



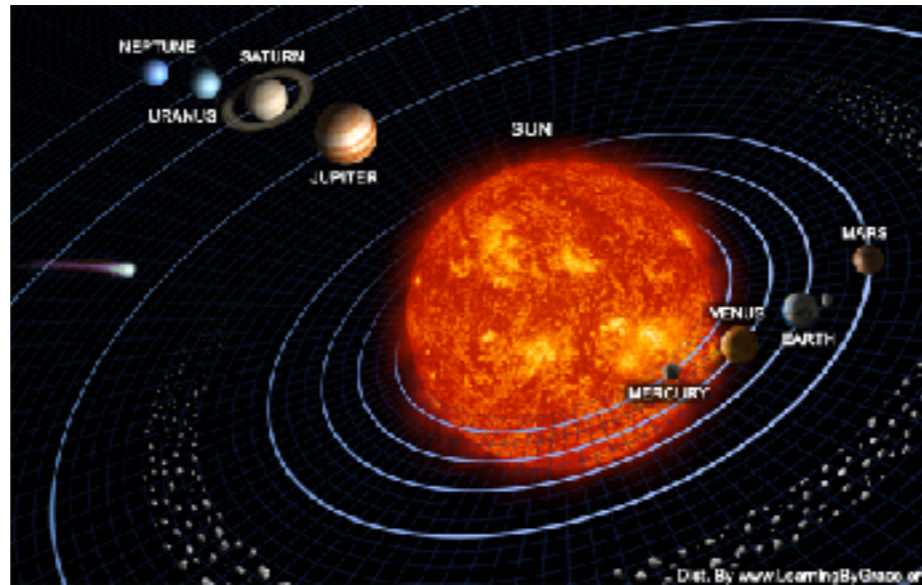
# Kvantemekanik og kvantecomputere

Anders S. Sørensen  
Niels Bohr Institutet  
Københavns Universitet

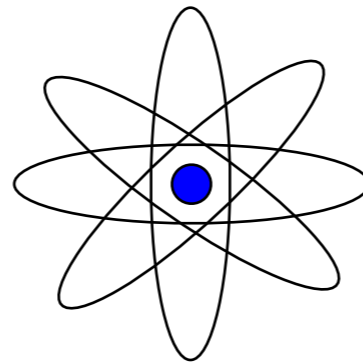


# Kvantemekanik

Store ting: Newtons love



Bohr's atommodel:



Ikke (helt) rigtig

Kvantemekanik:

“beskriver hvad der sker inde i atomerne”

# Kvantemekanik er svært

Det kan da  
ikke passe



Albert Einstein

Jo det kan!



Niels Bohr

# Fra filosofi til teknologi

Bohr og Einstein: Mange diskussioner om betydning

“Gud spiller ikke med terninger”

Filosofi/religion

I dag: kan lave eksperimenter med et atom

Verden er bare mærkelig

Fysik

Kan det mærkelig bruges til noget?

Kvanteinformation: Gem en bit i et atom

Teknologi

=> nye muligheder

# Ionfælder

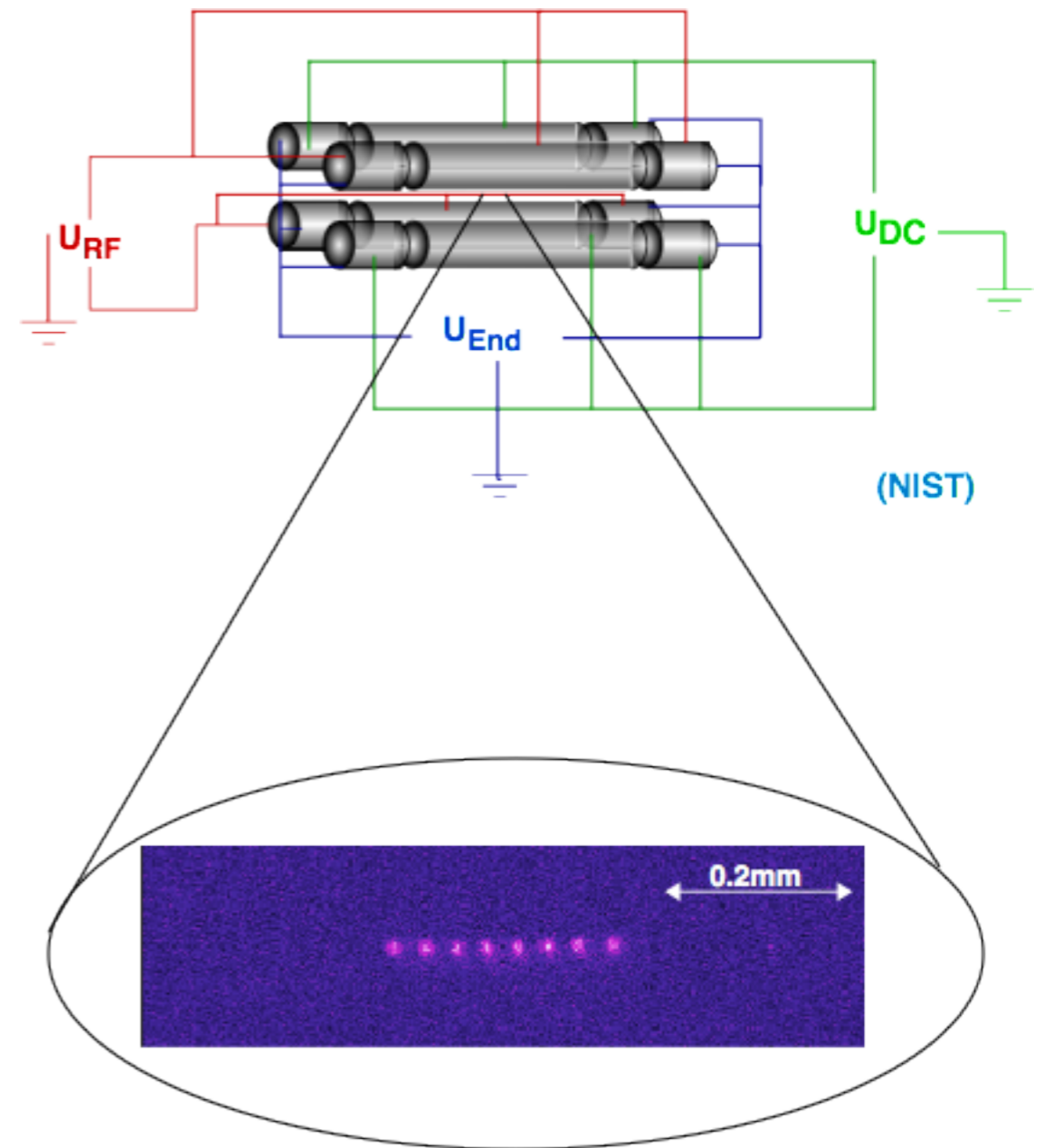
Man kan fange og se ét atom

Her 8  $\text{Mg}^+$  ioner

Gem information i et atom:

0 = Elektron kører med uret rundt

1 = Elektron kører mod uret rundt

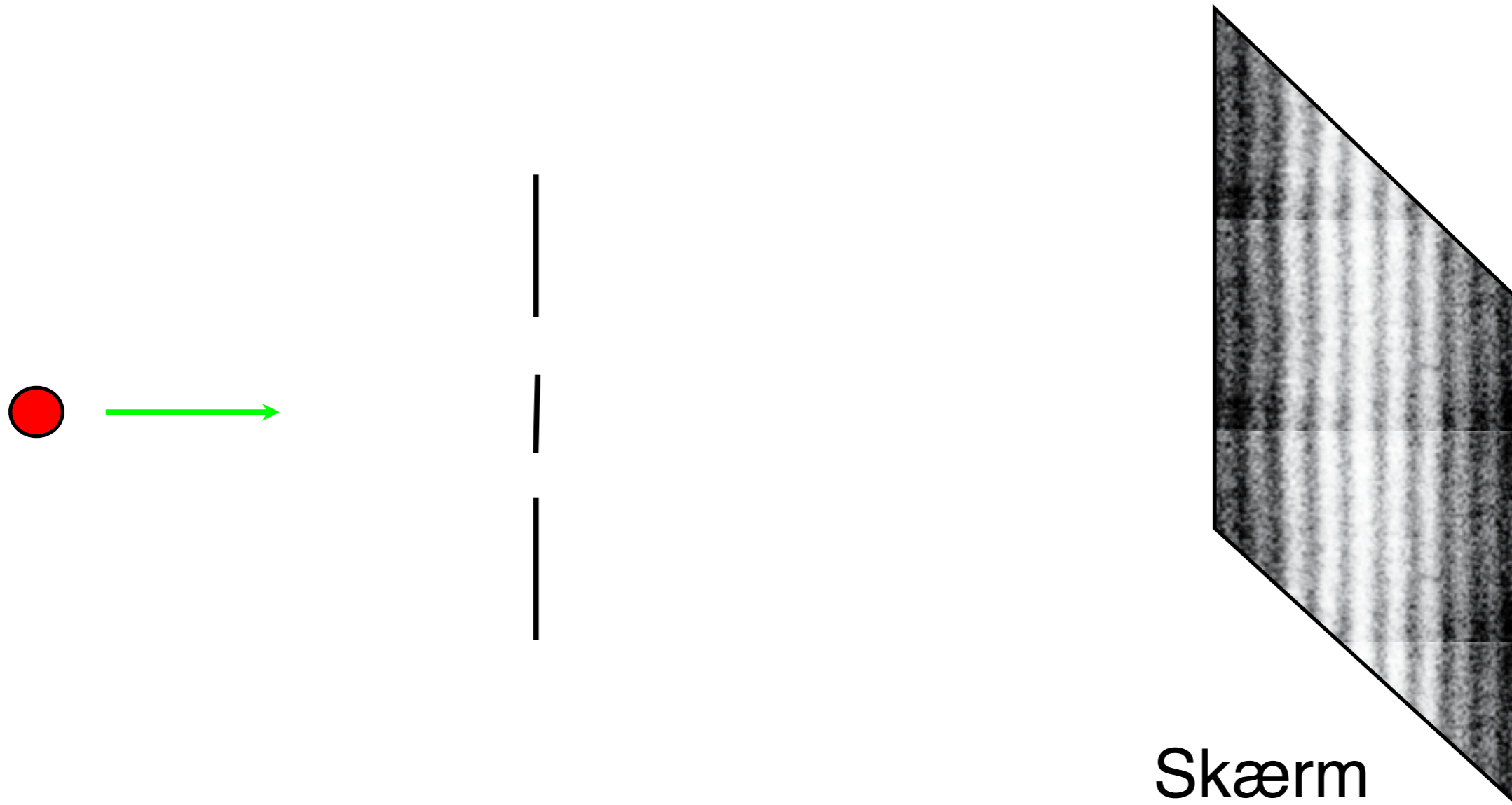


M. Drewsen, Århus

# Partikel bølge dualitet

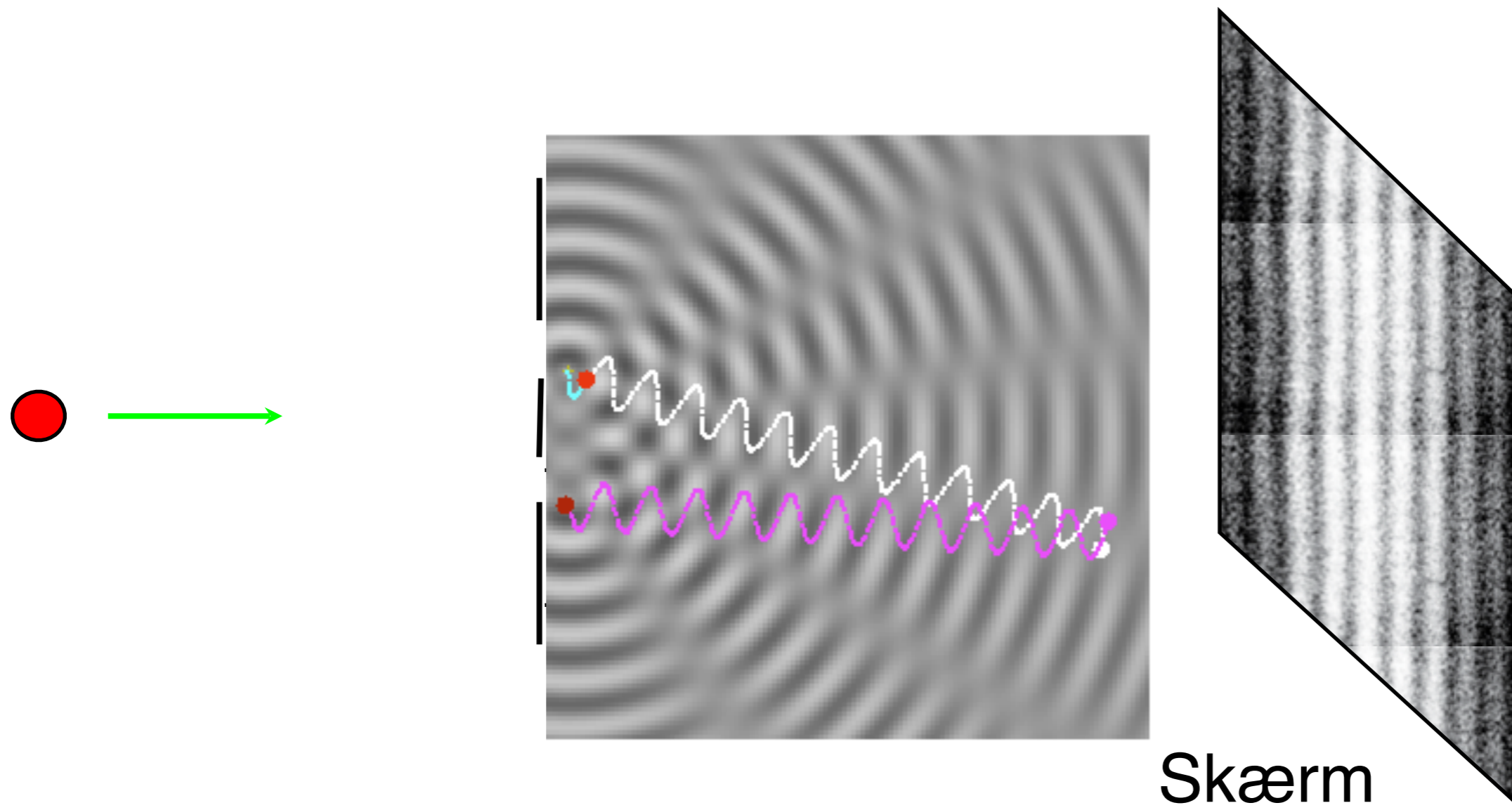
Kvantemekanik: Alting er både bølger og partikler

