

# Zsonglőrködés kvantumrészecskékkel

## a 2012. évi fizikai Nobel-díj ürügyén

Domokos Péter

Wigner Fizikai Kutatóközpont, Magyar Tudományos Akadémia

Az atomoktól a csillagokig, 2013. október 10., Budapest

# A 2012. évi fizikai Nobel-díj

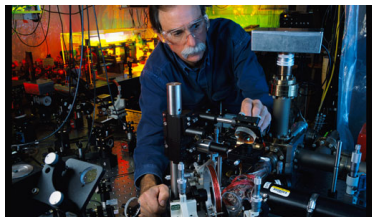
"for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems"

**Serge Haroche**



Ecole Normale Supérieure, Párizs

**David Wineland**



National Institute of Standards and Technology (NIST) and University of Colorado Boulder, USA

**Új fizika alacsony energián ?!**

# Új fizika alacsony energián ?!

- ▶ felfedezés ~ szélsőséges területek (nagy energia, tömeg, ...)

# Új fizika alacsony energián ?!

- ▶ felfedezés ~ szélsőséges területek (nagy energia, tömeg, ...)
- ▶ atom, molekula, szilárdtestek, fény  $\leftrightarrow$  ismert elméletek írják le

# Új fizika alacsony energián ?!

- ▶ felfedezés ~ szélsőséges területek (nagy energia, tömeg, ...)
- ▶ atom, molekula, szilárdtestek, fény  $\leftrightarrow$  ismert elméletek írják le
- ▶ **elektrodinamika**: Maxwell-egyenletek (1865), Hertz kísérlet (1885-89)



James C. Maxwell



Heinrich R. Hertz

# Új fizika alacsony energián ?!

- ▶ felfedezés ~ szélsőséges területek (nagy energia, tömeg, ...)
- ▶ atom, molekula, szilárdtestek, fény  $\leftrightarrow$  ismert elméletek írják le
- ▶ **elektrodinamika**: Maxwell-egyenletek (1865), Hertz kísérlet (1885-89)



James C. Maxwell



Heinrich R. Hertz

- ▶ **kvantummechanika**: XIX-XX. századok fordulóján



Niels Bohr



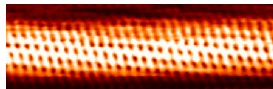
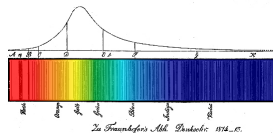
Erwin  
Schrödinger



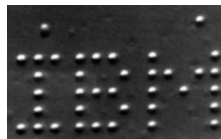
Werner  
Heisenberg

# Kvantummechanika sikere

- ▶ kísérleti tapasztalatok magyarázata (feketetest-sugárzás spektruma, fotoeffektus, vonalas színekép)
- ▶ anyag további alapvető tulajdonságainak megjósolása
  - ▶ spin és a kizárási elv (Pauli)
  - ▶ antianyag (Dirac)
- ▶ korai alkalmazások: anyag szerkezetének feltárása
  - ▶ elektrondiffrakció (Davisson-Germer, 1927)
  - ▶ maghasadás, nukleáris energia
- ▶ XX. sz. technikai forradalom: félvezetők, szupravezetők (NMR), lézer



szén nanocső STM képe





# A kvantummechanika gyanús viselkedése

Elfogadott, de

# A kvantummechanika gyanús viselkedése

## Elfogadott, de

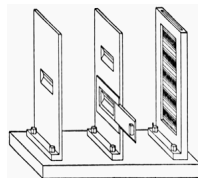
- ▶ csak közvetetten tapasztaljuk (sokaság),
- ▶ pedig jóval többet mond, mit amit meg tudunk figyelni!
- ▶ Hat vagy több nagyságrendet kell a tér- és időskálán áthidalni! ( $\Rightarrow$  60 év)

# A kvantummechanika gyanús viselkedése

## Gedanken experiments

### Elfogadott, de

- ▶ csak közvetetten tapasztaljuk (sokaság),
- ▶ pedig jóval többet mond, mit amit meg tudunk figyelni!
- ▶ Hat vagy több nagyságrendet kell a tér- és időskálán áthidalni! ( $\Rightarrow$  60 év)



### Erwin Schrödinger, 1952

„We never experiment with just one electron or atom or (small) molecule. In **thought-experiments** we sometimes assume that we do; this invariably entails ridiculous consequences...”.

