

# A kvantumos összefonódás

Asbóth János

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont,  
Kvantumoptikai és Kvantuminformatikai Osztály

Supported by the János Bolyai Scholarship of the Hungarian Academy of Sciences

Budapest, 2017. szeptember 28.

- I. A kvantummechanika születése
- II. Einstein és az összefonódás
- III. Kísérleti metafizika:  
A Bell-egyenlőtlenség
- IV. Az összefonódás a  
kvantumtechnológia alapja

# I. A kvantummechanika születése

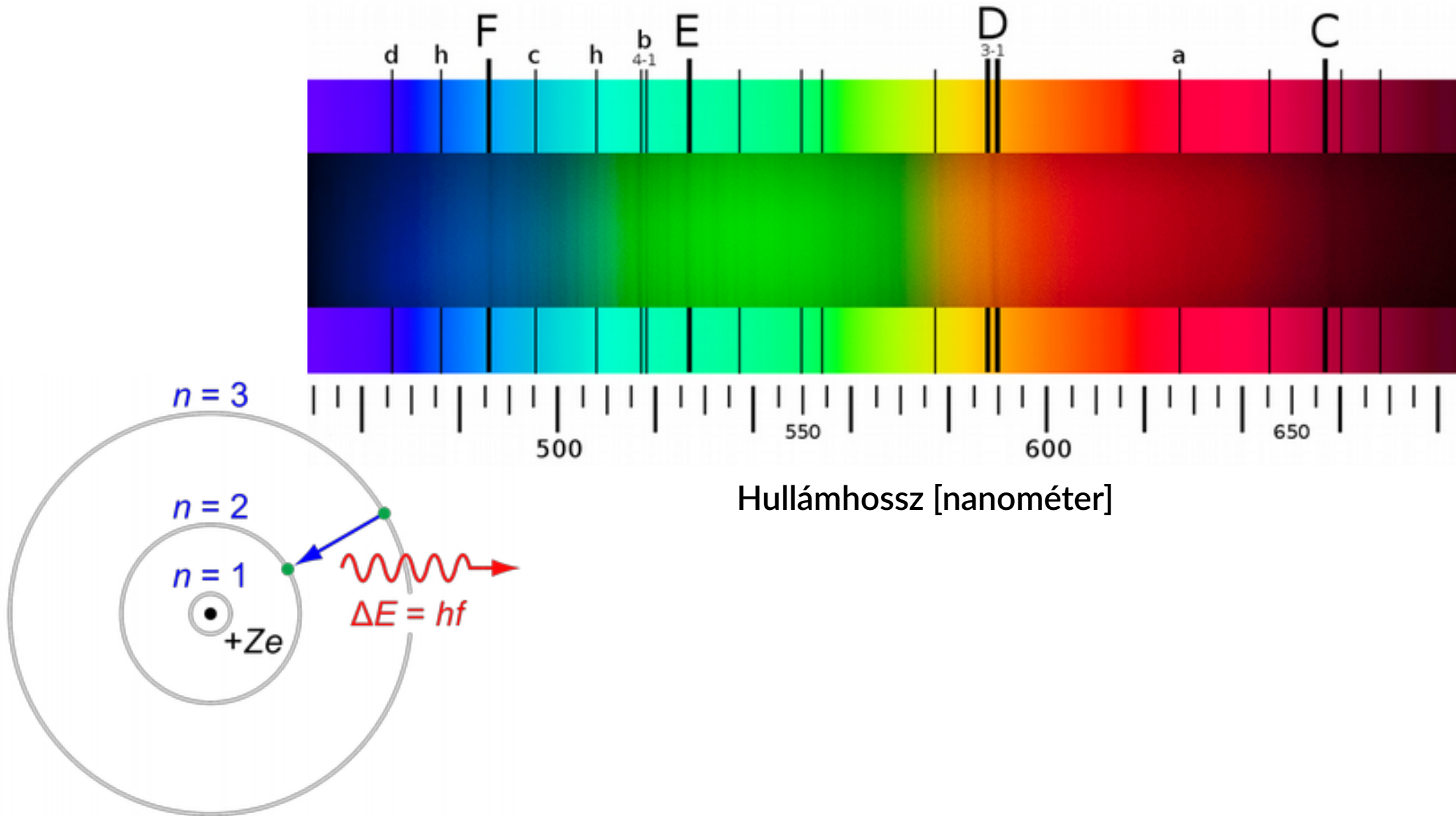
Hol van a kutyám, amikor nem látom? Tárgyállandóság