Eks: Doppeltspalte forsøg med elektroner



# Interferens

Forklaring: Elektroner er bølger



# Lys er bølger



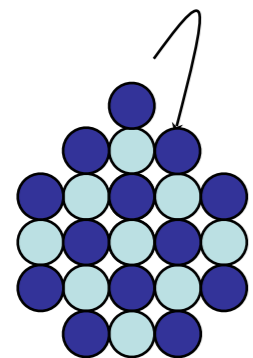
Lys interfererer => Lys er bølger



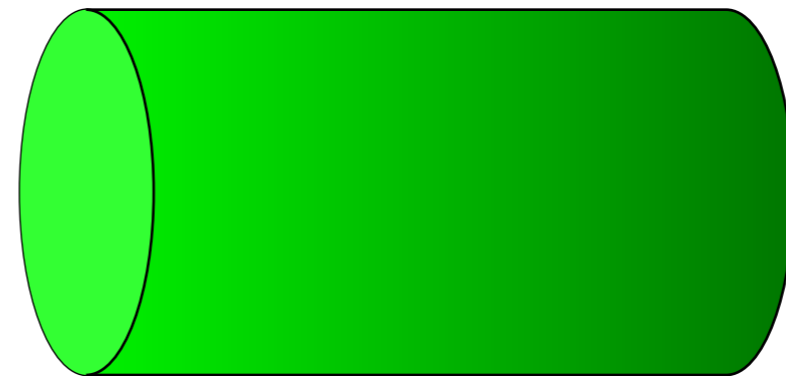
# Lys er partikler

Radioaktivitet: atomkerne henfalder og udsender stråling

$\gamma$ -stråling er lys med høj frekvens



Geiger tæller

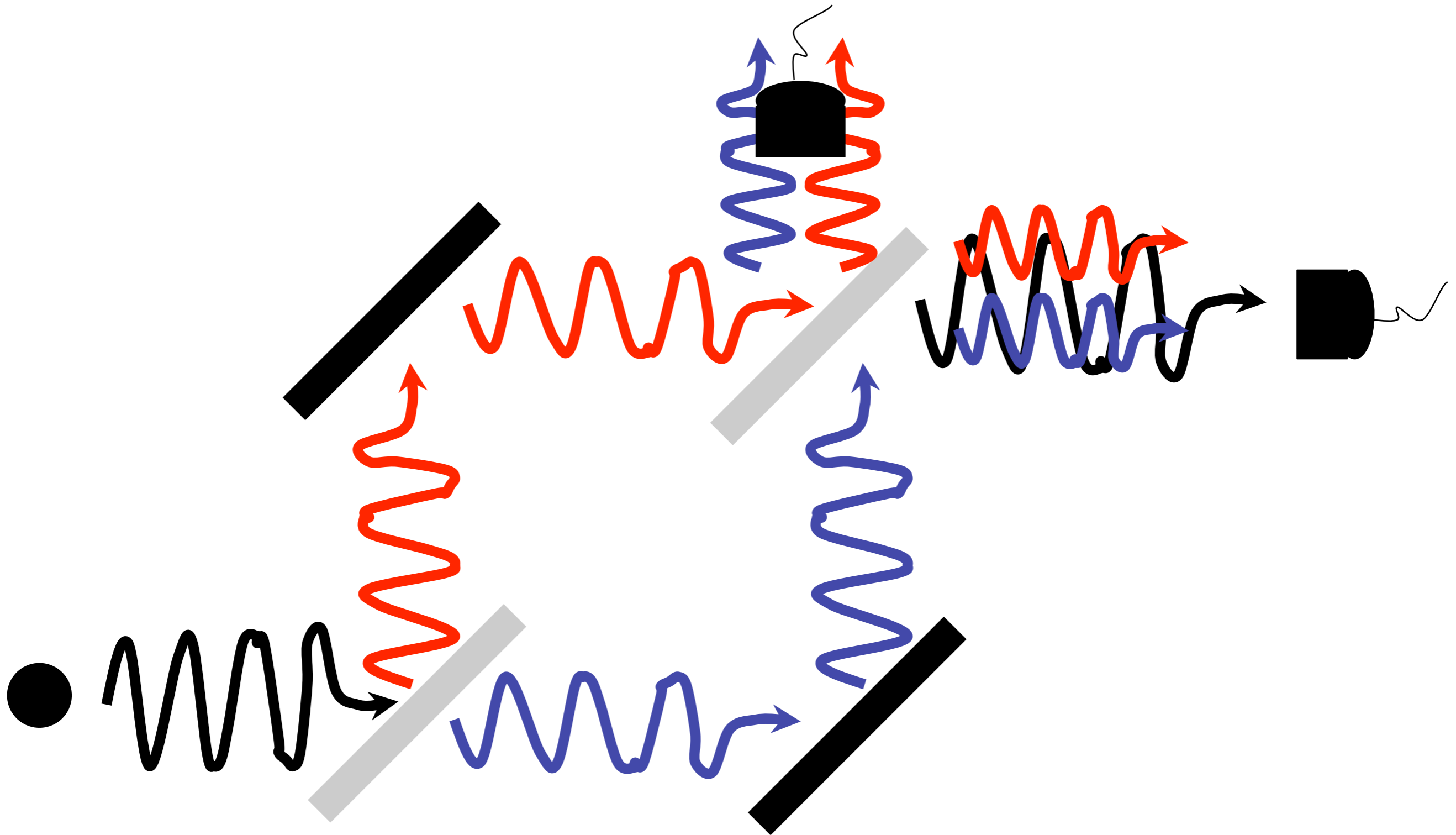


KLIK!

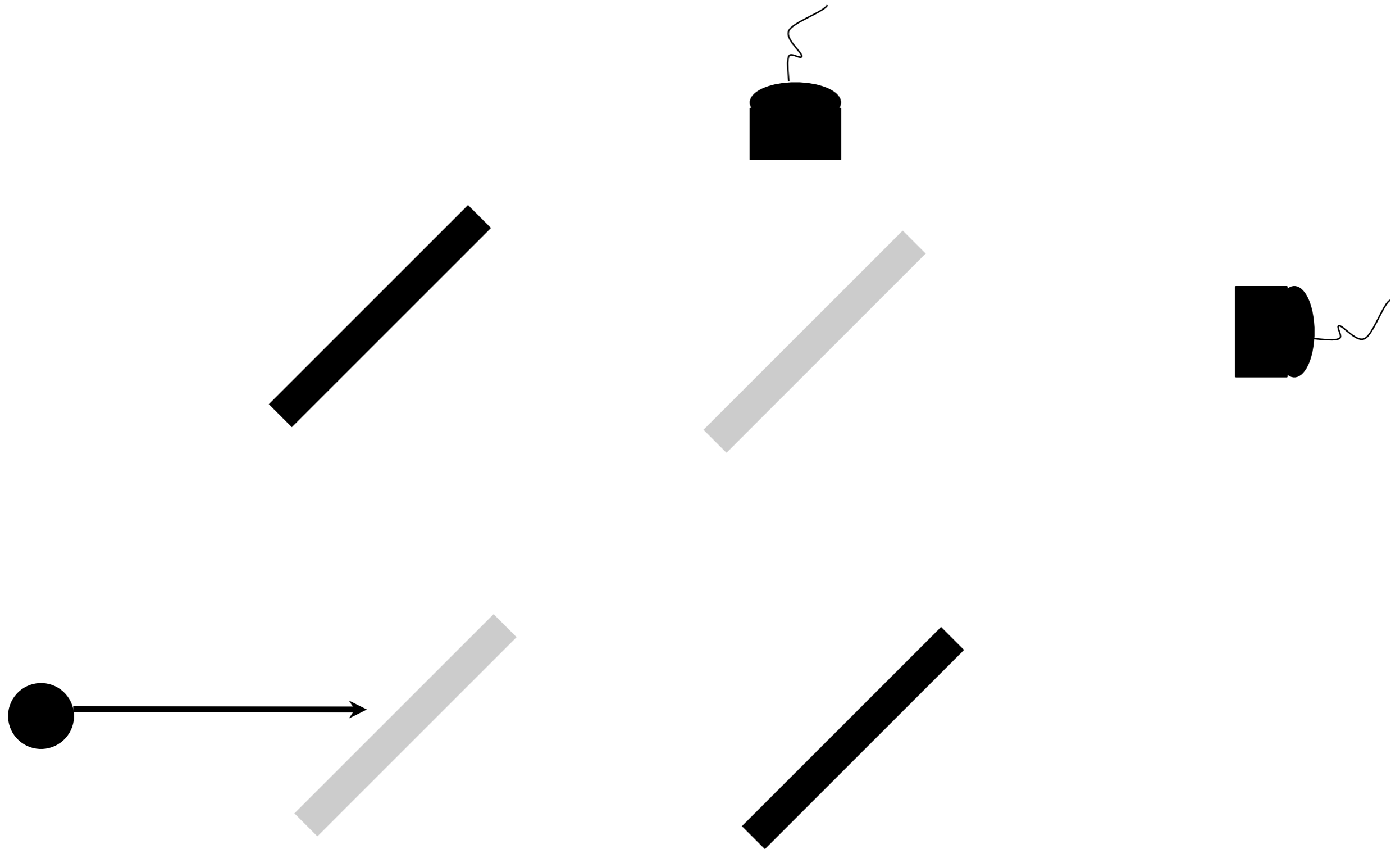
Forklaring (Einstein/Planck): Lys er partikler; FOTONER

Lys er både bølger og partikler  $E=h\nu$

# Mach-Zender Interferometer

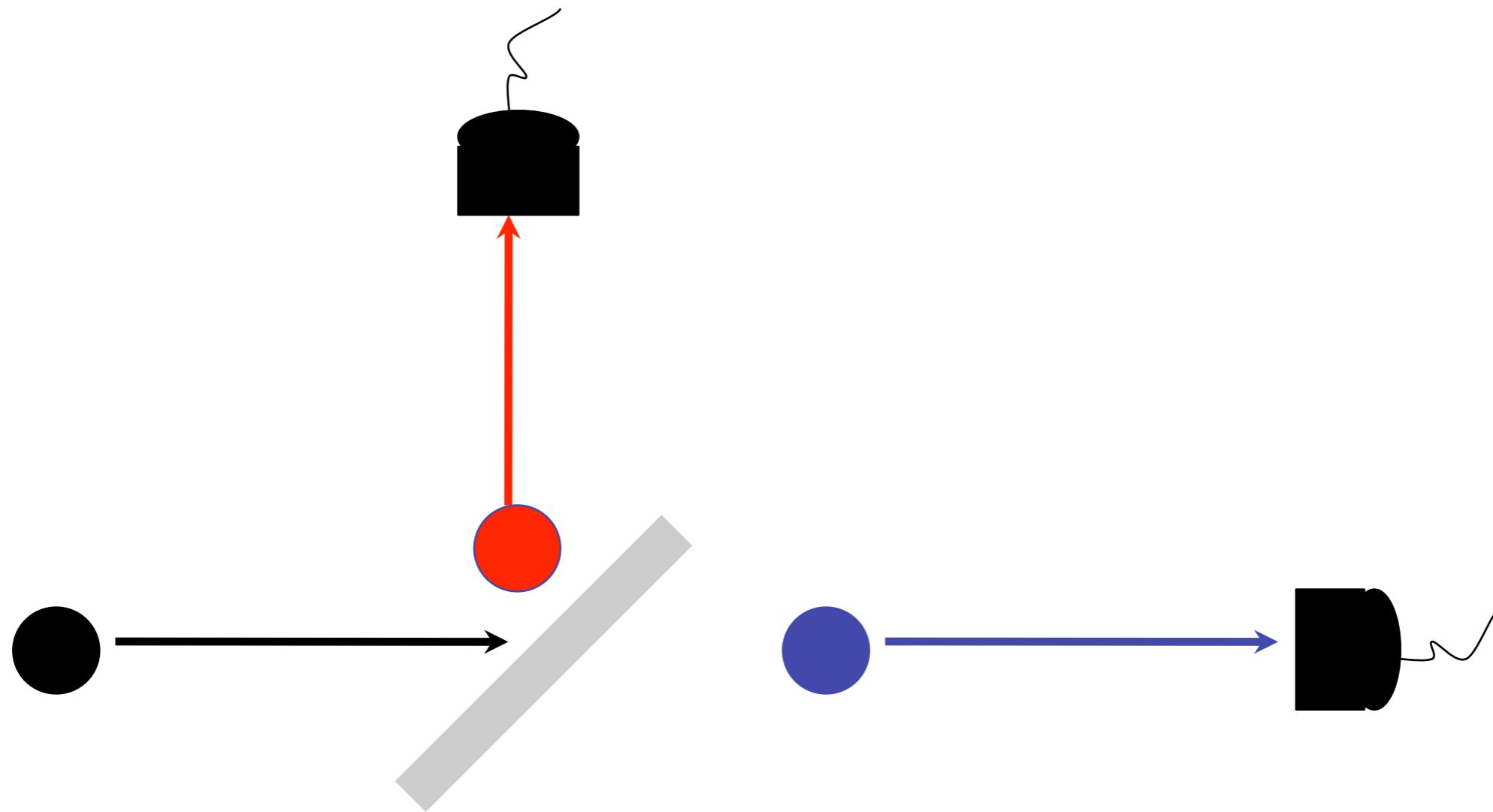


# Mach-Zender Interferometer



# Beam splitter

En foton mod en beam splitter

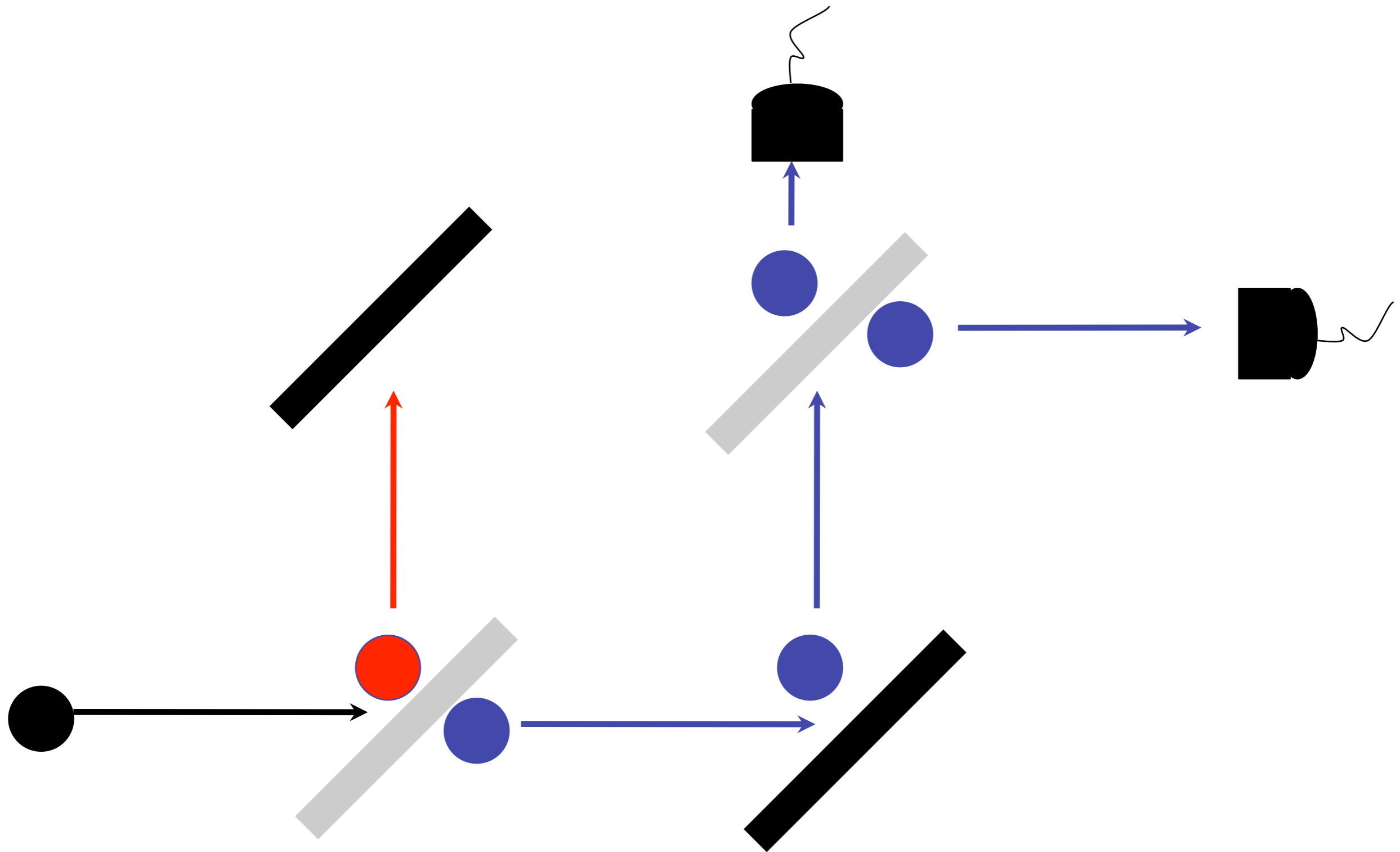


1/2 foton eksisterer ikke

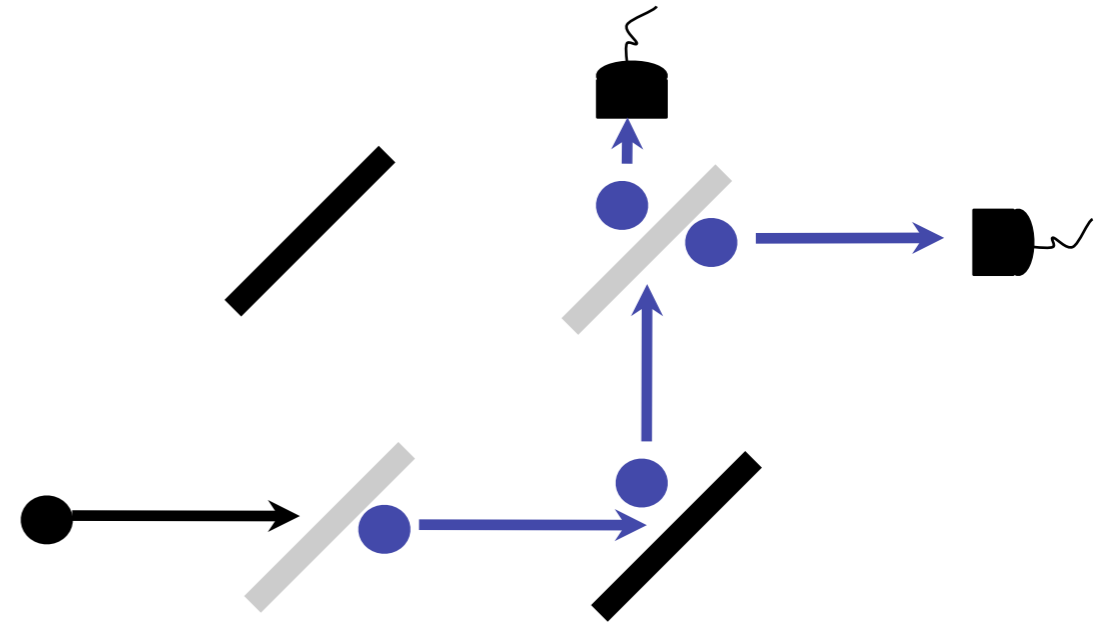
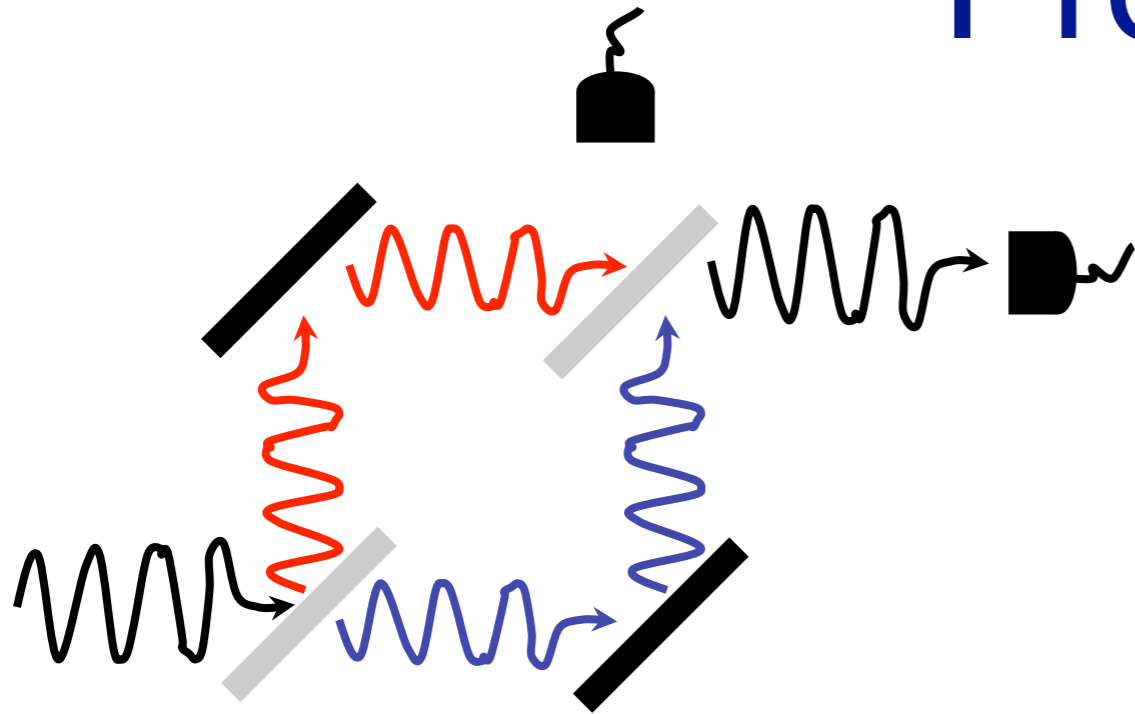
Foton går enten den ene eller den anden vej

Detektorerne klikker tilfældigt

# Mach-Zender Interferometer



# Problem



Klikker begge den øverste detektor nogensinde?