# A kvantummechanika gyanús viselkedése

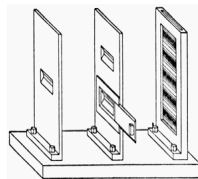
## Elfogadott, de

- ▶ csak közvetetten tapasztaljuk (sokaság),
- ▶ pedig jóval többet mond, mit amit meg tudunk figyelni!
- ▶ Hat vagy több nagyságrendet kell a tér- és időskálán áthidalni! ( $\Rightarrow$  60 év)

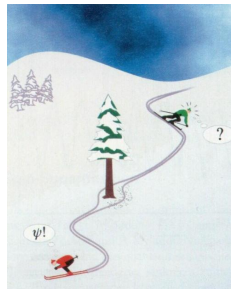
## Erwin Schrödinger, 1952

„We never experiment with just one electron or atom or (small) molecule. In **thought-experiments** we sometimes assume that we do; this invariably entails ridiculous consequences...”.

## Gedanken experiments

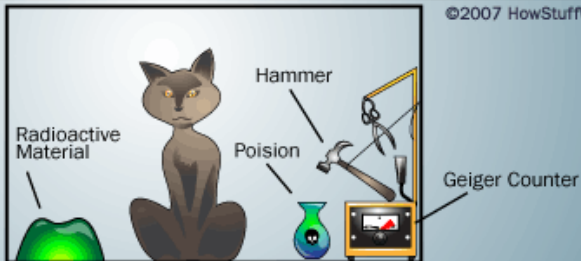


## Szuperpozíció elve



# Schrödinger's Cat

©2007 HowStuffWorks



The material does not decay; the cat lives.



The material has decayed; the cat has been killed by the poison.



According to the Copenhagen interpretation, the cat is both alive and dead. It exists in a state of "superposition."

## Atomok leírása. Nátrium atom

# Atomok leírása. Nátrium atom

**Mi egy atom  
tulajdonsága?**

# Atomok leírása. Nátrium atom

Mi egy atom  
tulajdonsága?



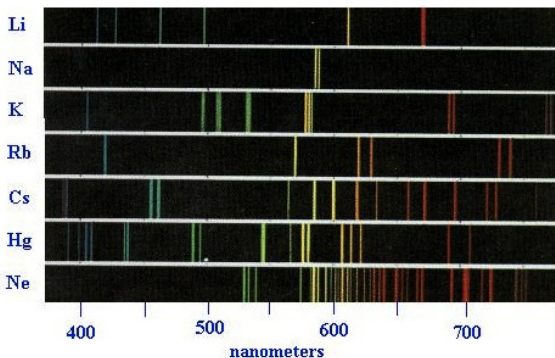


# Atomok leírása. Nátrium atom

Black Body



Mi egy atom  
tulajdonsága?

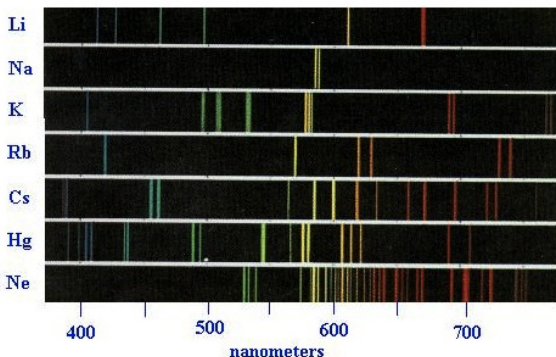


# Atomok leírása. Nátrium atom

Black Body



Mi egy atom tulajdonsága?



Mi egy spektrumvonal tulajdonsága?

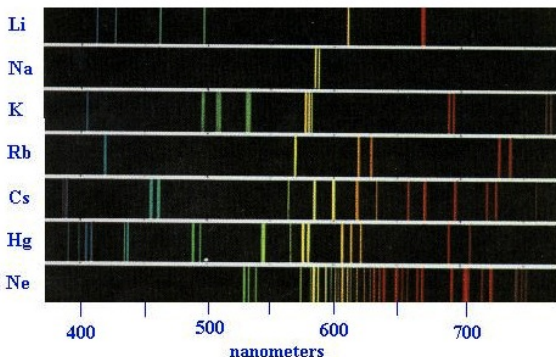
- ▶ hullámhossz ( $\lambda = 589\text{nm}$ )
- ▶ természetes vonalszélesség:  $2\pi \times 9.8\text{ MHz}$
- ▶ Doppler kiszélesedés ( $T = 300\text{K}$ ):  $2\pi \times 556\text{ MHz}$

# Atomok leírása. Nátrium atom

Black Body



Mi egy atom tulajdonsága?