**Bohr-Einstein vita:  
Hol van az elektron, amikor nem látom? Kvantumfizika**

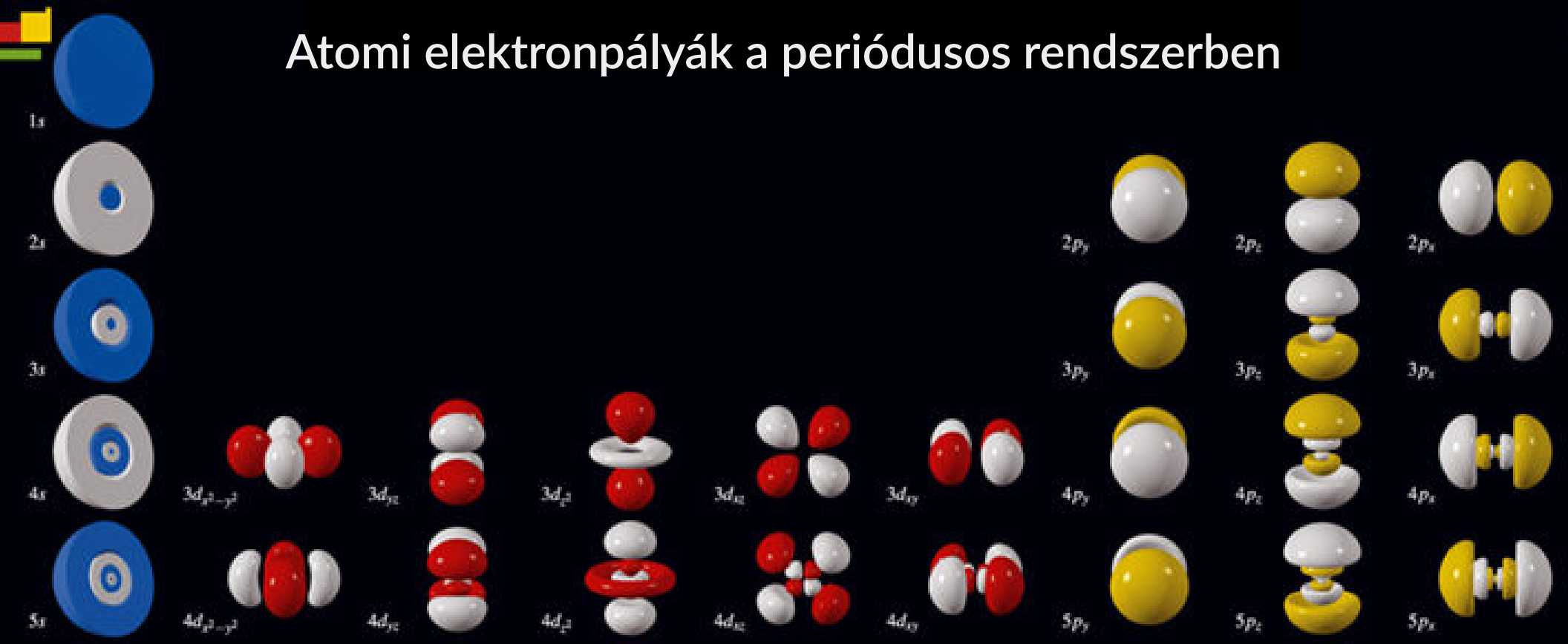


# 1913: Bohr atommodellje megmagyarázta a Nap színeképében lévő tiltott vonalakat



De mi dönti el, merre állnak az atomi pályák?