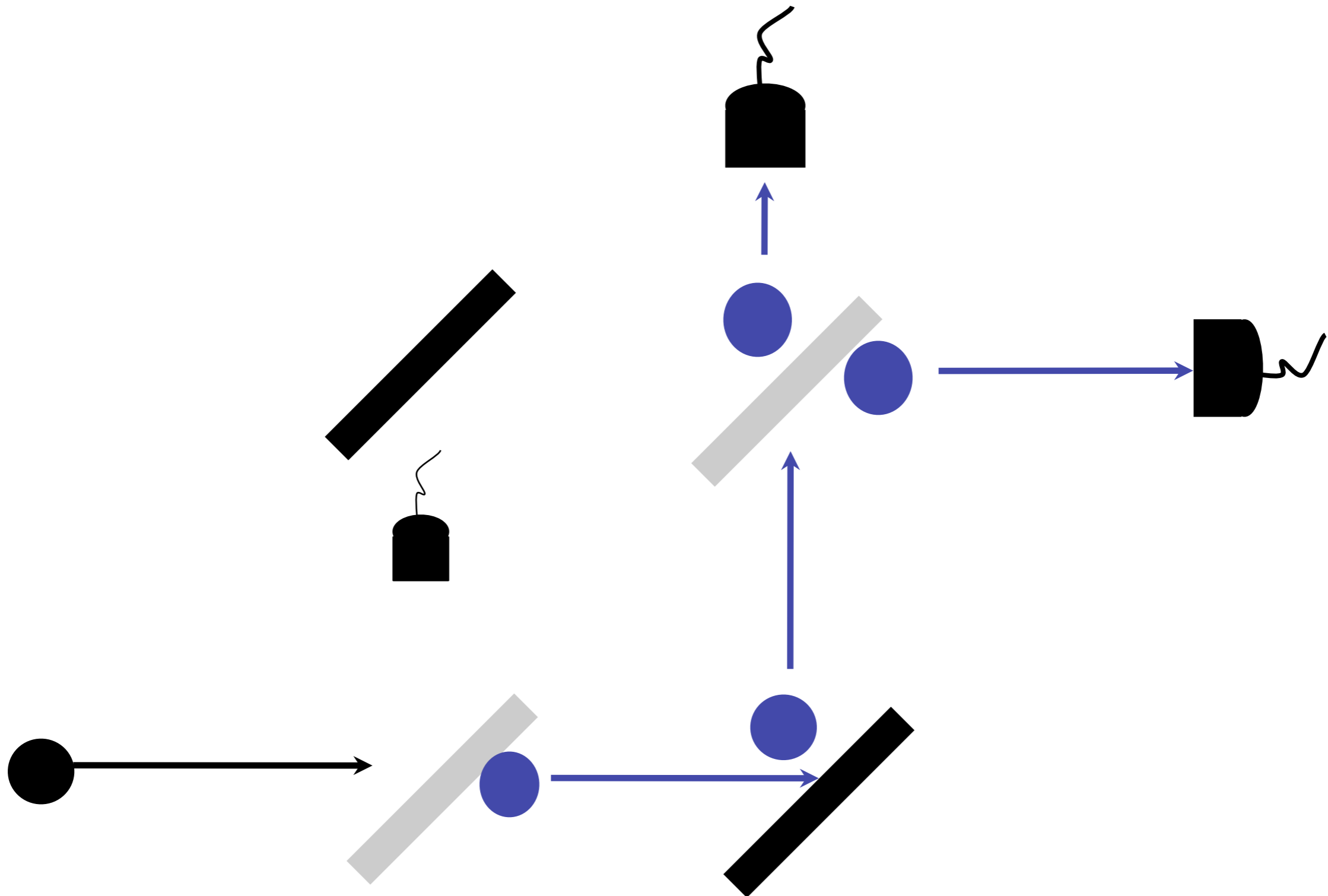
Nej

Hvad er fejlen?

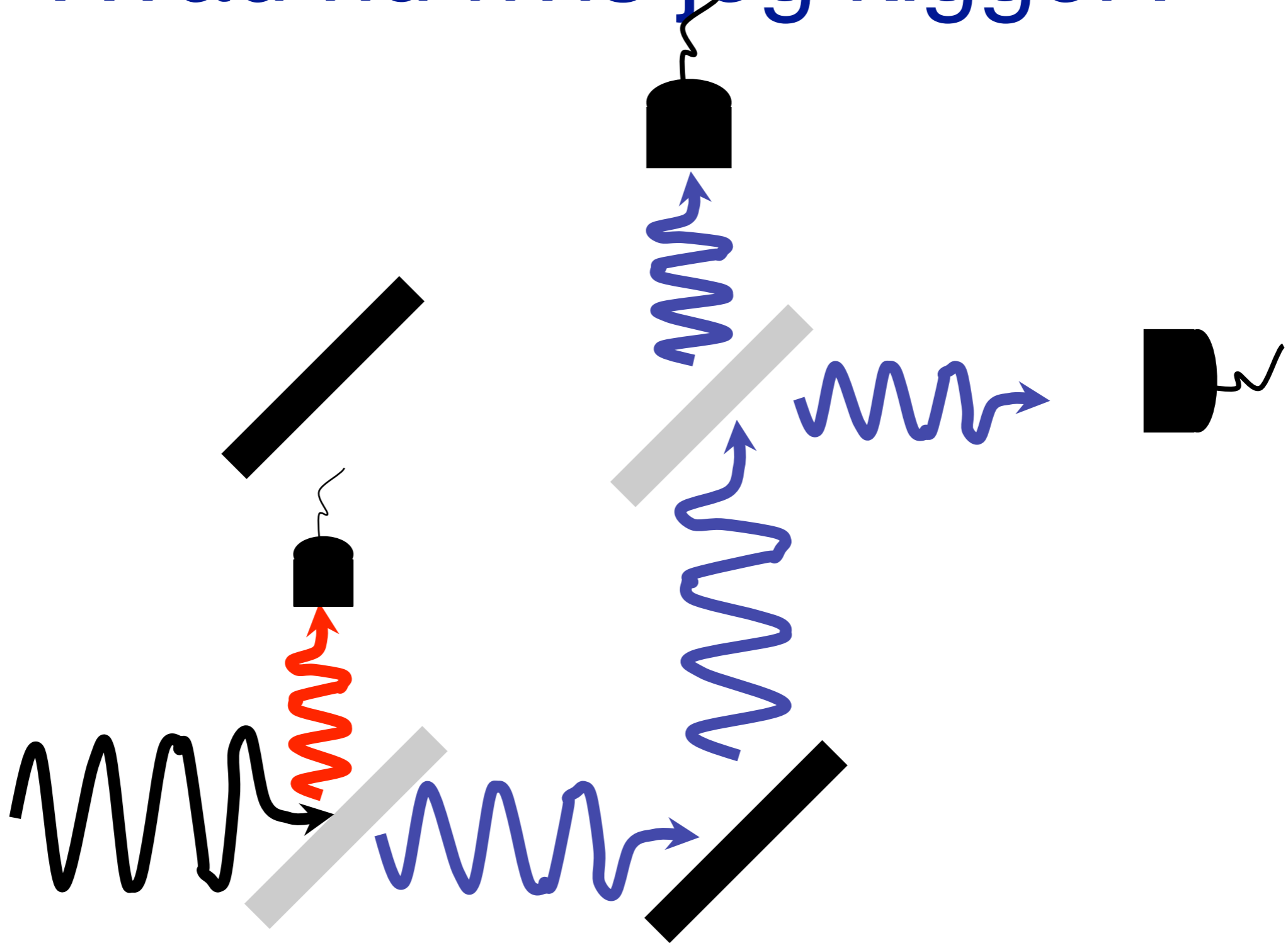
Fotonen går ikke højre eller venstre, den går begge veje.

Fotonen er begge steder på en gang!

# Hvad nu hvis jeg kigger?



# Hvad nu hvis jeg kigger?



Fotonen kan være to steder på en gang, hvis ingen kigger!



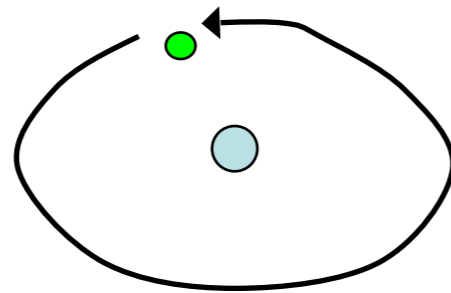
# Kvanteinformation

Kvantemekanik er meget anderledes end alt vi er vant til

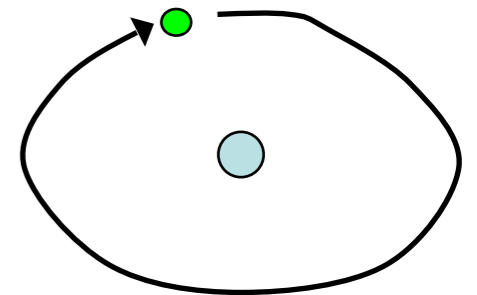
Kvantemekanisk logik er anderledes

Kvantebit (qubit): gem en bit i et atom

0: elektron kører  
venstre om



1: elektron kører  
højre om



Nyt: elektron kan køre begge veje samtidig => nye muligheder

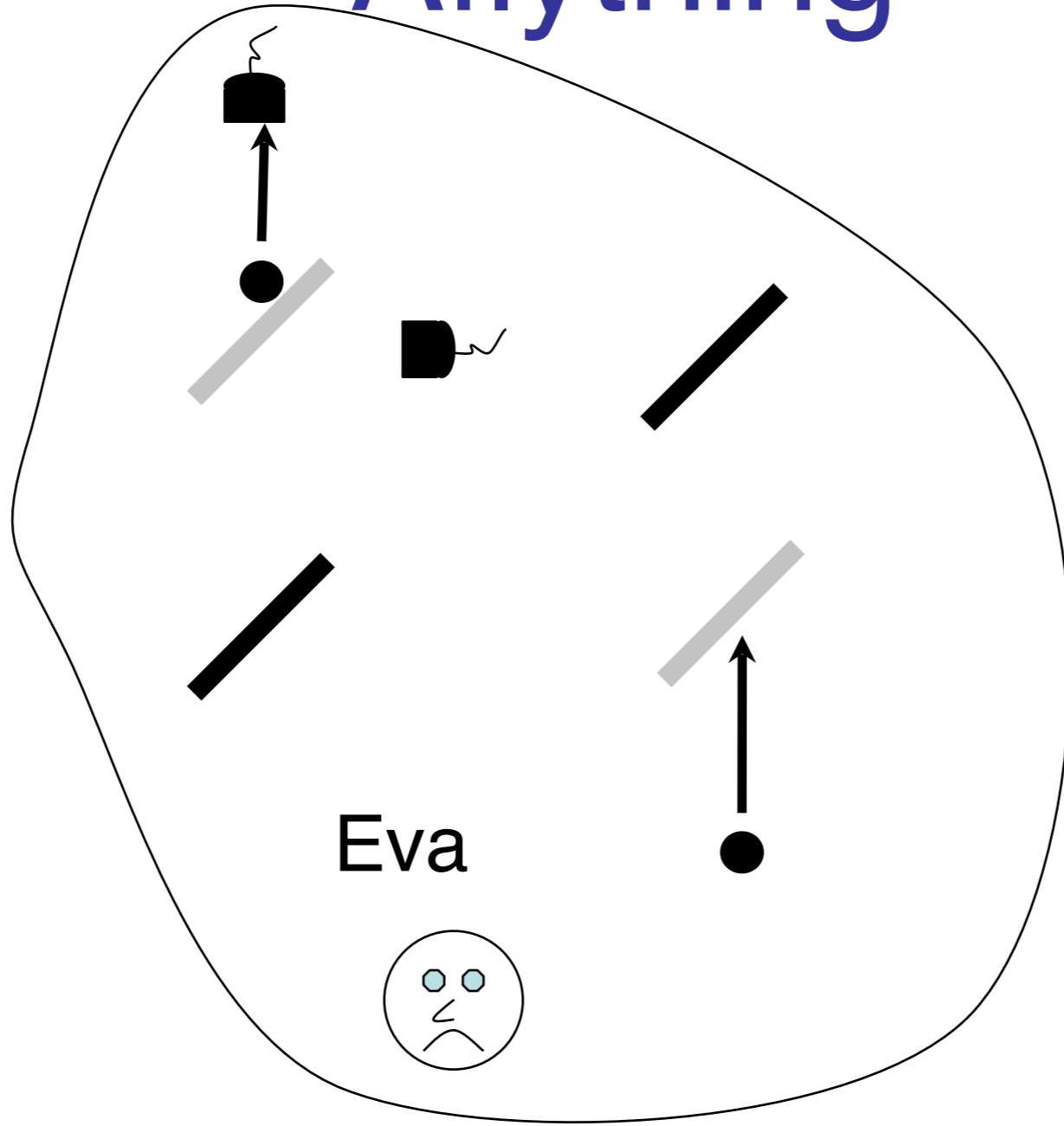
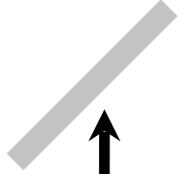
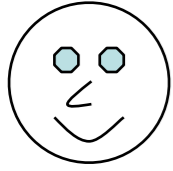
Gælder kun så længe “ingen måler på systemet”

Ingen information må gå tabt => kræver reversible beregninger

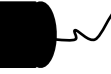
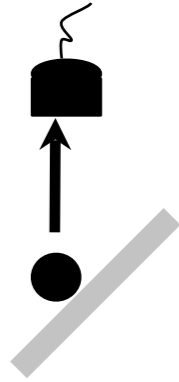
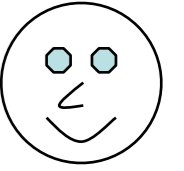