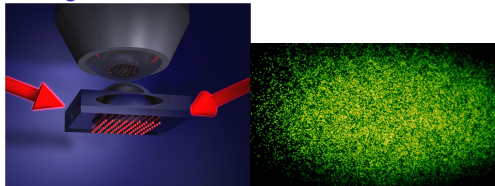
Mi egy spektrumvonal tulajdonsága?

- ▶ hullámhossz ( $\lambda = 589\text{nm}$ )
- ▶ természetes vonalszélesség:  $2\pi \times 9.8\text{ MHz}$
- ▶ Doppler kiszélesedés ( $T = 300\text{K}$ ):  $2\pi \times 556\text{ MHz}$

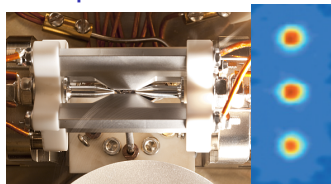
**Nem ismerjük!**

# Egyedi kvantumrendszerek izolálása

Semleges atom



Ion csapda

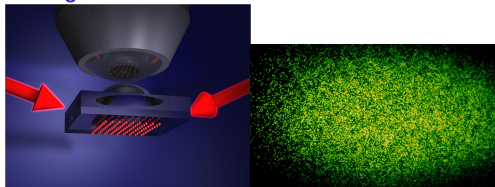


## Módszerek

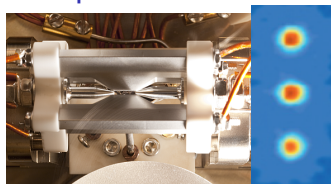
- ▶ optikai pumpálás
- ▶ **lézeres hűtés**
- ▶ **csapdázás** vákuumban:  
optikai, mágneses,  
elektrosztatikus
- ▶ EM rezonáns módus

# Egyedi kvantumrendszerek izolálása

## Semleges atom



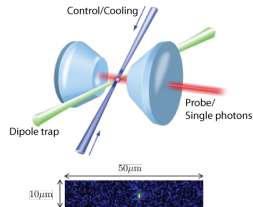
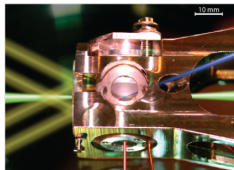
## Ion csapda



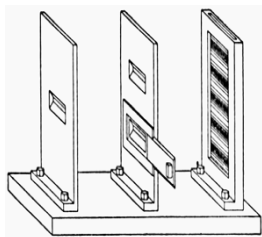
## Módszerek

- ▶ optikai pumpálás
- ▶ **lézeres hűtés**
- ▶ **csapdázás** vákuumban: optikai, mágneses, elektrosztatikus
- ▶ EM rezonáns módus

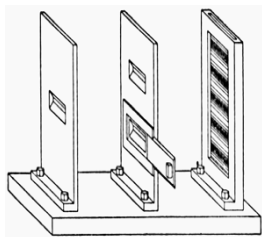
## Optikai mikrorezonátor



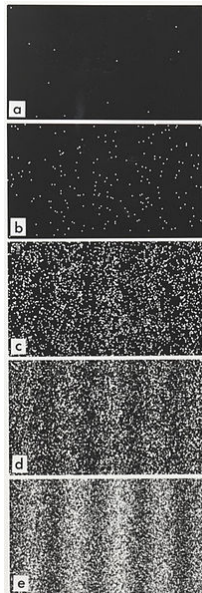
# Kvantuminterferencia



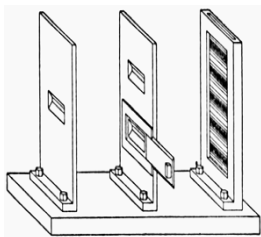
# Kvantuminterferencia



Elektron (1989)



# Kvantuminterferencia



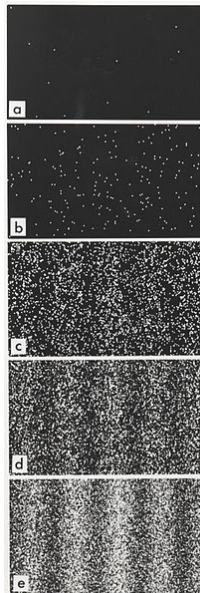
## Neon atom (1992)