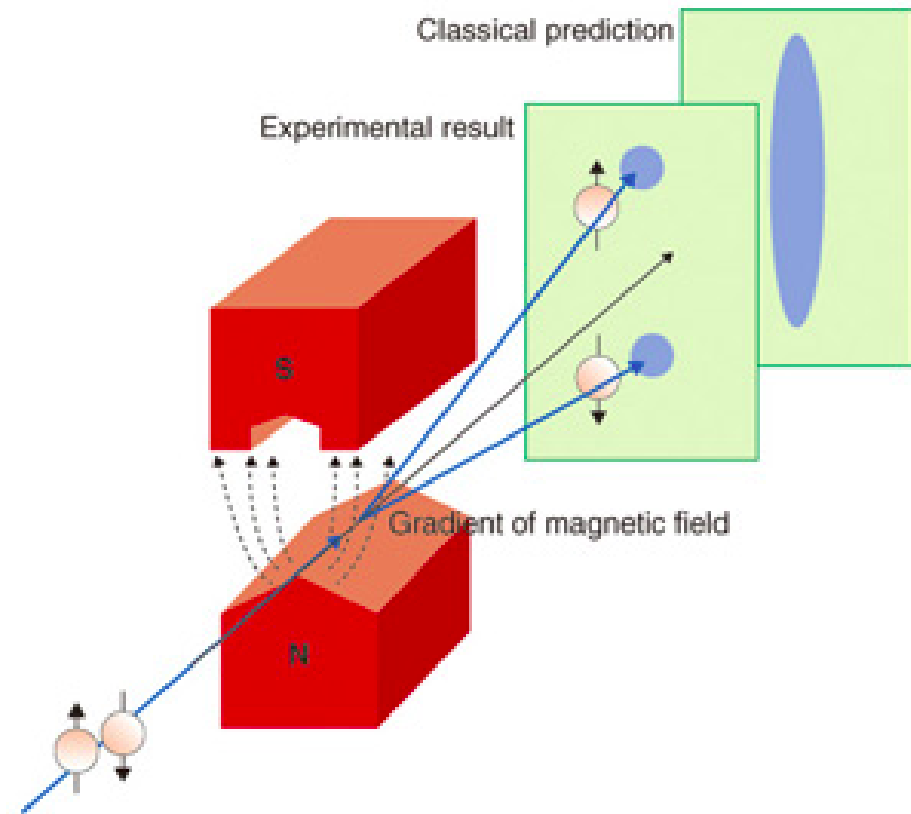
## Atomi elektronpályák a periódusos rendszerben



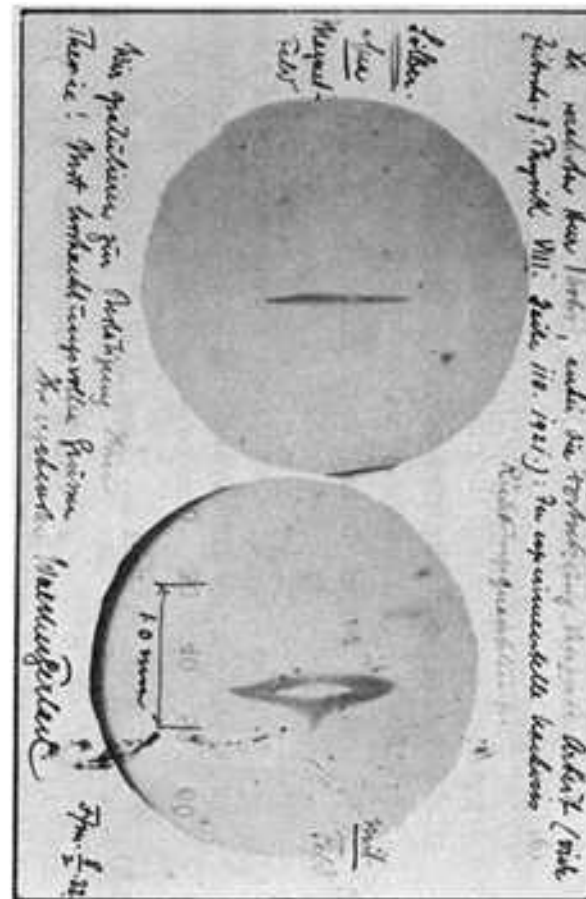
Forrás: <https://winter.group.shef.ac.uk/orbitron/>

# 1922: Stern-Gerlach kísérlet: Mérjük ki, merre állnak az atomi pályák!

Anyagi támogatás:  
Henry Goldman (Goldman-Sachs egyik alapítója)