# Aflytning

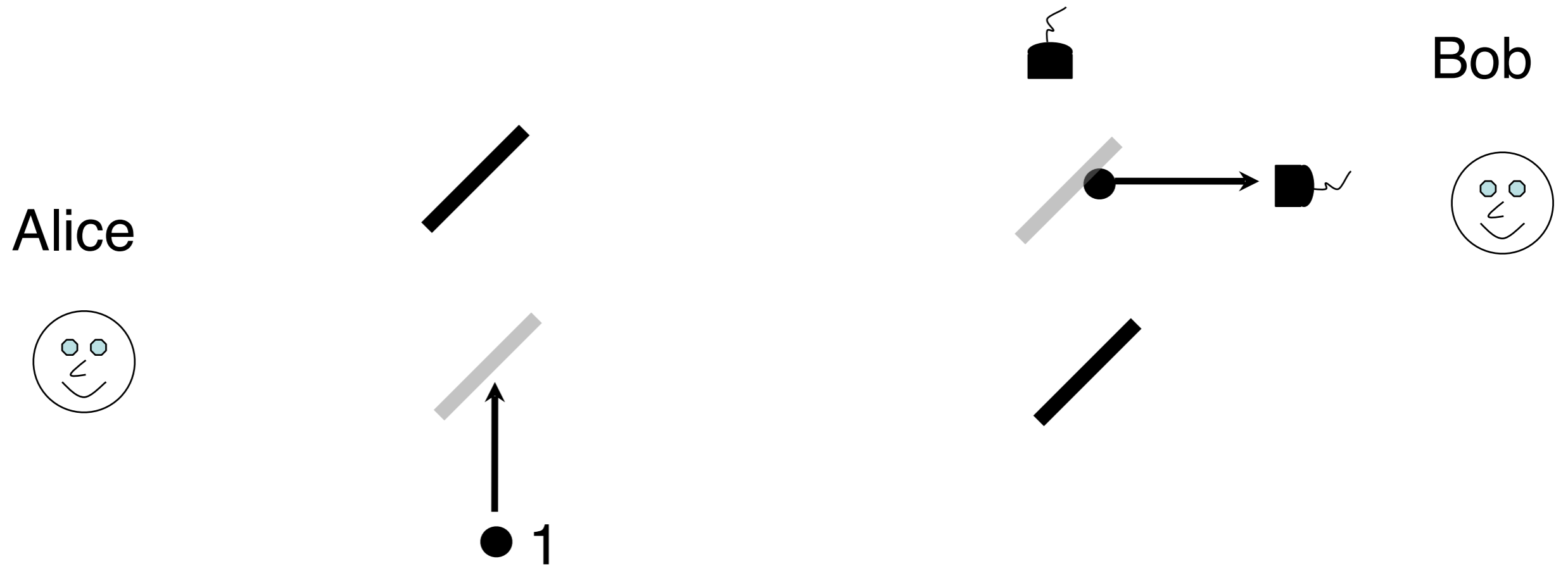
Alice



Bob



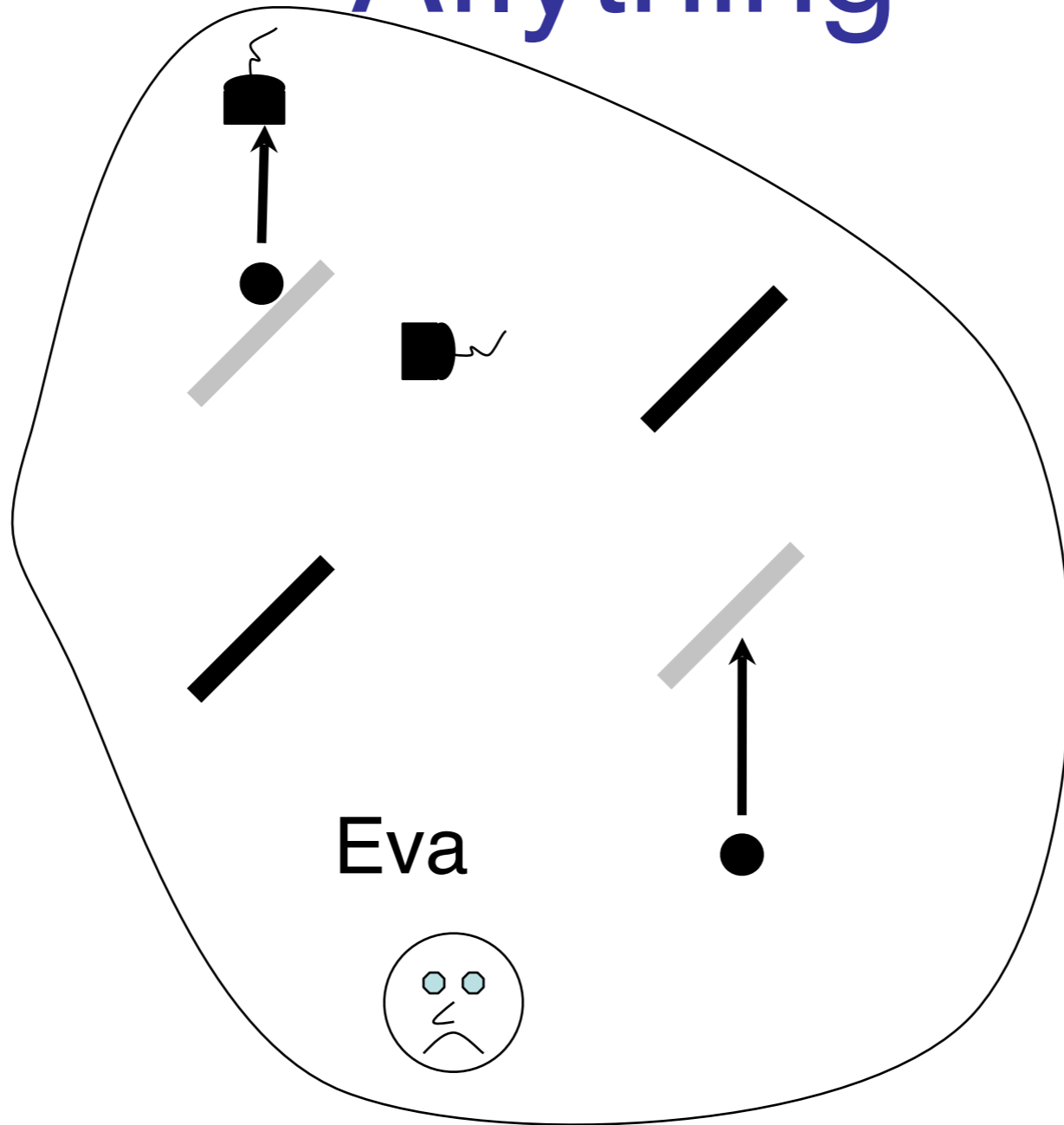
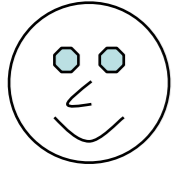
# Protocol: BB84



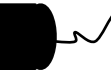
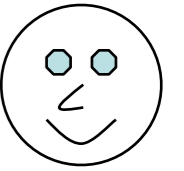
Fjern beam splitter

# Aflytning

Alice



Bob



Eva



Eva ved ikke at beam splitteren er fjernet => hun bliver afsløret

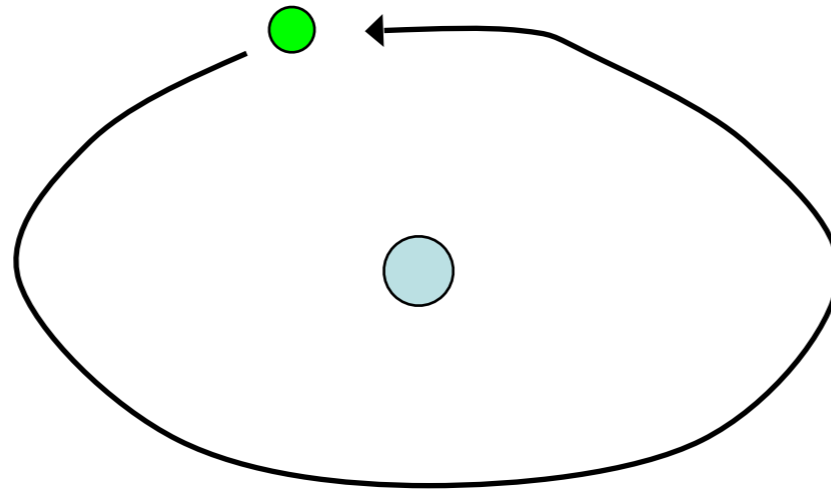
100% sikker kryptering

# Kvantecomputere

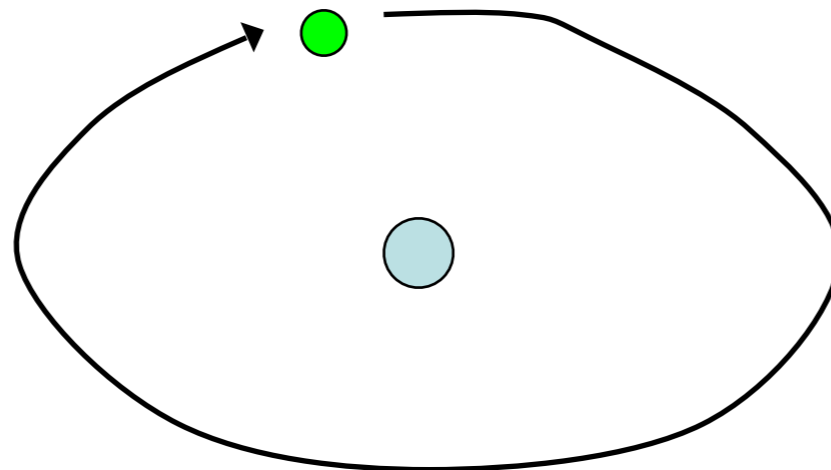
# Kvantebits (Qubits)

