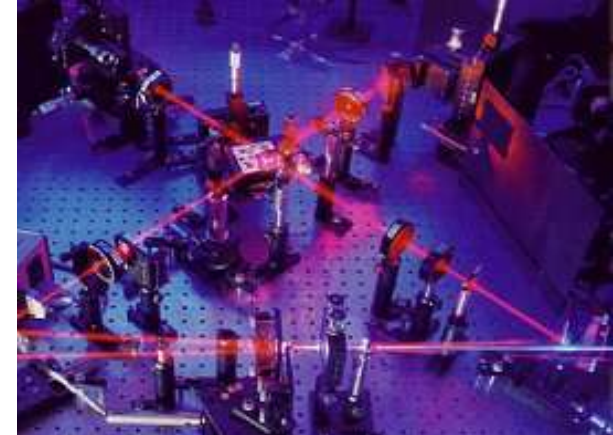


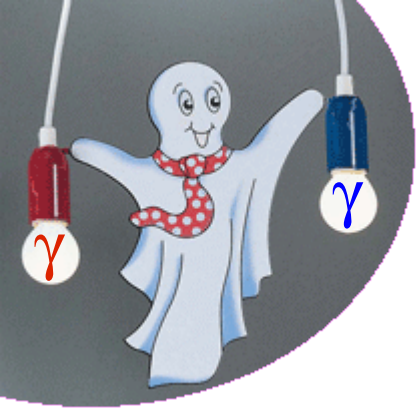
Status: Litt merkelig. Vi har mange ferdige algoritmer for kvantedatamaskiner, men ingen maskin å bruke dem på. Kvantecomputing er fortsatt i det blå – men mulighetene er enorme hvis vi får det til.



# Teleportasjon

- › Å flytte noe fra A til B, uten å reise imellom
- › Velkjent fra Star Trek
- › Umulig for mennesker...
- › ...men ikke for små kvantemekaniske systemer
- › Vi kan «teleportere» fotoner, elektroner etc.
- › Bruker sammenfiltrede tilstander, forhåndssent til A og B
- › En måling i A «teleporterer» en kvantetilstand derfra og til B
- › En måte å flytte informasjon i en kvantedatamaskin på!

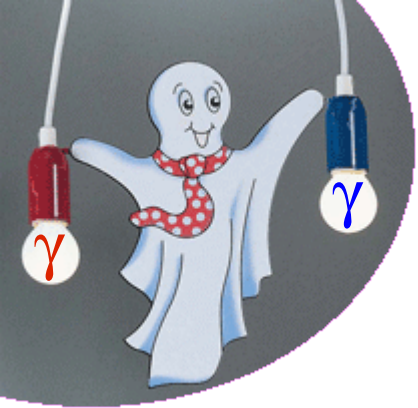




# Men bryter vi lysfart-prinsippet?

Warp speed!

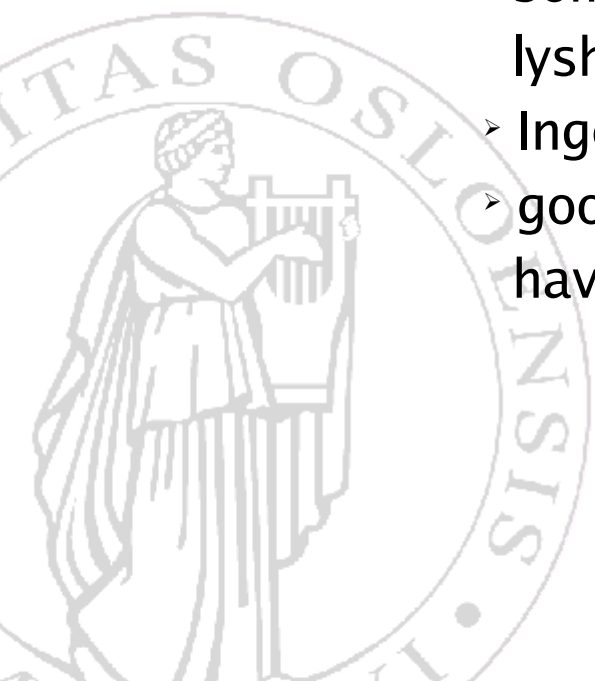


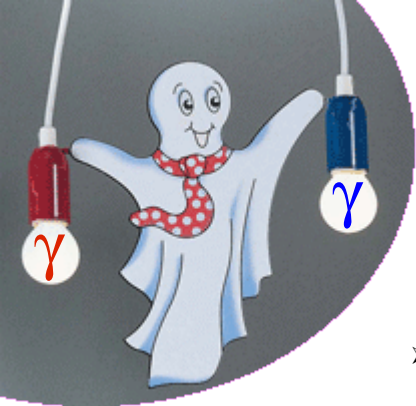


# Men bryter vi lysfart-prinsippet?

- Enkelt svar: Nei.
- Hovedgrunn: Kvantemekaniske målinger er alltid statistiske. Vi må, i alle tilfellene diskutert her, også kommunisere ekstra informasjon på vanlig måte – d.v.s. under lyshastigheten.
- Dette ødelegger likevel ikke nytten ved sammenfiltrering.
- Det er mange som prøver å finne på argumenter som kan komme rundt lyshastigheten
- Ingen har lykket enda
- google gir dere et hav av eksempler...

Warp speed!