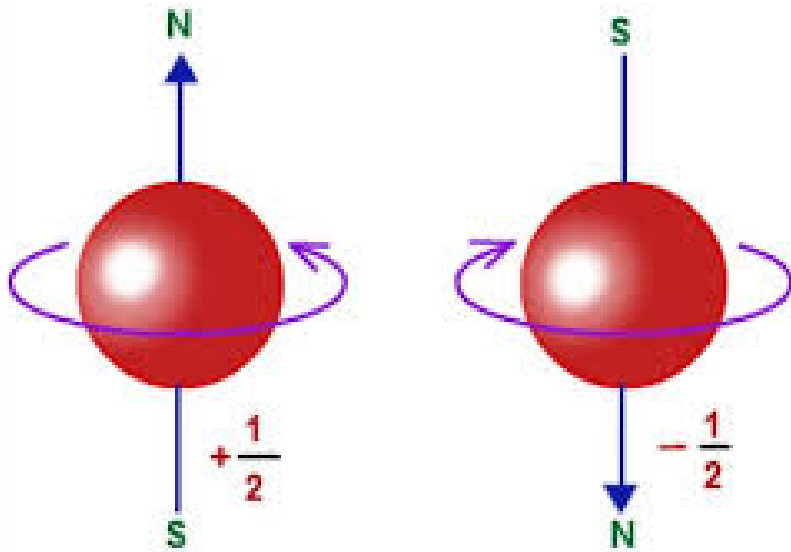


Levelezőlap, Gerlachtól Bohrnak





# Valójában a Stern-Gerlach kísérletben az elektron spinje okozza az effektust



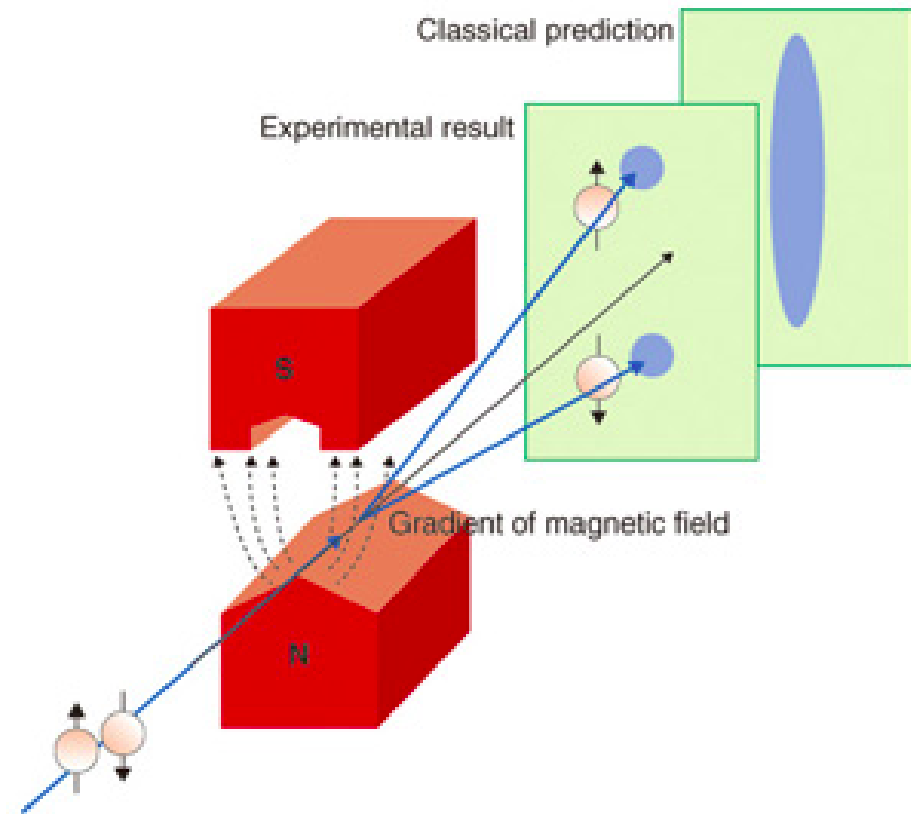
Egyszerűsített jelölés:

$|\uparrow\rangle$   
 $|\downarrow\rangle$   
 $|\leftarrow\rangle$   
 $|\rightarrow\rangle$