1 mm

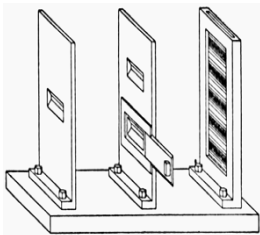
FIG. 2. The interference fringe pattern on the MCP for atoms with the initial velocity of approximately zero. The vertical length of the slit image is 2.8 mm. The spatial resolution of the picture is 20 and 32  $\mu\text{m}$  for the horizontal and vertical directions, respectively. The narrowing of the fringe separation on the upper part is due to the damage of the double-slit structure. This figure contains approximately  $6 \times 10^3$  atomic counts.

## Elektron (1989)

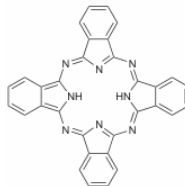




# Kvantuminterferencia óriásmolekulákkal



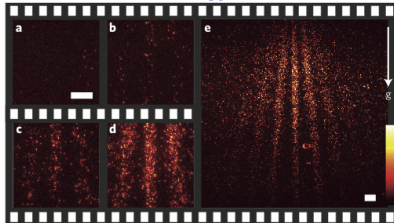
phtalocyanine  
 $PcH_2$



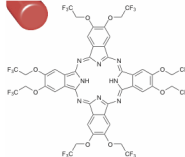
$PcH_2$

$C_{32}H_{18}N_8$   
 $m=514$  AMU

Nature Nanotechnology, 2012



phtalocyanine  
derivative  $F_{24}PcH_2$



$F_{24}PcH_2$

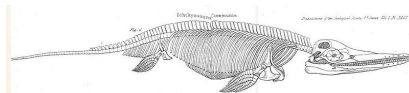
$C_{48}H_{26}F_{24}N_8O_8$   
 $m=1298$  AMU

**Marad még baj elég: elpusztul, amit mérünk!**

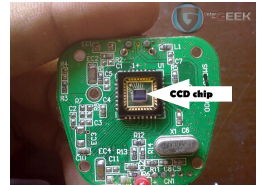
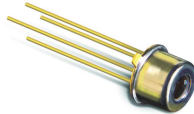
# Marad még baj elég: elpusztul, amit mérünk!

## Schrödinger, 1952

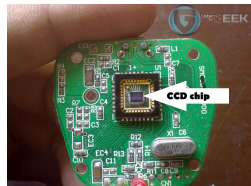
"We are not experimenting with single particles, any more than we can raise **Ichthyosauria** in the zoo. We are scrutinizing events long after they have happened."



# Foton mérés zárt dobozban



# Foton mérés zárt dobozban



## **Közvetett mérés** $\Rightarrow$

Kölcsönható kvantumrendszerre van szükség

- ▶ objektum: amit mérünk
- ▶ szonda: ami elpusztul

# Kétrészecskés kvantummechanika

## Egyedi kvantumrendszerek manipulációja

„Serge Haroche and David J. Wineland have independently invented and developed methods for measuring and manipulating individual particles while preserving their quantum-mechanical nature, in ways that were previously thought unattainable.”

# Kétrészecskés kvantummechanika

## Egyedi kvantumrendszerek manipulációja

„Serge Haroche and David J. Wineland have independently invented and developed methods for measuring and manipulating individual particles while preserving their quantum-mechanical nature, in ways that were previously thought unattainable.”

## Kölcsönhatás

kvantumosan szinten kontrollált  
és megfigyelhető

# Kétrészecskés kvantummechanika

## Egyedi kvantumrendszerek manipulációja

„Serge Haroche and David J. Wineland have independently invented and developed methods for measuring and manipulating individual particles while preserving their quantum-mechanical nature, in ways that were previously thought unattainable.”

## Kölcsönhatás

kvantumoz szinten kontrollált és megfigyelhető

### Ioncsapda

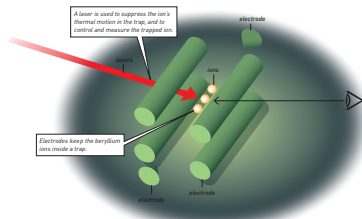


Figure 2. In David Wineland's laboratory in Boulder, Colorado, electrically charged atoms or ions are kept inside a trap by surrounding electric fields. One of the secrets behind Wineland's breakthrough is mastery of the art of using laser beams and creating laser pulses. A laser is used to put the ion in its lowest energy state and thus enabling the study of quantum phenomena with the trapped ion.