En bit gemt i et atom

"0" =

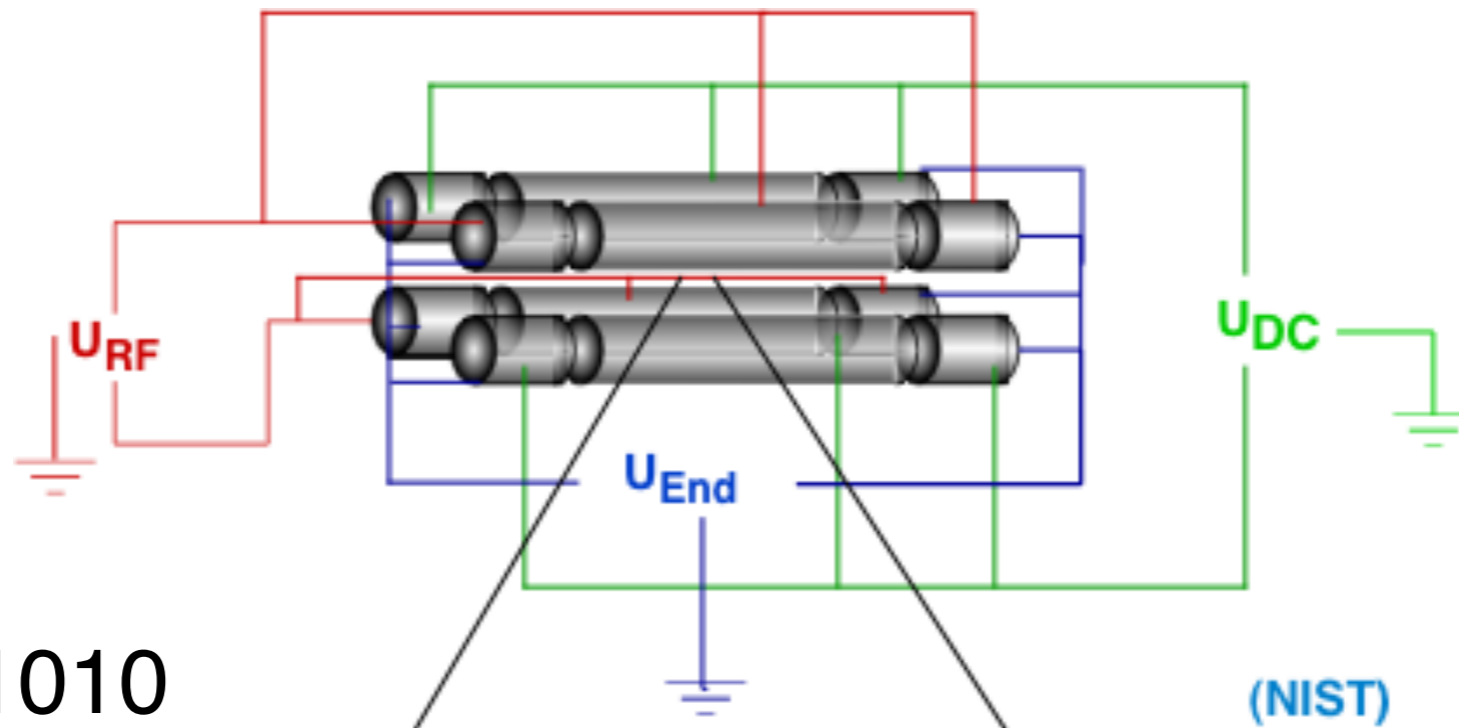


"1" =

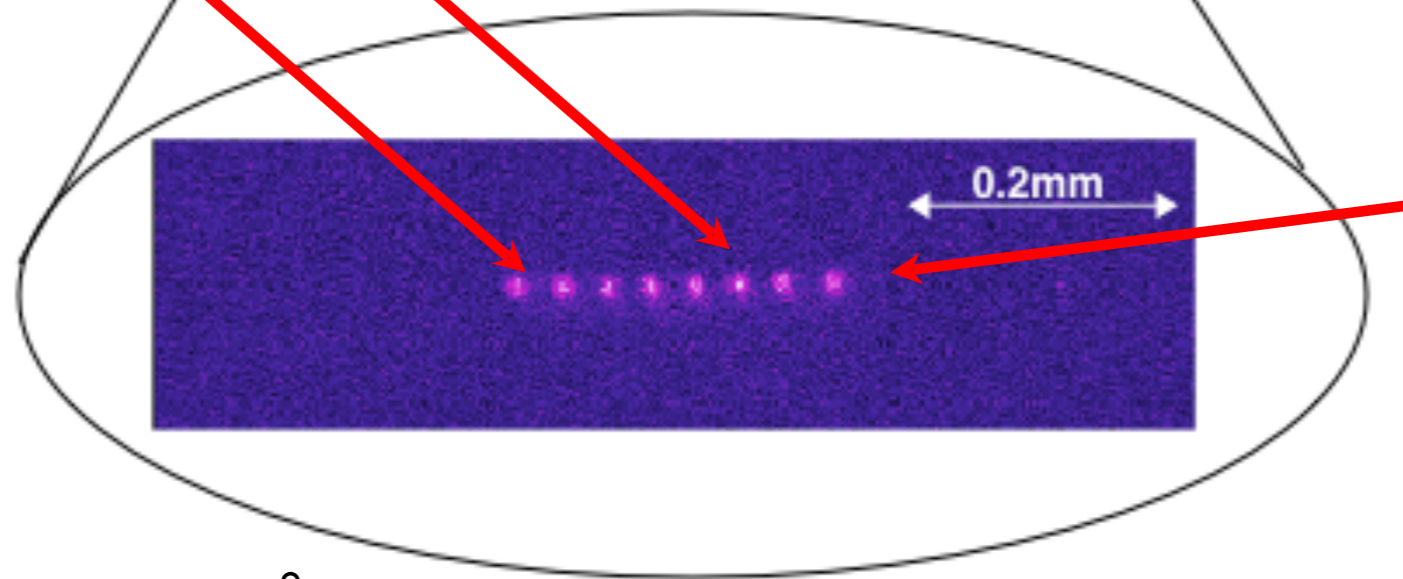


Nyt: elektronen kan køre begge veje samtidig

# Ion fælder



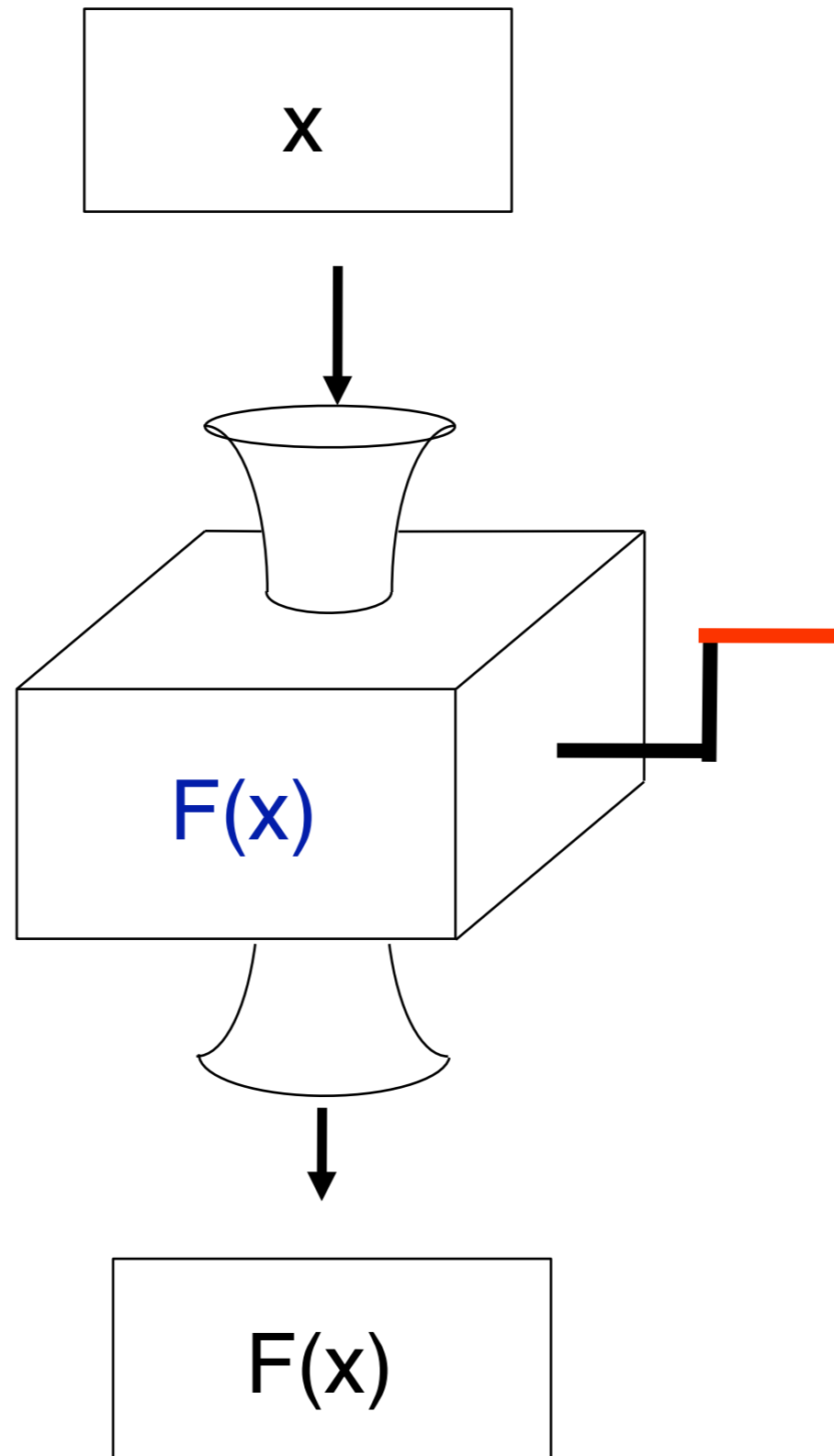
Ex: 01011010



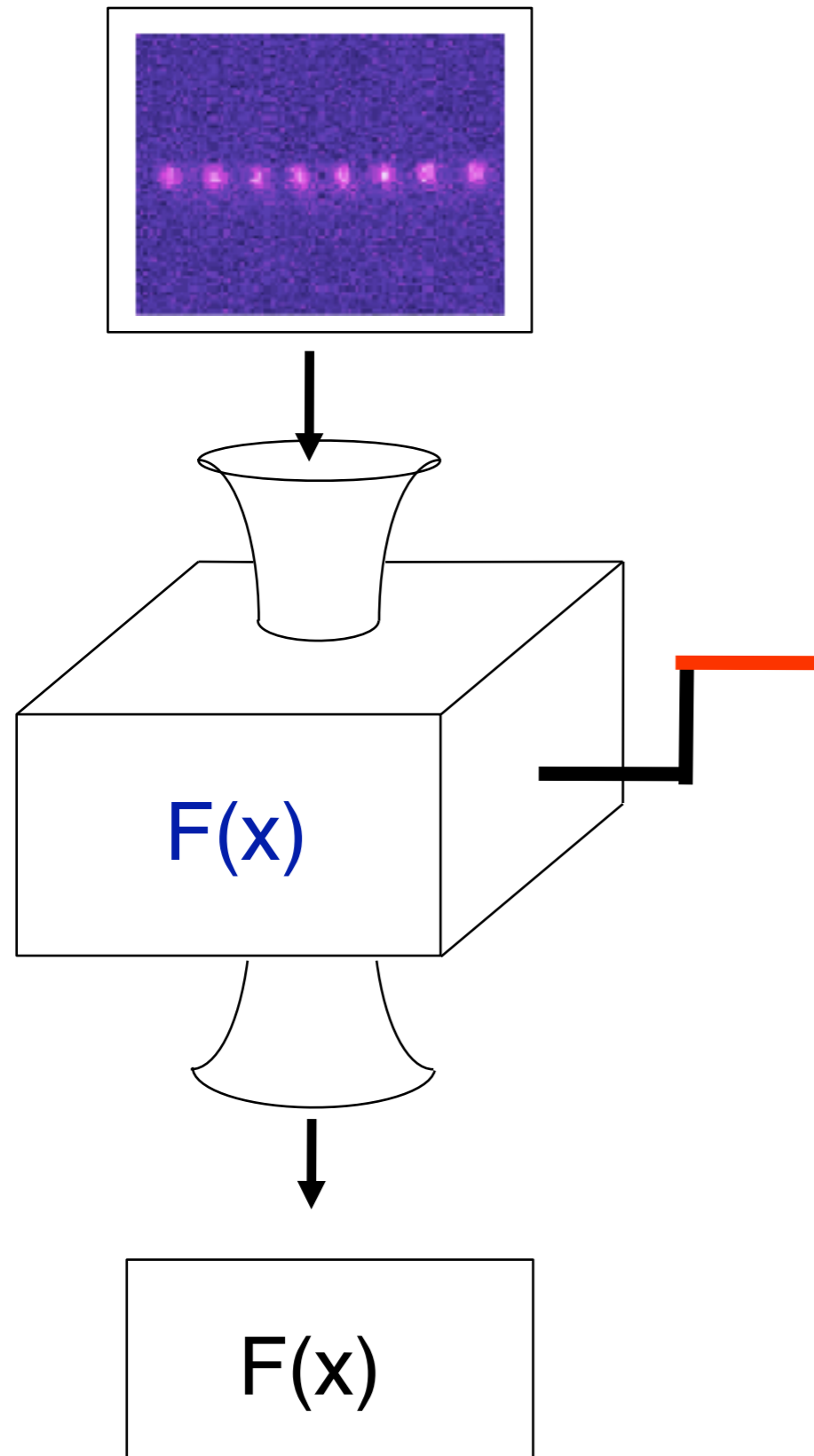
8 Mg<sup>+</sup> ions



# Klassisk computer



# Kvantecomputere



Alle mulige input ind

Funktionen beregnet for alle mulige input ved at dreje håndtaget en gang

Eks: 8 bits  $\Rightarrow$  256 input  
25 bits  $\Rightarrow$  33 millioner input

Problem: Hvis man måler får man et tilfældigt resultat

# Kvantealgoritmer

Lav algoritme som giver et svar

Nye muligheder:

- Lede i en database

$$\sqrt{N} \ll N$$

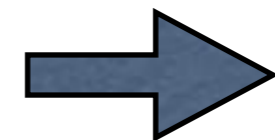
- $Z=p_1 * p_2$  Ex: 421301=??? ~~svært~~

601\*701 let

Let på kvantecomputer

$$(n^3 \ll \exp(n))$$

- Løse fysik opgaver

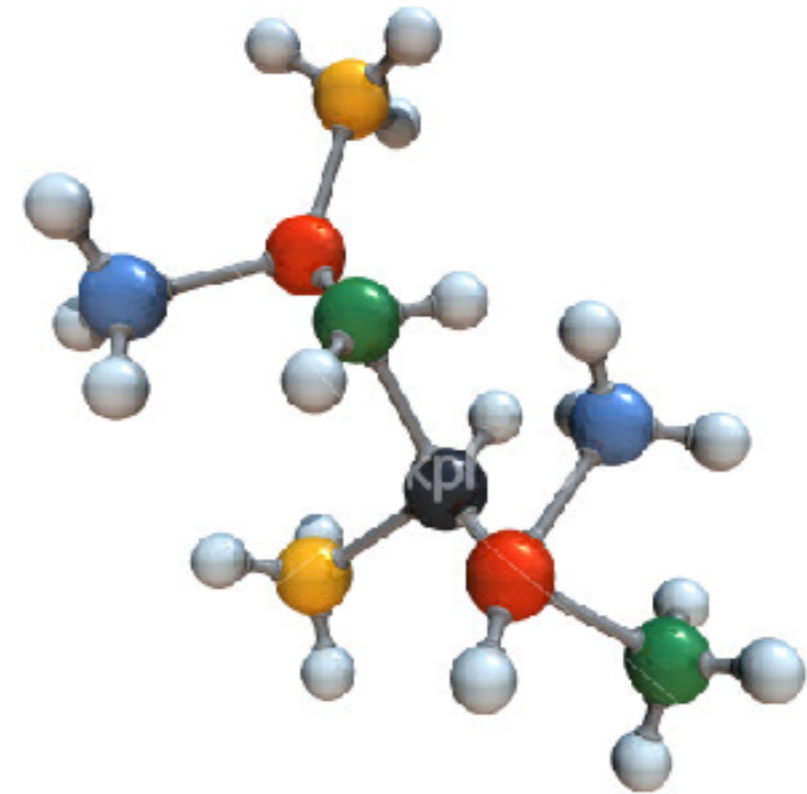


\$\$\$\$\$

# Let eller svært



Ligninger lette at løse



Svært at løse

Nemt på kvantecomputer

# Hvordan bygger man sådan en?

## Atom- og optisk-fysik

- Ionfælder
- Optiskgitre
- Rydbergvekselvirkning
- Atomare ensembler
- Lineær optik

I dag

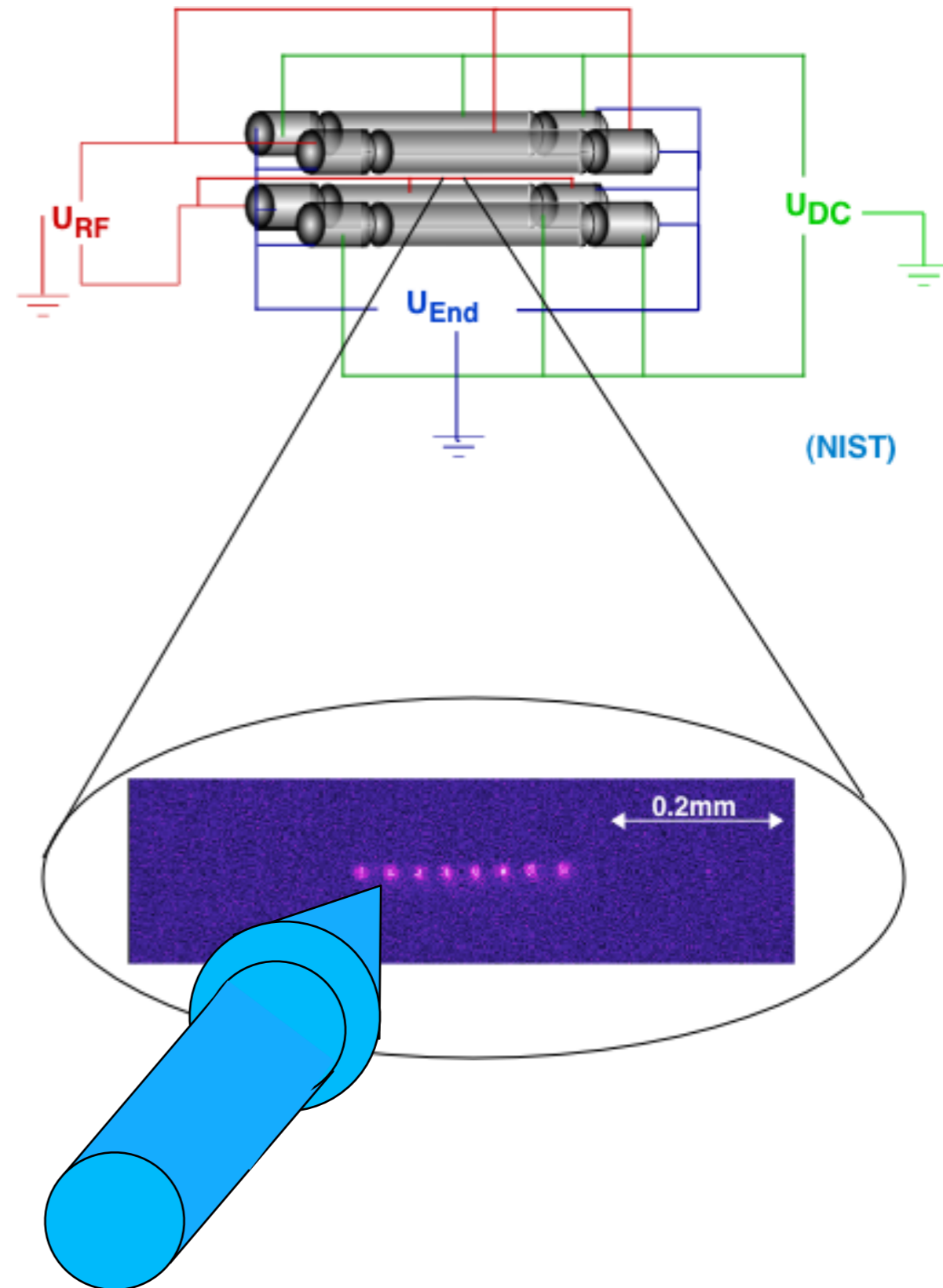
## Faststoffysik

- Superledende systemer
- Elektroner i kvantepunkter
- Donere i Silicium

+ mange flere som jeg har glemt

# Ionfælder

1. Kvante bits ✓
2. Kontrol:  
Fokuser laser på ioner. ✓
3. Aflæs tilstanden
4. Få atomerne til

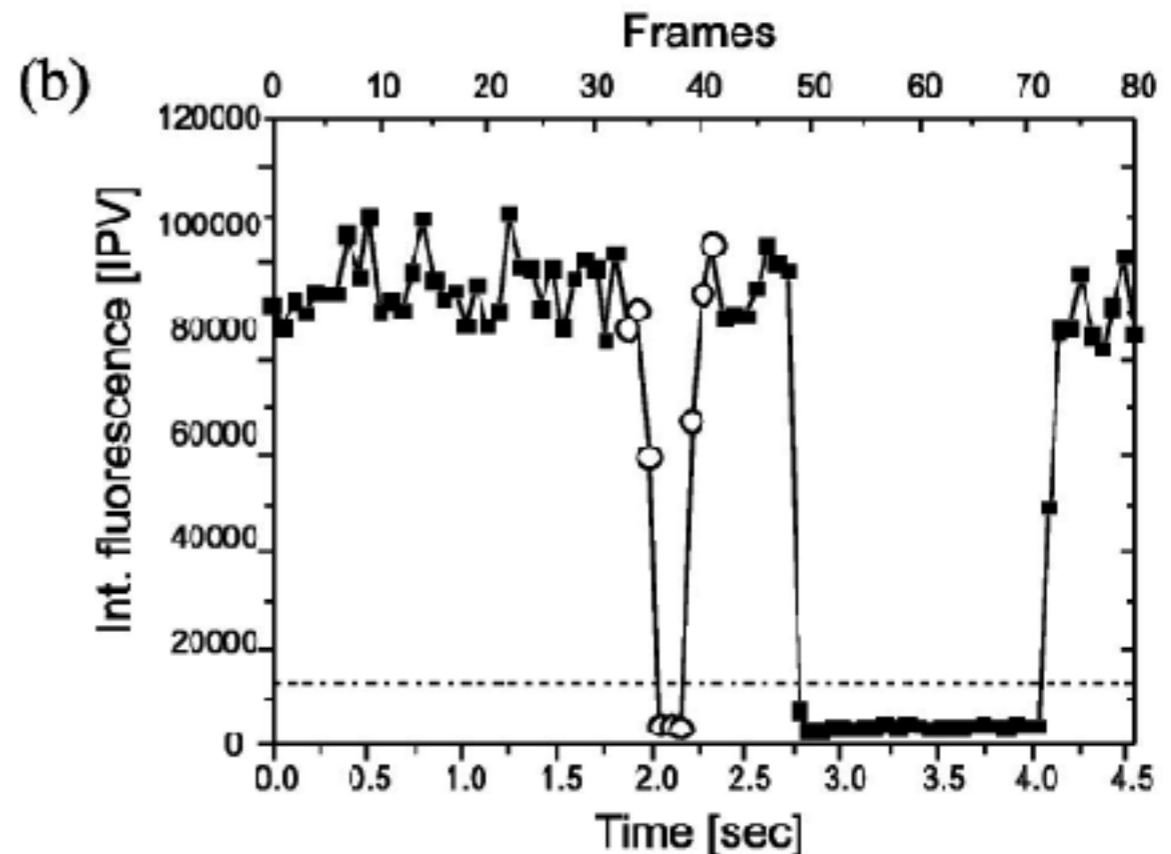
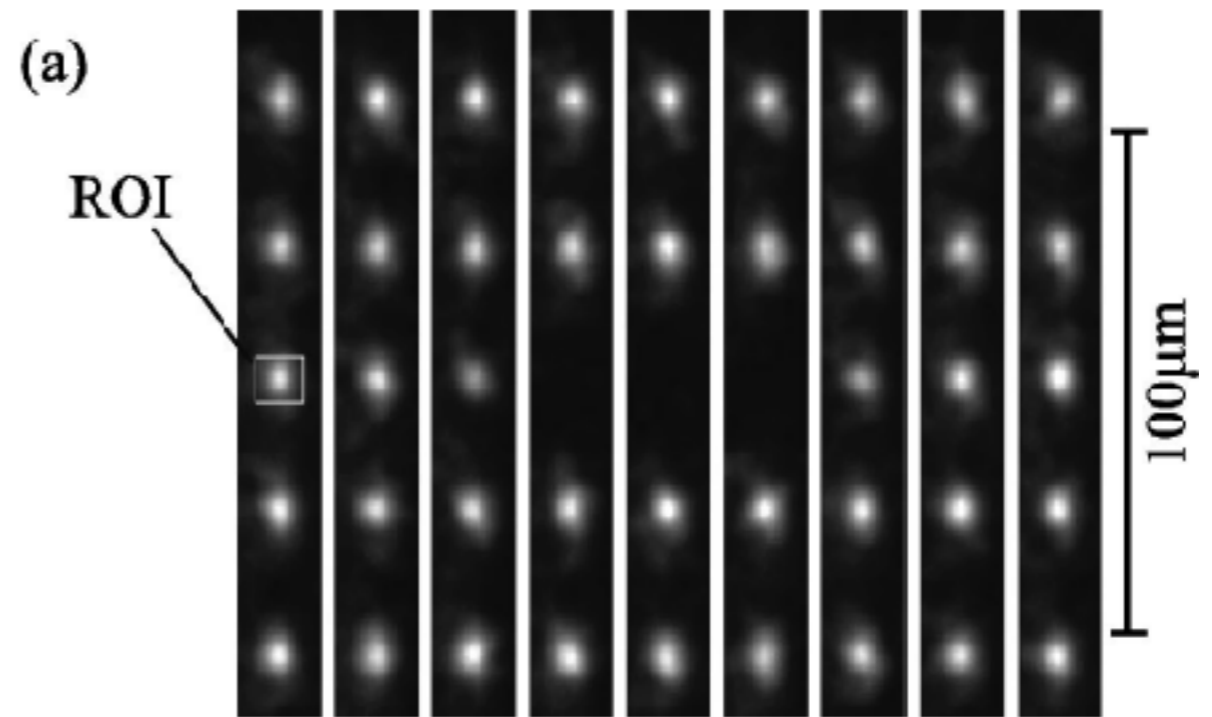


# Udlæsning

Skyd laser på ioner.