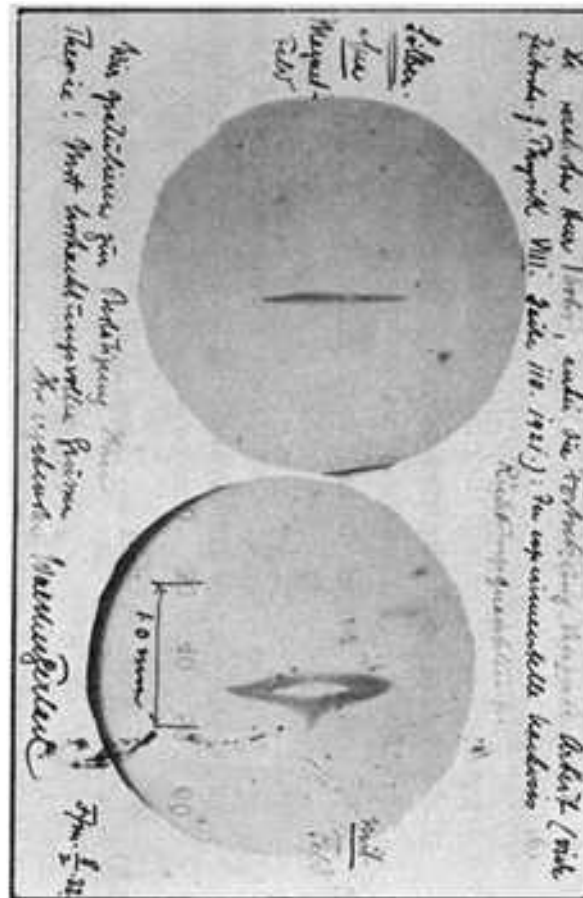
1944: Nobel-díj Sternnek, Gerlach kimarad  
(nemzetiszocialista rezsimmel való együttműködés )