### Rezonátor

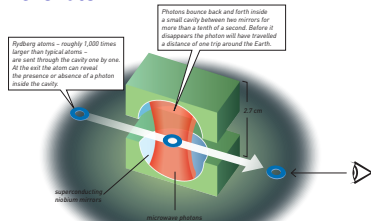
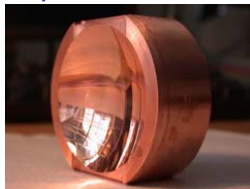


Figure 3. In the Serge Haroche laboratory in Paris, in addition to a temperature of several absolute zero, the microwave photons bounce back and forth inside a small cavity between two mirrors. The mirrors are so reflective that a single photon stays for more than a tenth of a second before it is lost. During its long life time, many quantum manipulations can be performed with the trapped photon without destroying it.



# Rezonátoros kvantumelektrodinamika

Szupravezető Nb tükör



# Rezonátoros kvantumelektrodinamika

## Szupravezető Nb tükör



## Rezonátor



- ▶  $T_{\text{cav}} = 130\text{ms}$  (hideg kell  $T = 0.8\text{K}$ )
- ▶  $Q = 4.2 \times 10^{10}$ ,  $\mathcal{F}/\pi = 10^9$  round-trip

# Rezonátoros kvantumelektrodinamika

Szupravezető Nb tükör

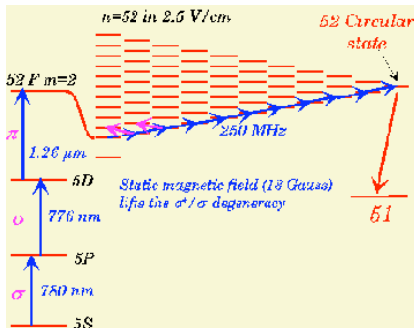
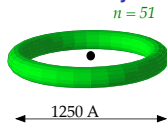


Rezonátor



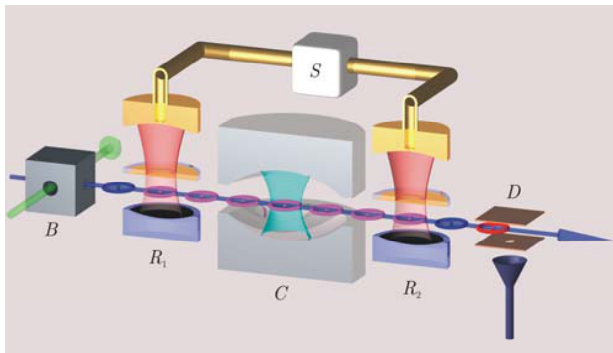
- ▶  $T_{\text{cav}} = 130\text{ms}$  (hideg kell  $T = 0.8\text{K}$ )
- ▶  $Q = 4.2 \times 10^{10}$ ,  $\mathcal{F}/\pi = 10^9$  round-trip

Circuláris Rydberg atom

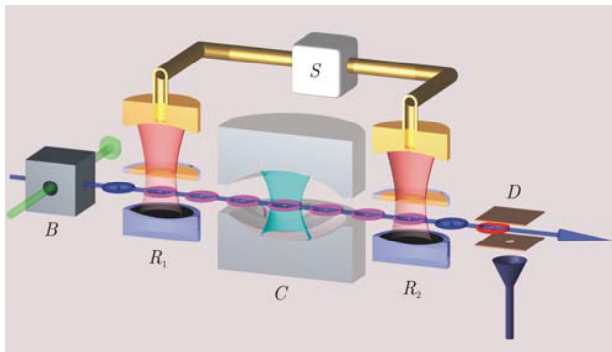


- ▶  $\omega_A = 51.099\text{ GHz}$ ,  $T_{\text{at}} = 30\text{ms}$
- ▶ hangolhatóság (Stark effektus)
- ▶ sebességszelekció, nincs hűtés
- ▶ detektálás állapotselektív ionizációval