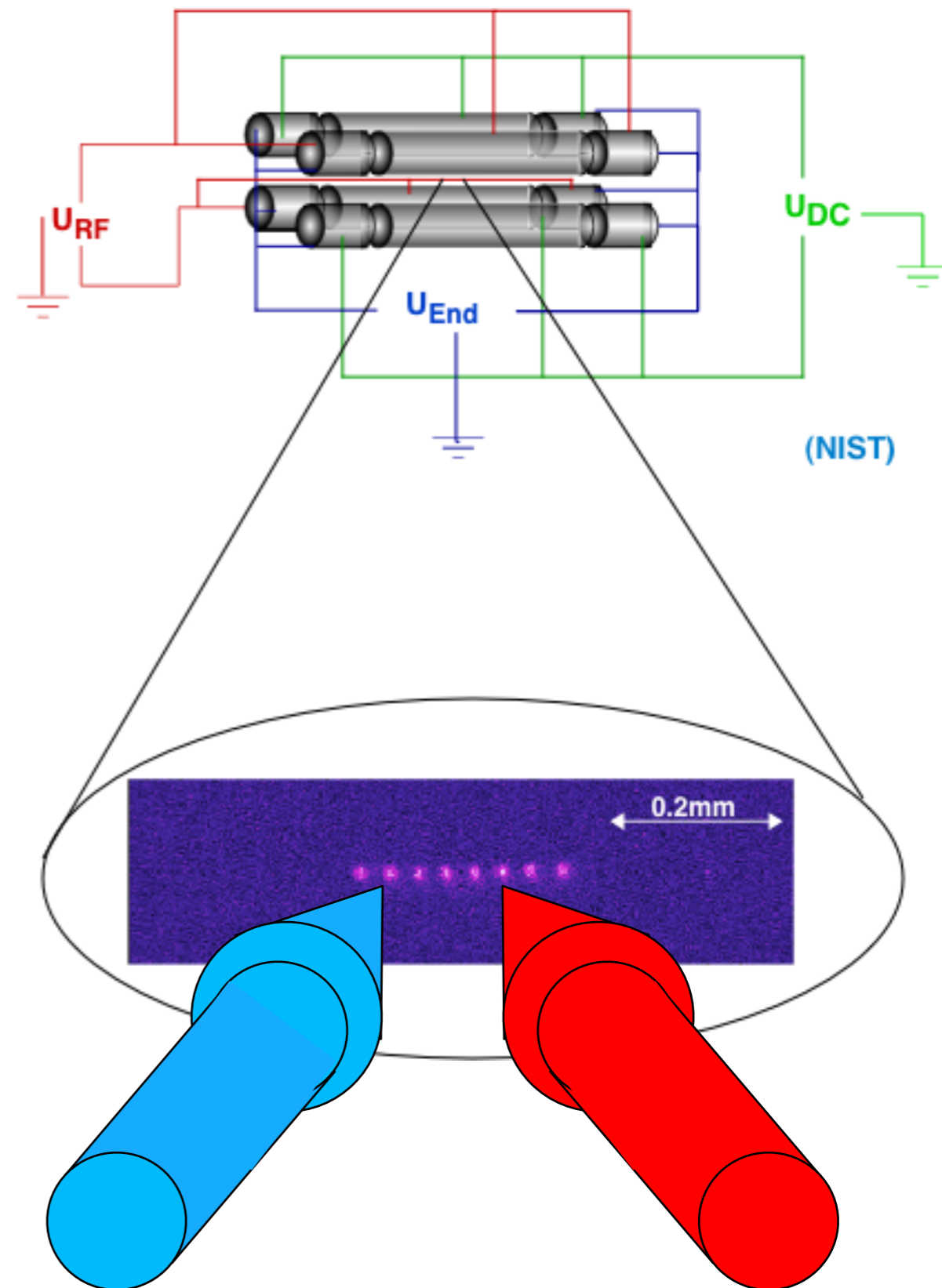
Lyser hvis elektronen løber den ene vej.

Ingen lys, hvis elektronen løber den anden vej.



# Hvordan bygger man sådan en?

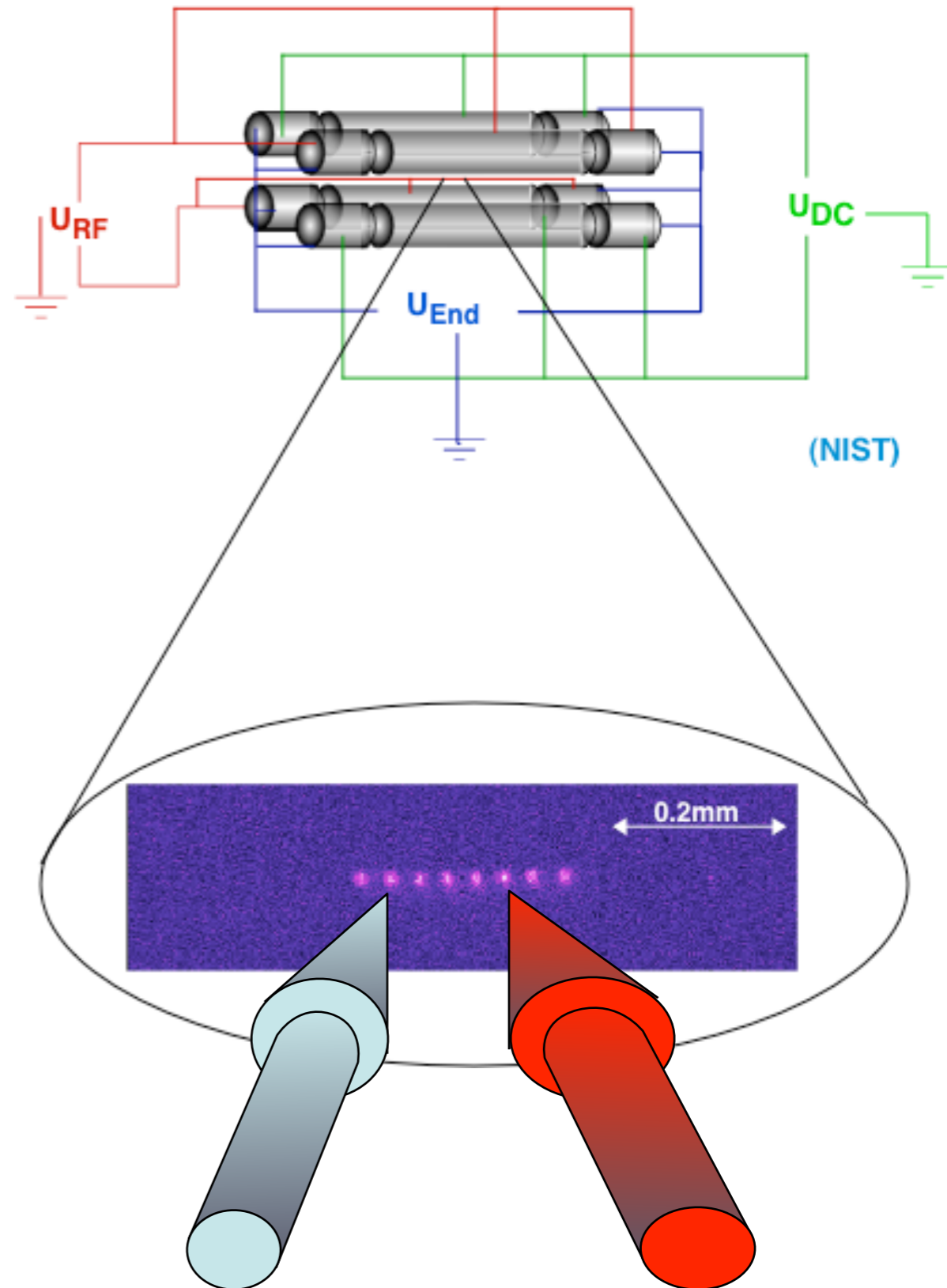
1. Kvante bits ✓
2. Kontrol:  
Fokuser laser på ioner. ✓
3. Aflæs tilstanden ✓
4. SVÆRT, men det går at snakke sammen



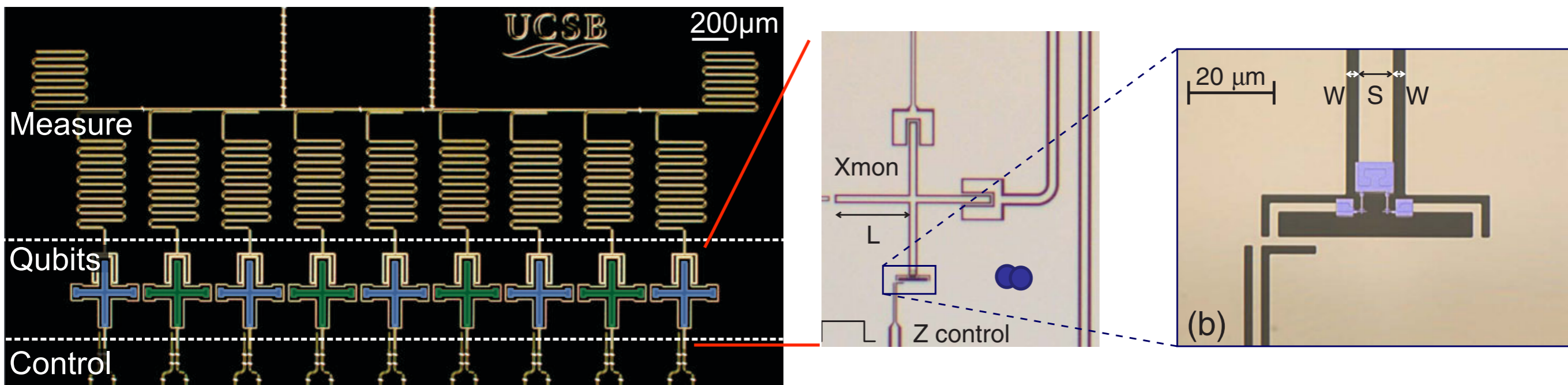


# Status ionfælder

- Operationer virker  $F \approx 99,9\%$
- Algoritmer er blevet lavet kørt for få ioner (7)
- Sammenfiltret 14 ioner
- Svært at skalere
  - Kræver bedre operationer
  - Skal flytte rundt på ioner