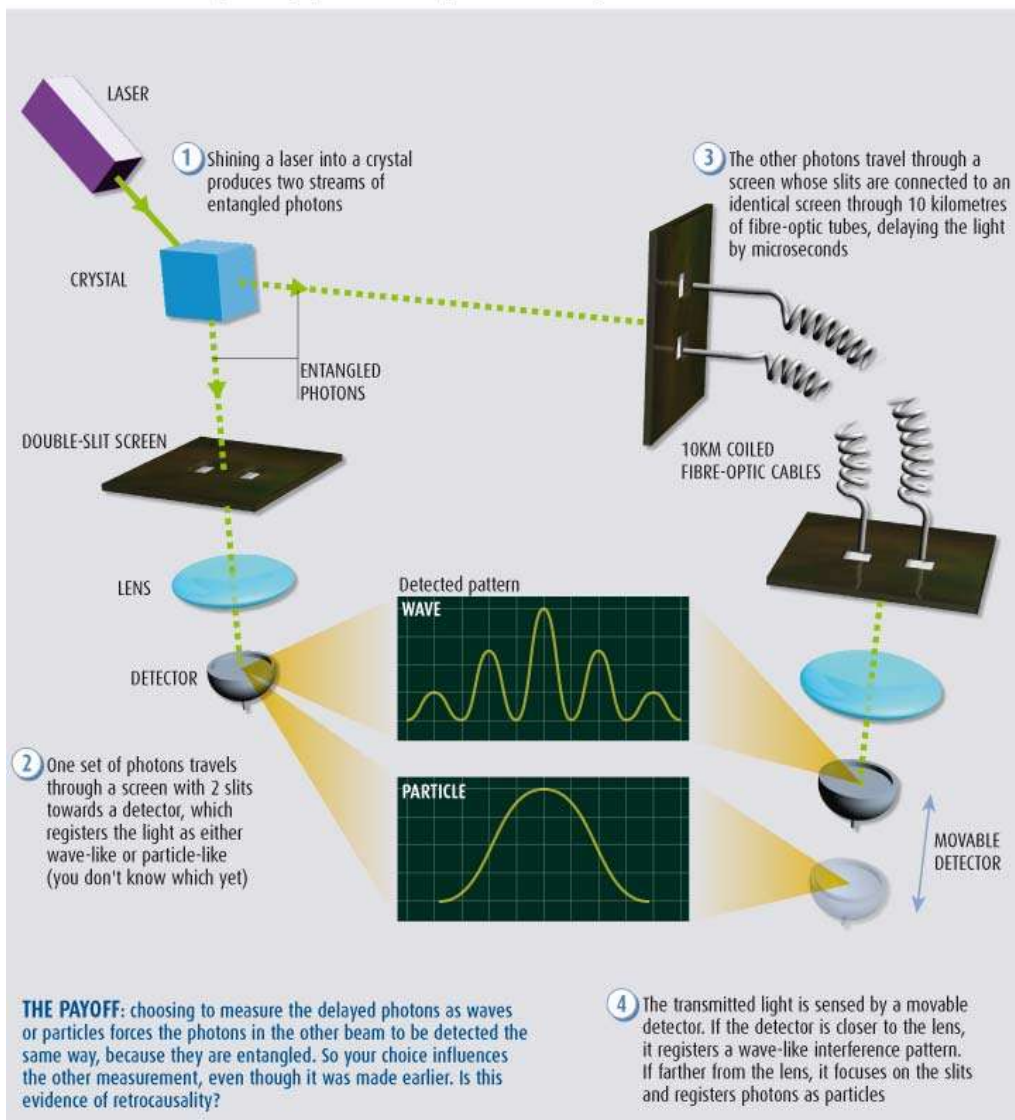


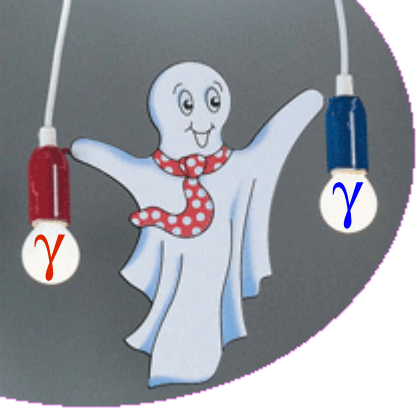
# Rare muligheter...?

- Sammenfiltrering er blitt «mainstream» forskning, til tross for Einsteins skepsis
- Fortsatt noen som prøver å tolke på andre måter, men resultatene står uansett
- En del merkelige eksperimenter er i ferd med å bli gjort. F.eks. et som kan bryte prinsippet om kausalitet, planlagt av John Cramer ved Univ. of Washington

## HOW TO CHANGE THE PAST

Researchers have proposed an experiment that might demonstrate retrocausality, the ability to influence an event that has already occurred. It uses the weird quantum properties of waves, particles and entanglement





# Sammenfiltret oppsummering

- Sammenfiltrede fotoner: To fotoner som er skapt i en «felles» tilstand, slik at en er polarisert opp og en ned, men naturen har ikke bestemt hvilken som er hvilken før vi måler på dem.
- Når vi måler på det ene, bestemmer vi samtidig det andre, selv om det andre fotonet er på andre siden av Universet.
- Dette bryter ikke prinsippet om at kommunikasjon raskere enn lyset er umulig, siden vi alltid må sende mer informasjon på klassisk vis.
- Sammenfiltrering er nyttig innen kryptografi, nye datamaskiner og muligens mange andre områder. Det er et relativt nytt kvantefenomen, som ikke er hverken fullt ut forstått eller ferdig utnyttet.
- Følg med :-)

Tips: The God Effect, Brian Clegg. PopVit fra 2006.