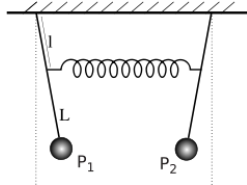
# Kísérleti elrendezés



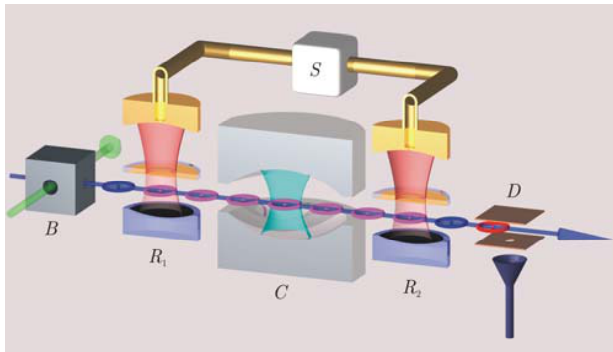
# Kísérleti elrendezés



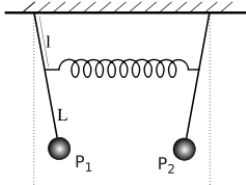
## Kettős inga



# Kísérleti elrendezés



## Kettős inga



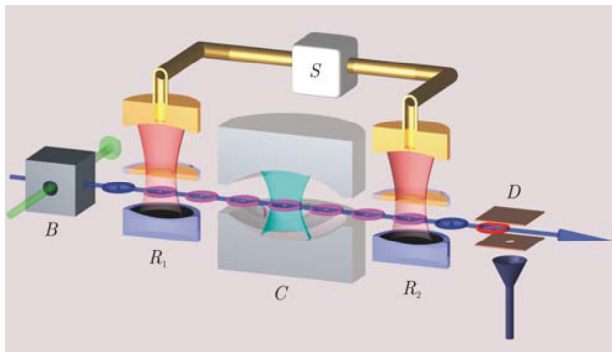
### Erős csatolás

$$\Omega^{-1} = 3 \mu\text{s}$$

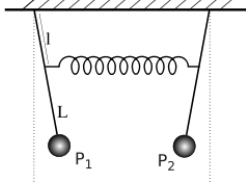
$$\gamma^{-1} = 32 \text{ ms}$$

$$\kappa^{-1} = 133 \text{ ms}$$

# Kísérleti elrendezés



## Kettős inga

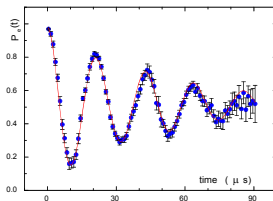


### Erős csatolás

$$\Omega^{-1} = 3 \mu\text{s}$$

$$\gamma^{-1} = 32 \text{ ms}$$

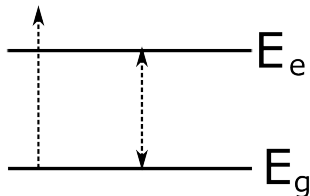
$$\kappa^{-1} = 133 \text{ ms}$$



# Foton kibocsátás és elnyelés megtiltása

## Nemrezonáns kölcsönhatás

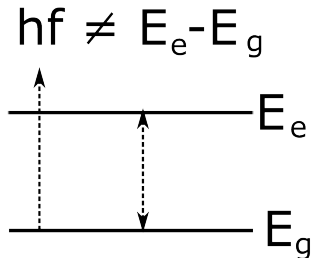
$$hf \neq E_e - E_g$$



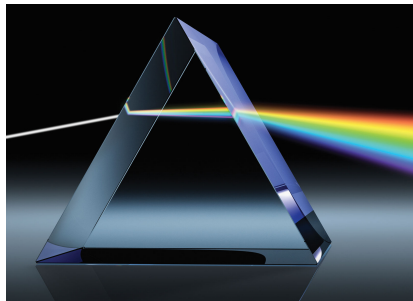


# Foton kibocsátás és elnyelés megtiltása

## Nemrezonáns kölcsönhatás



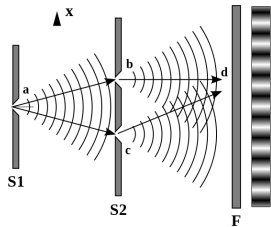
## Marad fontos hatás!