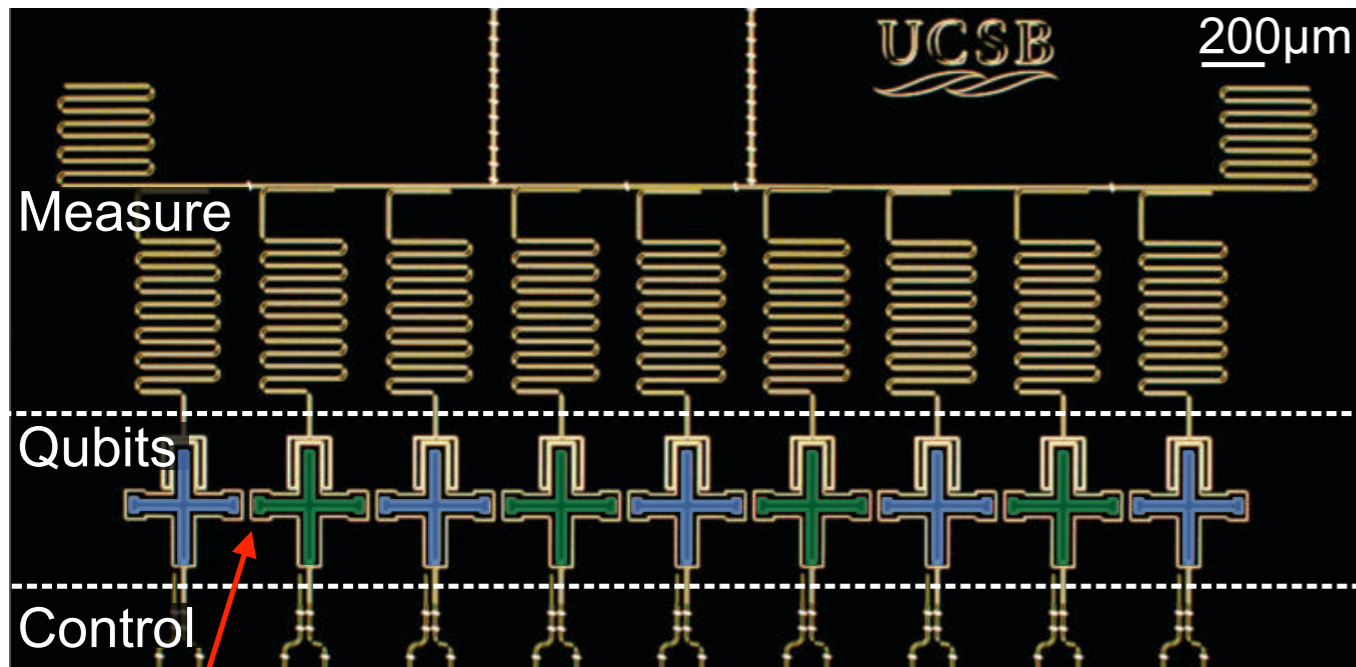
# Superledende systemer



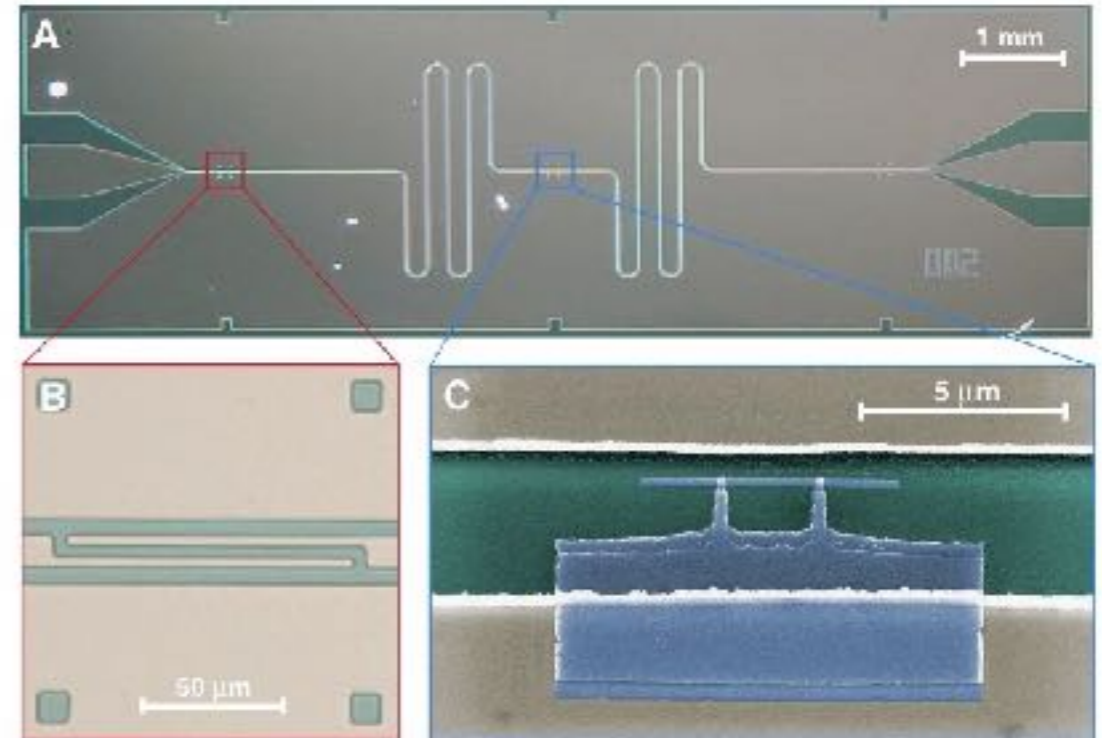
Martinis group UCSB/Google

Qubit: Elektronpar kan hoppe af og på "ø" i midten

# Forbinde qubits



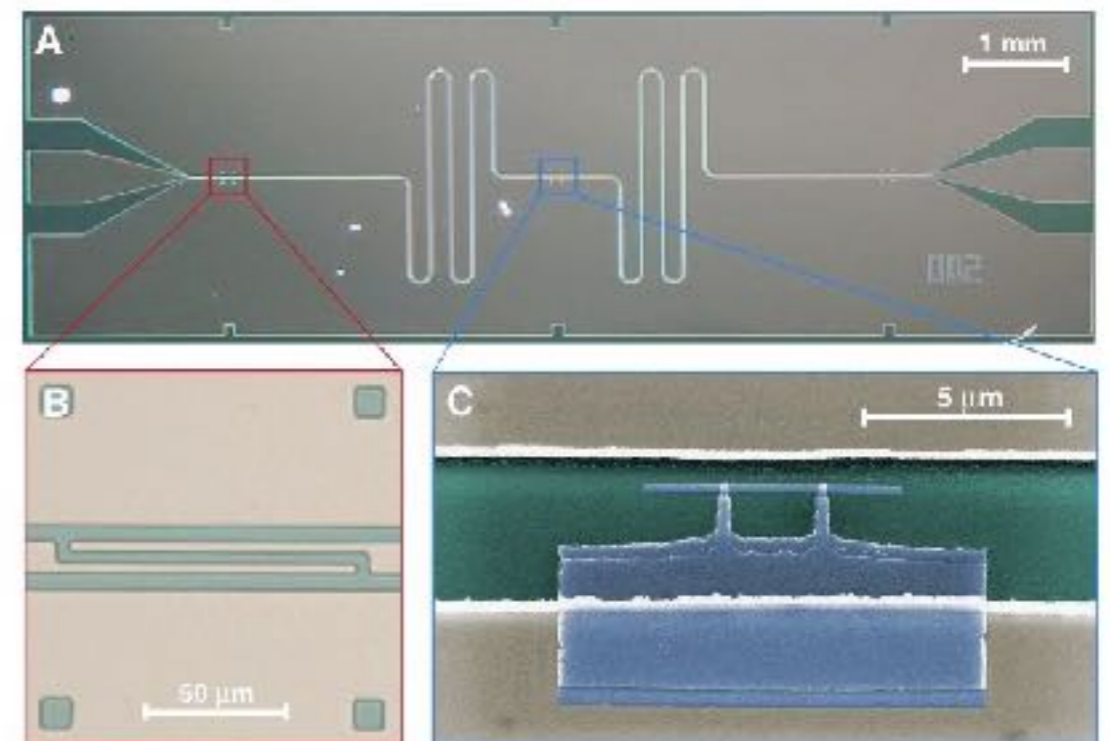
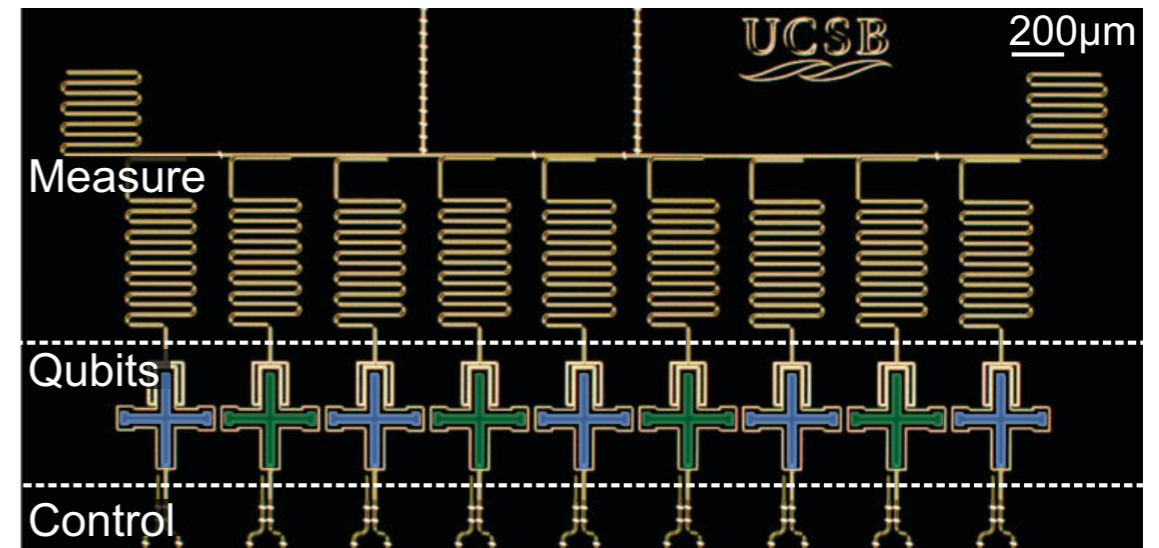
Tæt på hinanden:  
Snakker direkte



Lange afstande:  
sender fotoner til  
hinanden gennem  
ledninger

# Status superledere

- Operationer virker  $F \approx 99\%$
- Kørt algoritmer på få qubits (5/9)
- Sammenlignet med ioner
  - Ionerne har lavet flere algoritmer
  - Ionerne virker “typisk” bedre
  - Superledere har mere “fart på”



# Outsideren



D-wave sælger 1097 qubit kvantecomputer for \$10-15M

Superledende qubits

Kunder: Lockheed Martin, Google/Nasa, NSA?

# Virker den?

Løser én slags problemer: opfyld så mange modstridende krav som muligt => svært problem

Der findes kvantealgoritme

Det er stadig svært

Er det lettere end klassisk?

Hvad sker der hvis ikke alt virker perfekt?

Maskinen giver resultater

Er de bedre end hvad man kan gøre klassisk?

Detaljeret studie: Nej

D-Wave: I kigger på de forkerte problemer, og vores nye er endnu hurtigere....

# Konklusion (2)

- **Kvanteinformation er sjovt**
- Interessante anvendelser
- Kryptografi
- Kvantecomputere: **kvantefysik opgaver**, faktorisering, ....
- **Svært at bygge i praksis**

## Førende teknologier

- Ionfælder **Nobelprisen 2012** NSA?
- Superledende systems **IBM, Google, D-Wave,...**
- Topologiske materialer (NBI) **Microsoft**

Hvad sker der i  
Danmark?



# Danske forskningsgrupper

## Københavns Universitet

Eugene Polzik/Jörg Helge Müller: Eksperimenter med atomare ensembler

Peter Lodahl: Lys, defekter i faste stoffer

Charles Marcus: elektroner i faste stoffer

Mig: Teori for hvordan man bygger

## Århus Universitet

Michael Drewsen: Ion fælder

Klaus Mølmer: Teori for hvordan man bygger

Ivan Damgård:  
Datalogi  
DTU:

Ulrik Lund Andersen: Lys

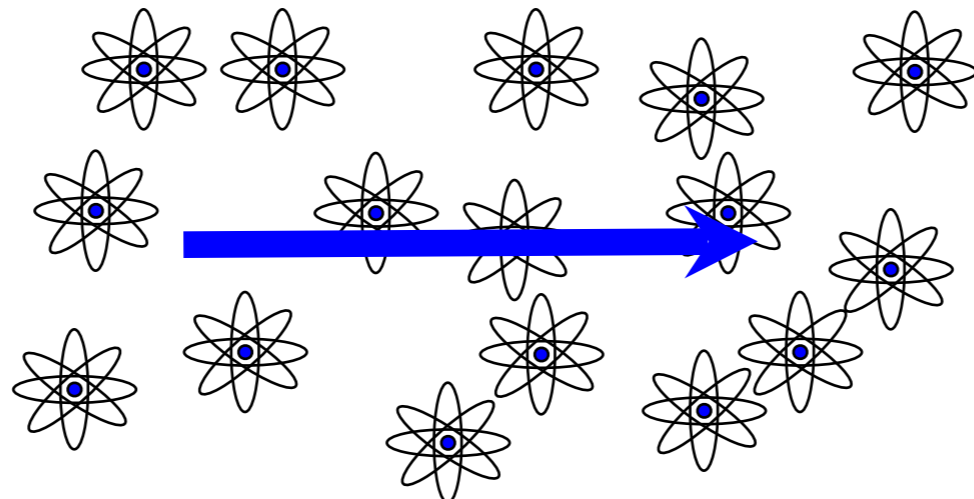
# Atomare ensembler

Kryptografi virker **over korte afstande**

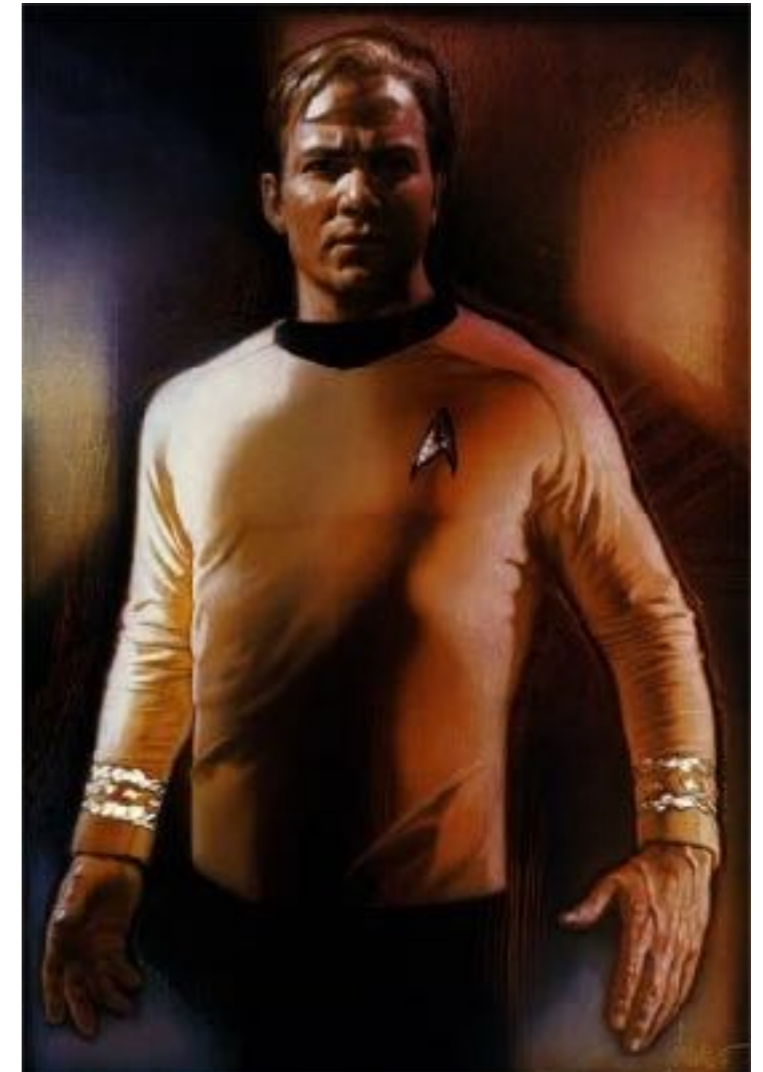
Længere afstande kræver 'interface' mellem lys og atomer

Hvordan fanger man lyset?

**Et atom et småt**    **Brug mange => kan fange lyset**



# Teleportering



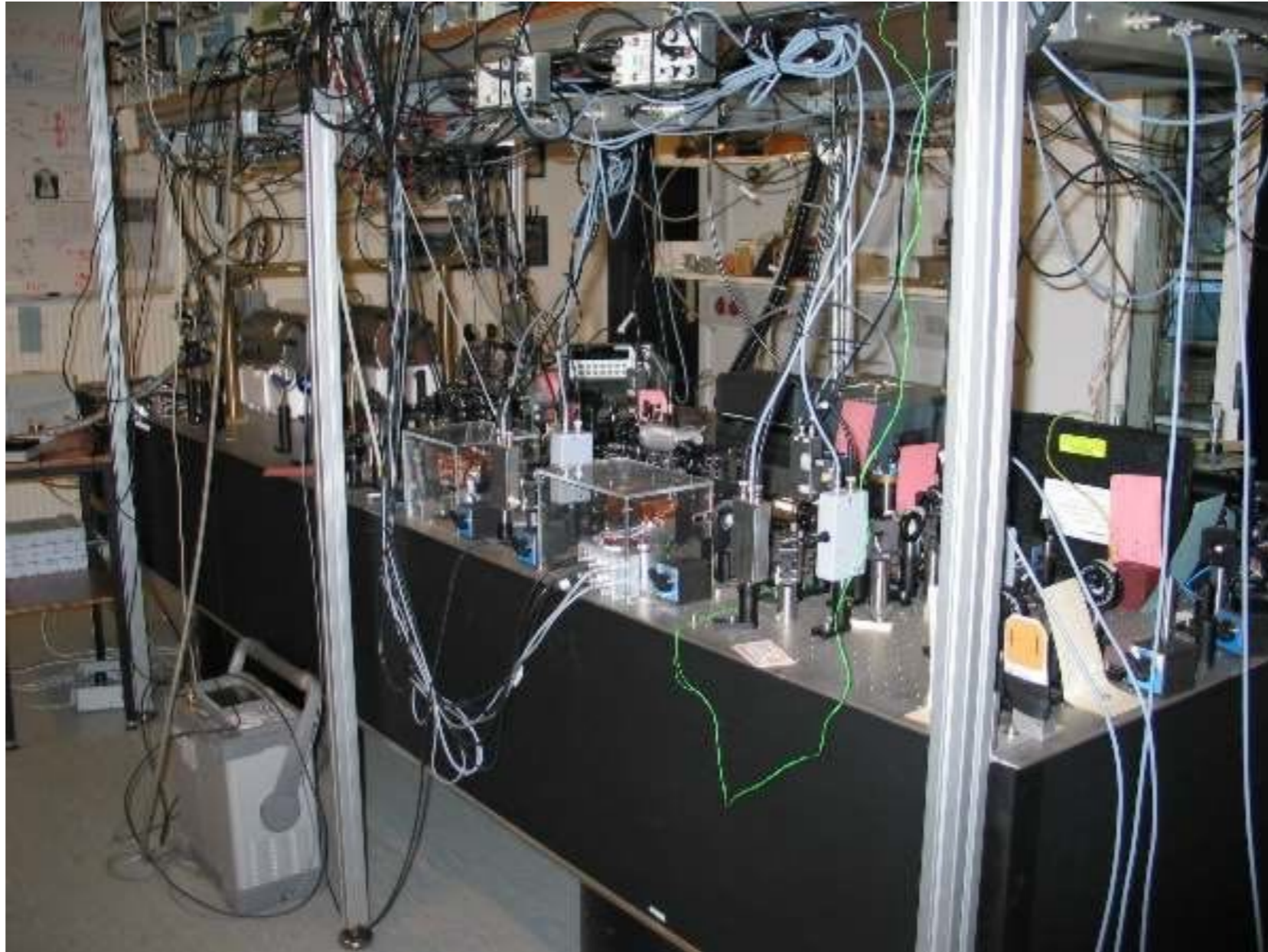
Flyt kaptajn Kirk ved at sende information om ham

# En god teleporteringsmaskine



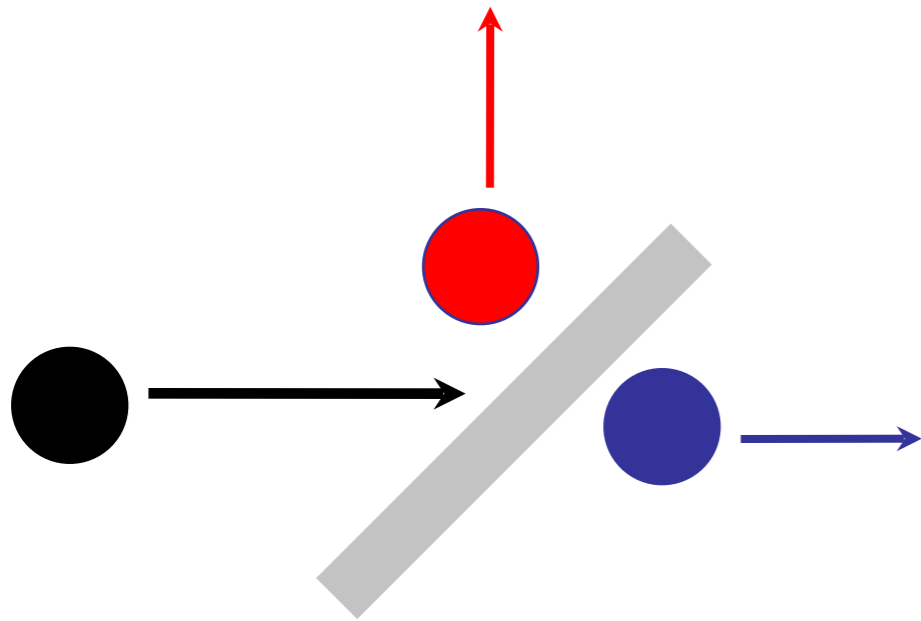
Telefax: læser papir et sted, sender information, og gendanner et andet sted