# 1922: Stern-Gerlach kísérlet: Kiszűri a fel/lefele álló spinű részecskéket?

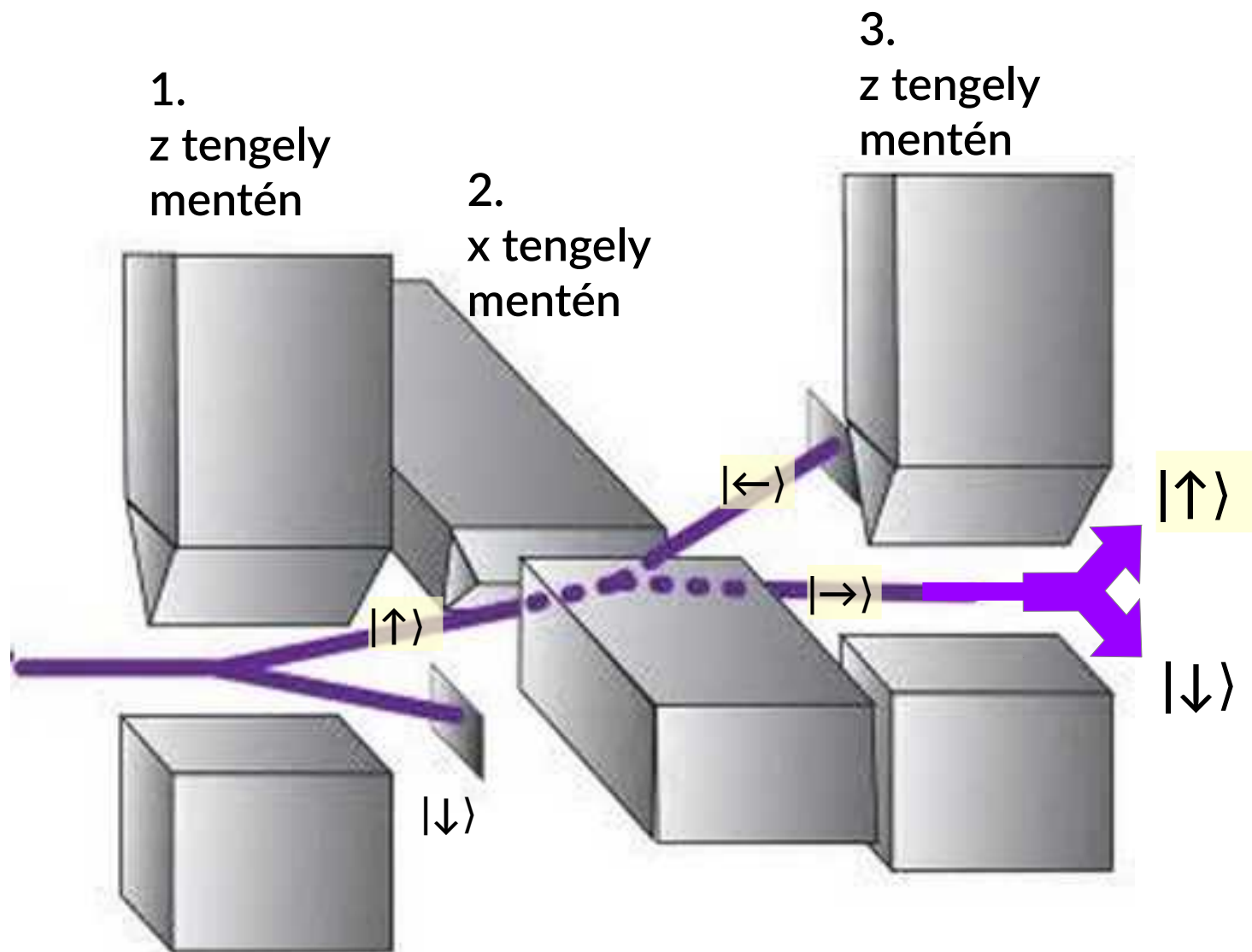


Anyagi támogatás:  
Henry Goldman (Goldman-Sachs egyik alapítója)

Levelezőlap, Gerlachtól Bohrnak



# 1922: Stern-Gerlach kísérlet: Döntésre kényszeríti a spineket!



# A spin bármerre állhat, de ha megmérjük, két opció között dönt: elemi bit

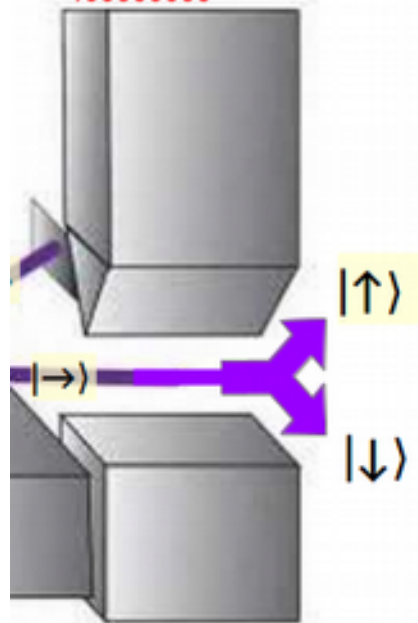
Mérés előtt:  
szuperpozíció

$$|\rightarrow\rangle = |\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle$$

Relatív fázis

Mérés

3.  
z tengely  
mentén




Mérés után:  
Egyik állapot

$$|\uparrow\rangle \text{ vagy } |\downarrow\rangle$$

Relatív fázis fontos,  
eldönti, merre áll a spin

$$|\leftarrow\rangle = |\uparrow\rangle - |\downarrow\rangle$$



Einstein: Az elektron nem tud “spontán” dönteni!  
Kell legyen valami rejtett tulajdossága, ami  
az eredményt megjósolja  
→ *lokális realizmus*

Bohr: ez csak üres filozofálás,  
az elmélet helyesen jósolja a kísérletet,  
csak ez számít  
→ *pragmatizmus*

Eddig itt tartunk:

Spin: mérésben kétértékű - elemi bit

Milyen tengely mentén: mérés dönti el

A mérőberendezéssel döntésre kényszerítjük a részecskét

Részecskének nem lehet “szabad akarata” → ?