- ▶ törésmutató
- ▶ diszperzió

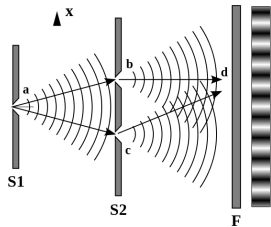
# Interferométerek: fázis $\rightarrow$ intenzitás

## Hullámfrontosztás

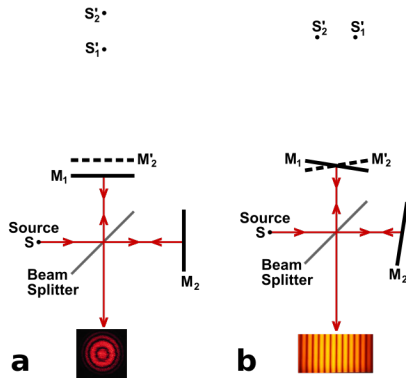


# Interferométerek: fázis $\rightarrow$ intenzitás

## Hullámfrontosztás

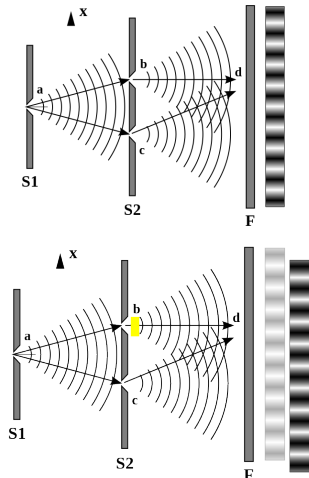


## Nyalábosztás

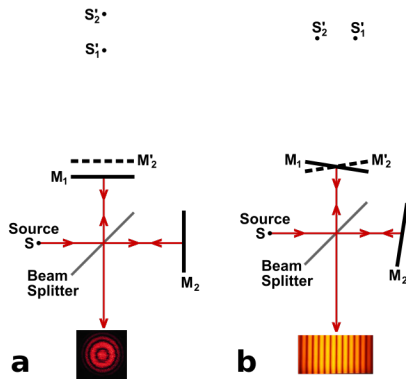


# Interferométerek: fázis $\rightarrow$ intenzitás

## Hullámfrontosztás

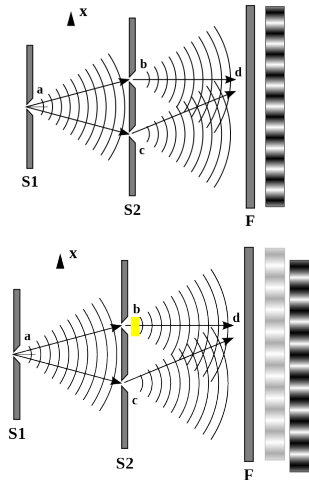


## Nyalábosztás

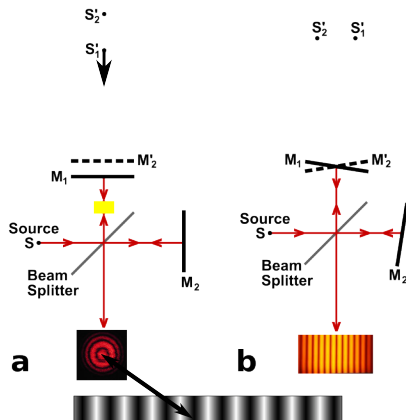


# Interferométerek: fázis $\rightarrow$ intenzitás

## Hullámfrontosztás

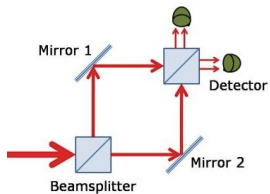
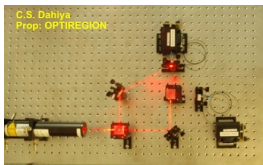


## Nyalábosztás



# Interferométer az elektron hullámfüggvényre

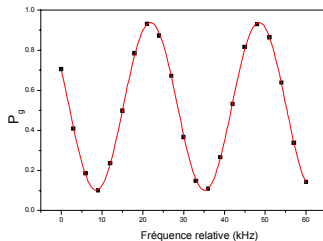
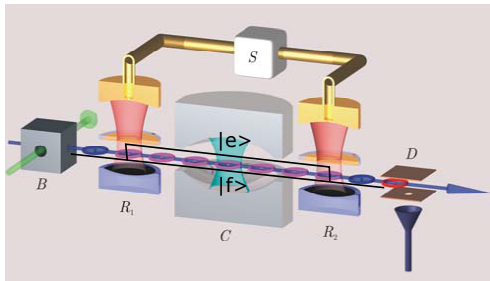
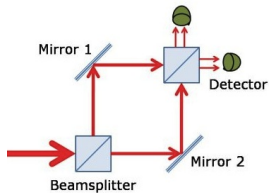
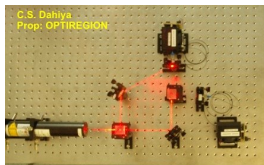
## Mach-Zehnder