# En anden teleporteringsmaskine



På mange måder ikke så god som fax  
meget bedre på andre måder

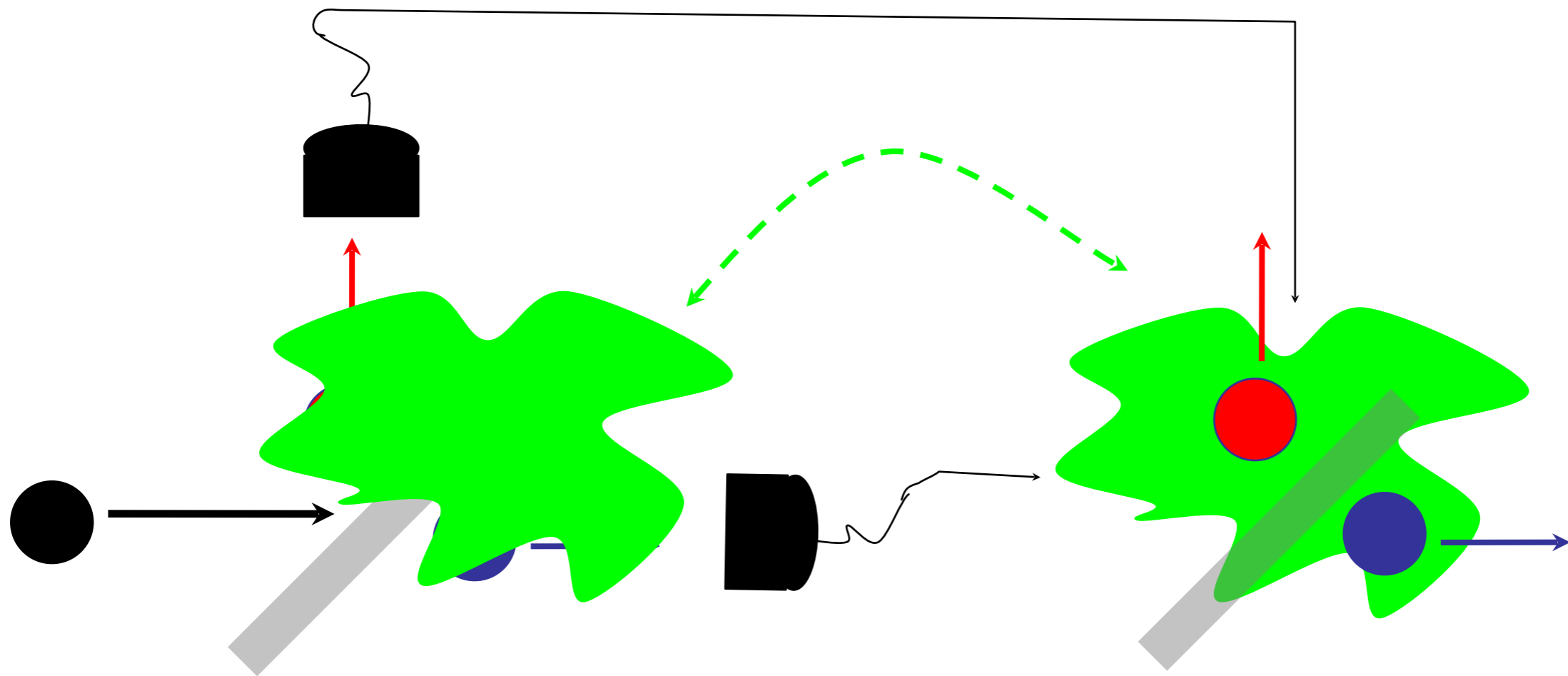
# Problemet



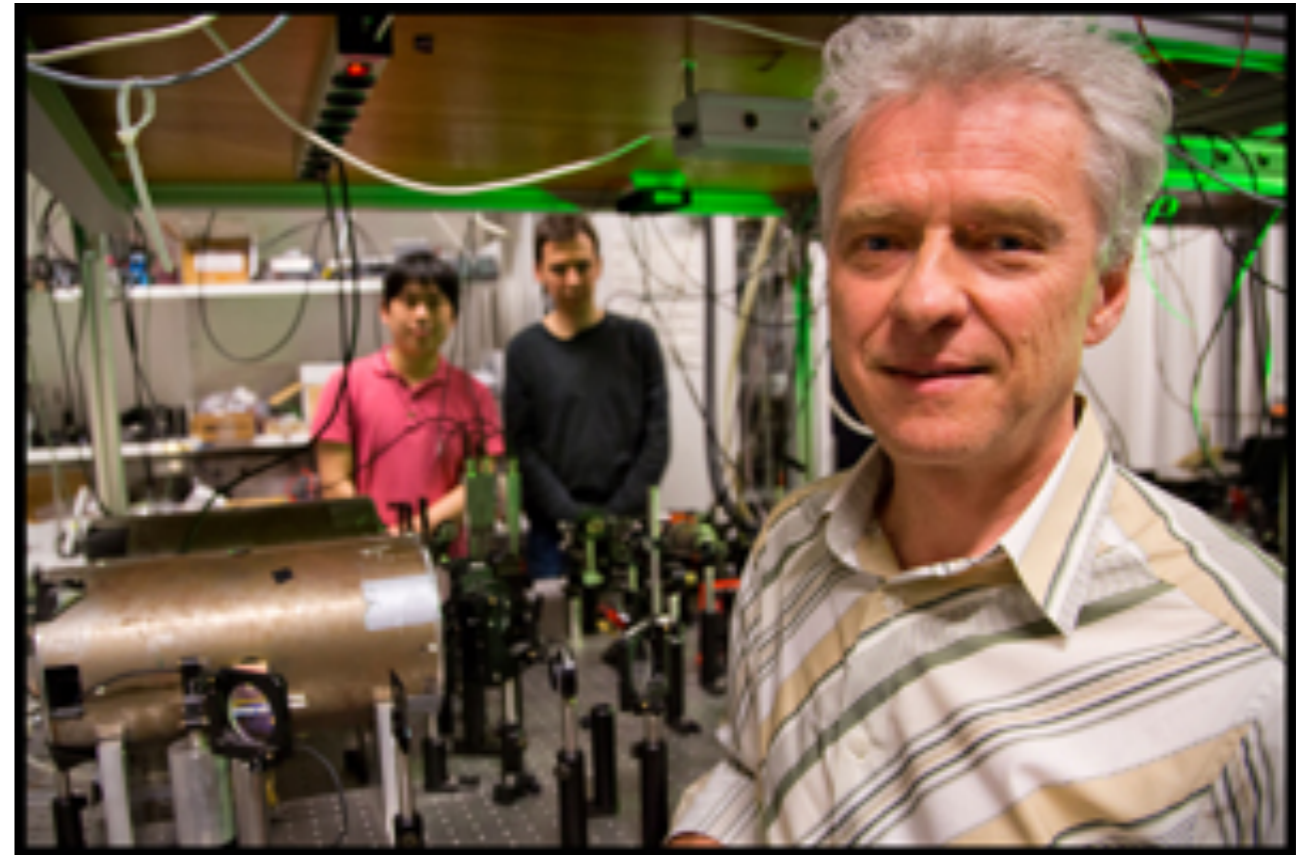
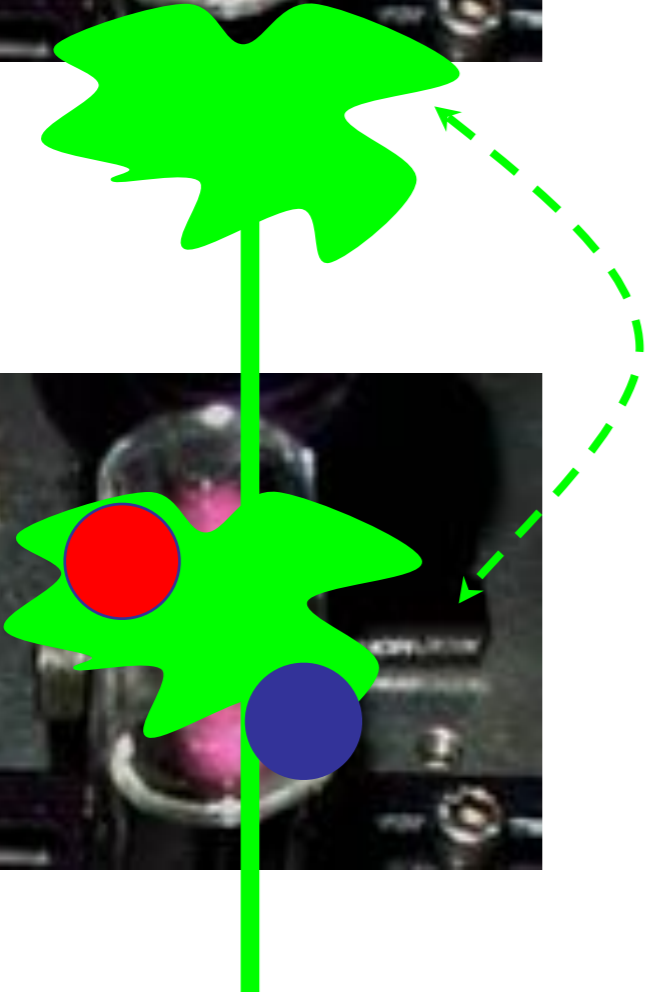
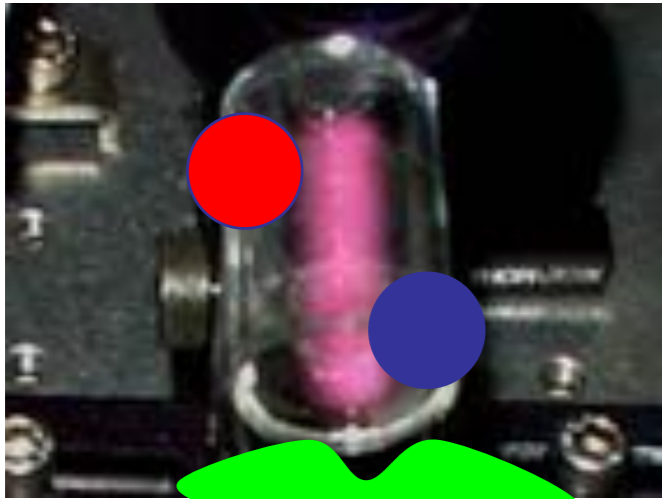
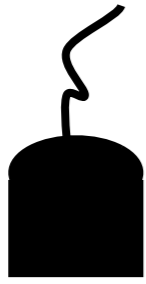
Fotonen er to steder på en gang  
=> hvis jeg måler ødelægger jeg  
muligheden for interferens

# Løsning

Bland med sammenfiltret kvantetilstand

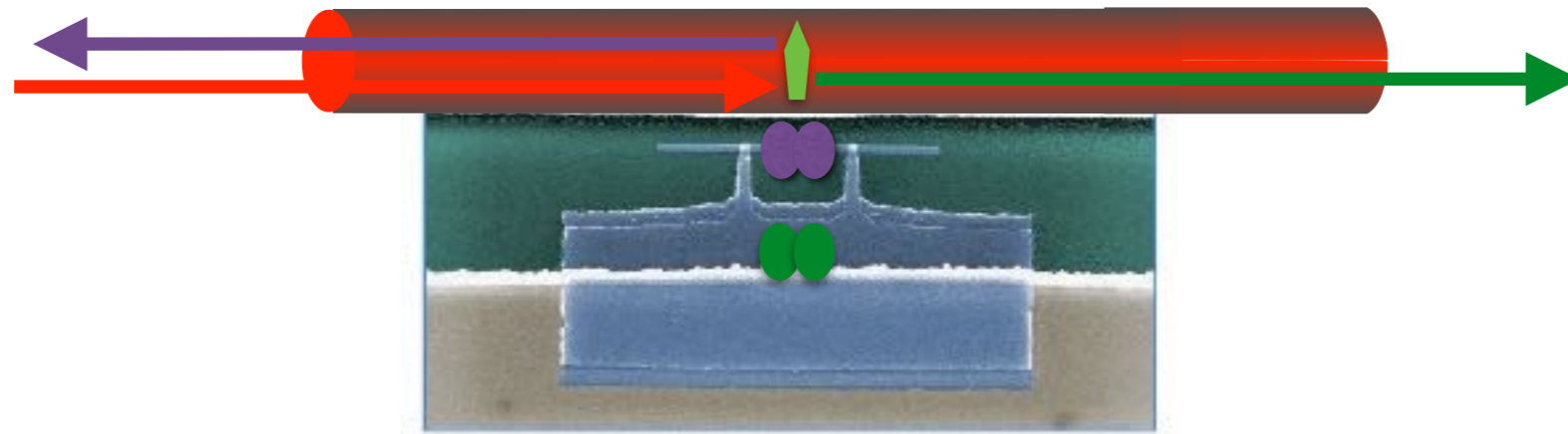


# Experiment



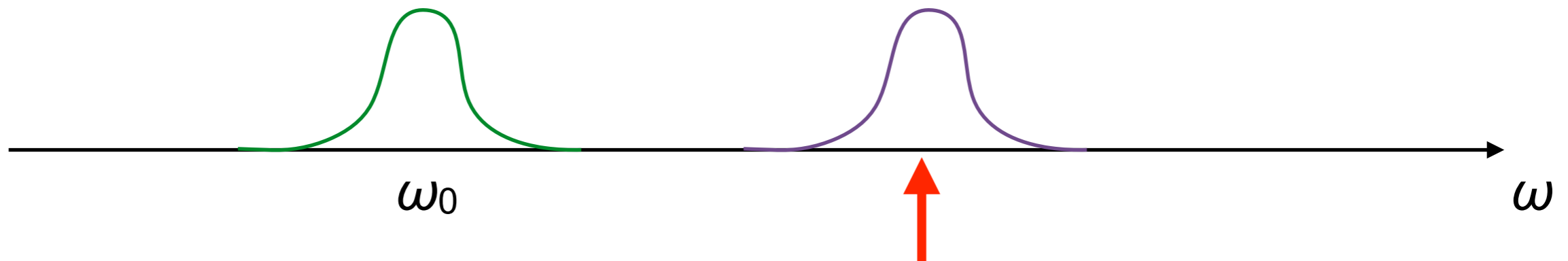


# Lys og superledere



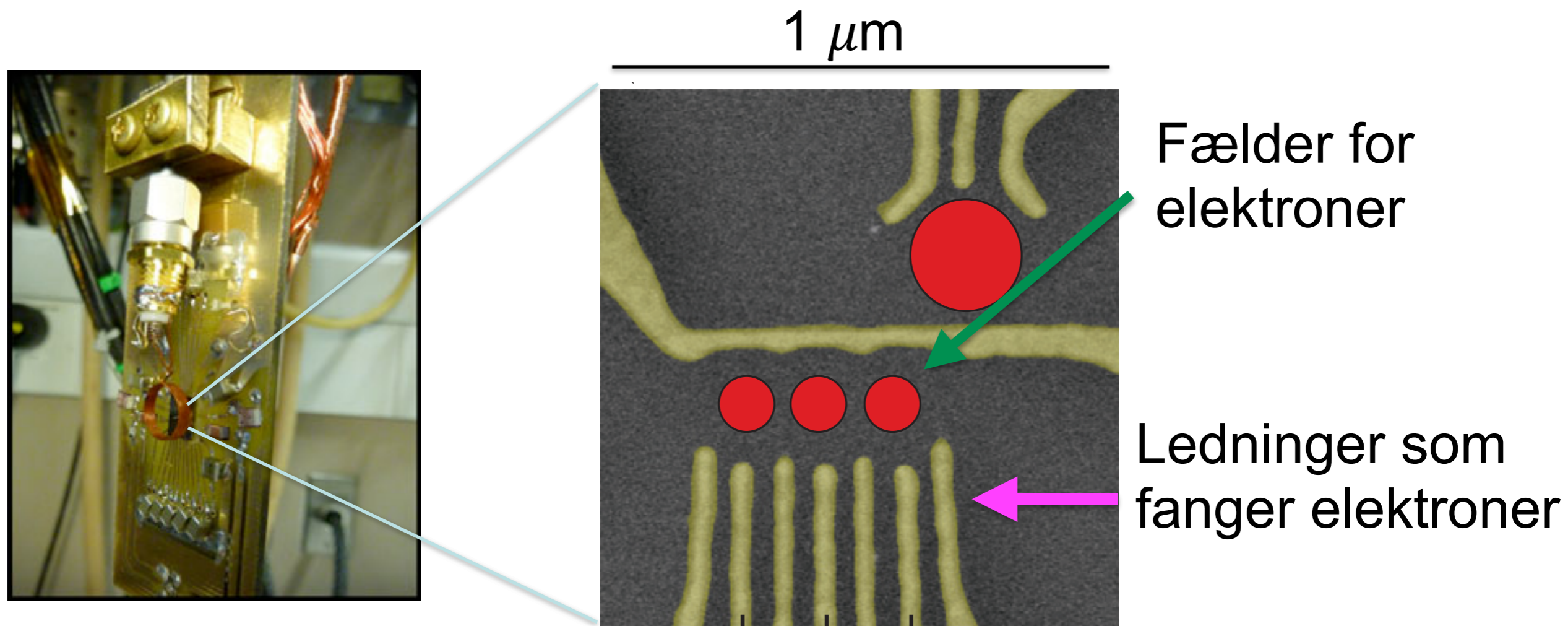
Elektronpar flytter molekyles resonansfrekvens

Reflektion



Kan i princippet bruges til at koble lys og superledere

# Elektroner i faste stoffer



Kvantebit: Elektronernes rotation

C. Marcus et al. (QDEV/NBI)

# Konklusion (3)

- **Kvanteinformation er sjovt**
- Interessante anvendelser
- Kryptografi
- Kvantecomputere: **kvantefysikopgaver**, faktorisering, ....
- **Svært at bygge i praksis**

## Førende teknologier

- Ionfælder **Nobelprisen 2012**
- Superledende systems **IBM, Google, D-Wave,...**
- Topologiske materialer (NBI) **Microsoft** **NSA?**
- **Vi kan også være med i Danmark**