## II. Einstein és az összefonódás

# 1935: Einstein – Podolsky – Rosen gondolkísérlete

MAY 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

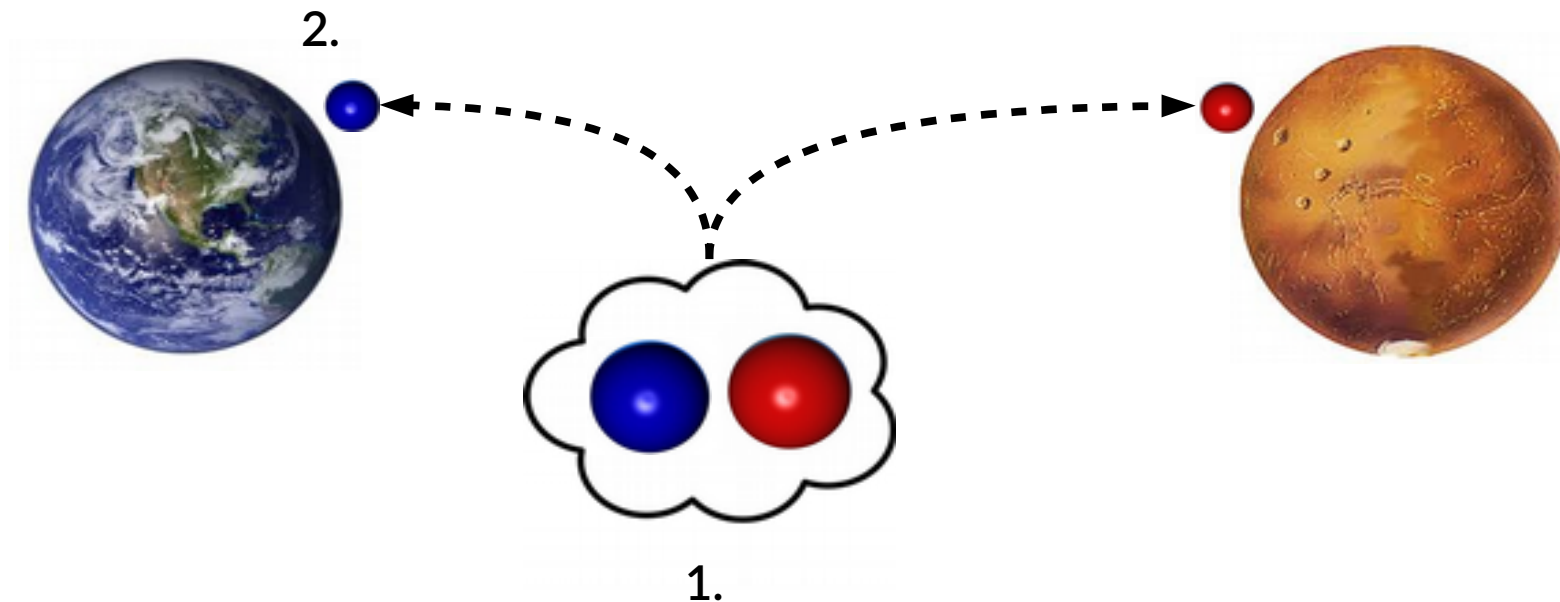
VOLUME 47

## Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

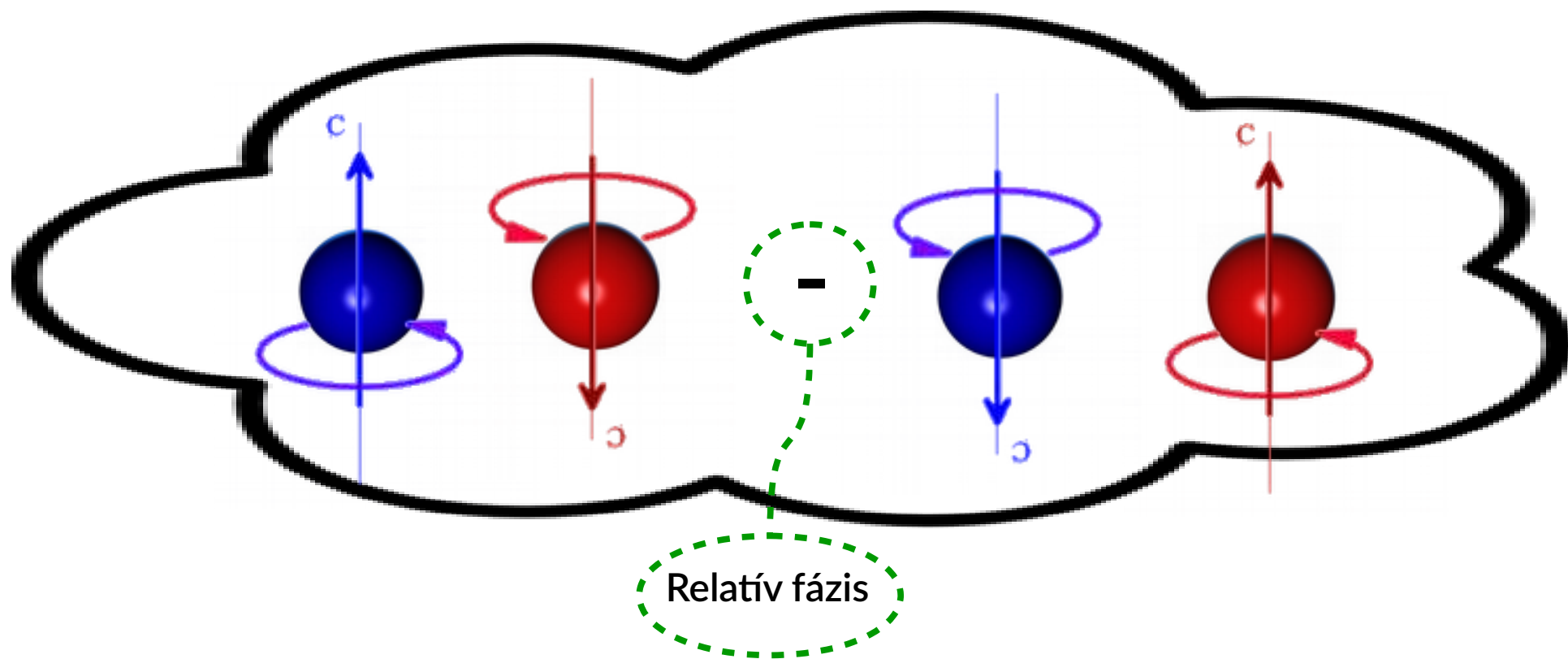
1. Megfelelő előkészítés, kvantummechanikával
2. A Földön valamit csinálok, ami azonnali hatást fejt ki a Marson.