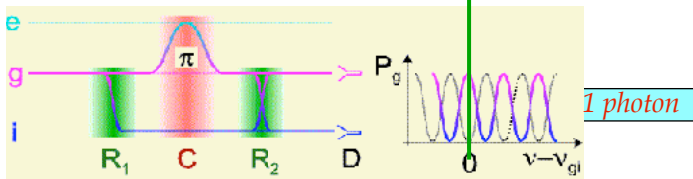
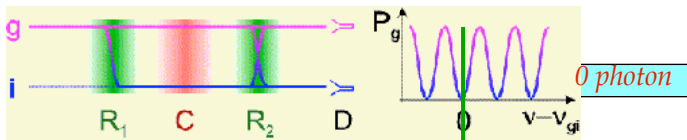
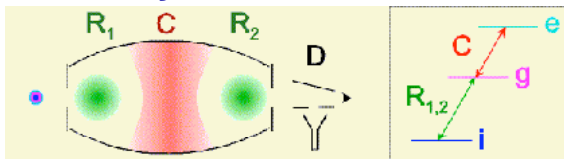
# Interferométer az elektron hullámfüggvényre

Ramsey (1989 Nobel díj)

## Mach-Zehnder



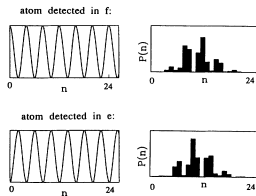
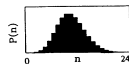
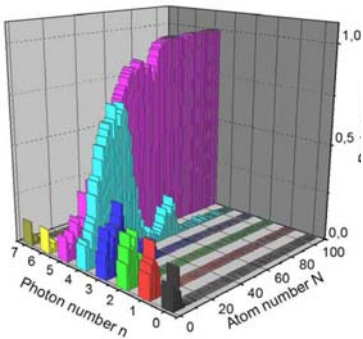
# Fotonmérés elnyelés nélkül





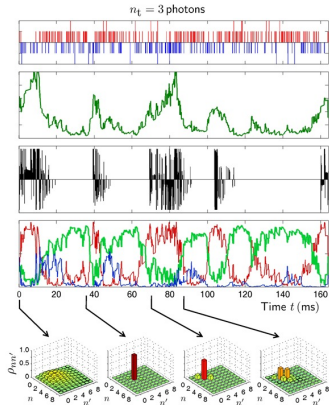
# Fotonszámmérés és preparálás

$n=0 \dots 7$

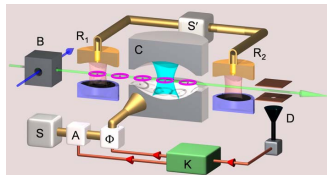


# Kvantumállapot stabilizálása visszacsatolással

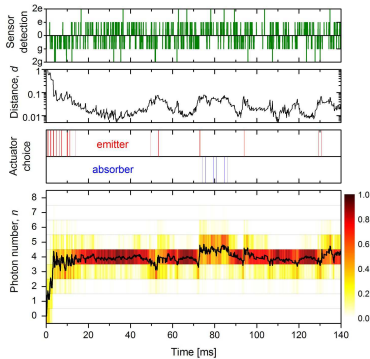
## Klasszikus forrás



Sayrin et al. Nature 2011



## Kvantumos küldönc



Zhou et al. Phys. Rev. Lett., 2012

# Kvantummérés Lendület csoport

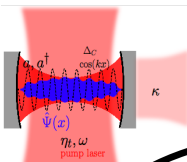
Ultracold atoms  
& CQED



Nagy



Vukics



Dombi



Szirmai



Kulucz



Domokos



Asbóth

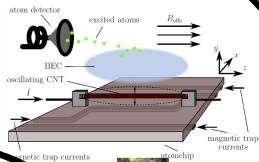


Kiss

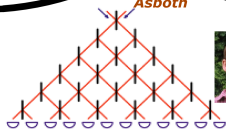


Darázs

Hybrid mesoscopic  
devices



Kálmán



Kollár

Quantum networks

Támogatók



MTA  
Lendület



ERC HU  
OPTOMECH



EU FP7

LEISURE AND CAREERS  
RESEARCH FUNDING