3. Ez képtelenség: a kvantummechanikával valami gond van.





# 1935: Einstein – Podolsky – Rosen gondolkísérlete

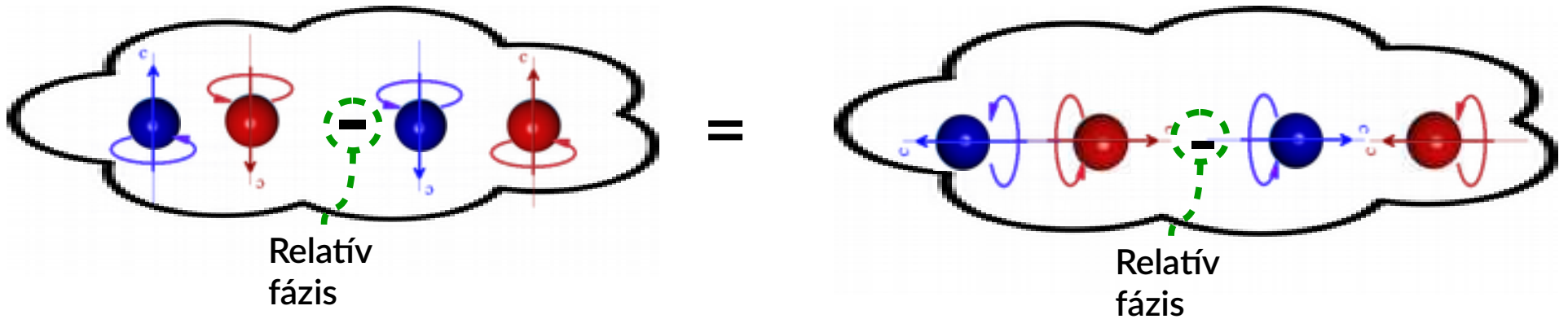
## 1. vegyünk két részecskét, ellentétes spinű állapotok szuperpozíciójában



Egyszerű jelölés:

$$|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle$$

1935: Einstein – Podolsky – Rosen gondolkísérlete  
 Különös kvantummos effektus: a két részecske spinje  
 ekkor bármely tengely mentén ellentétes



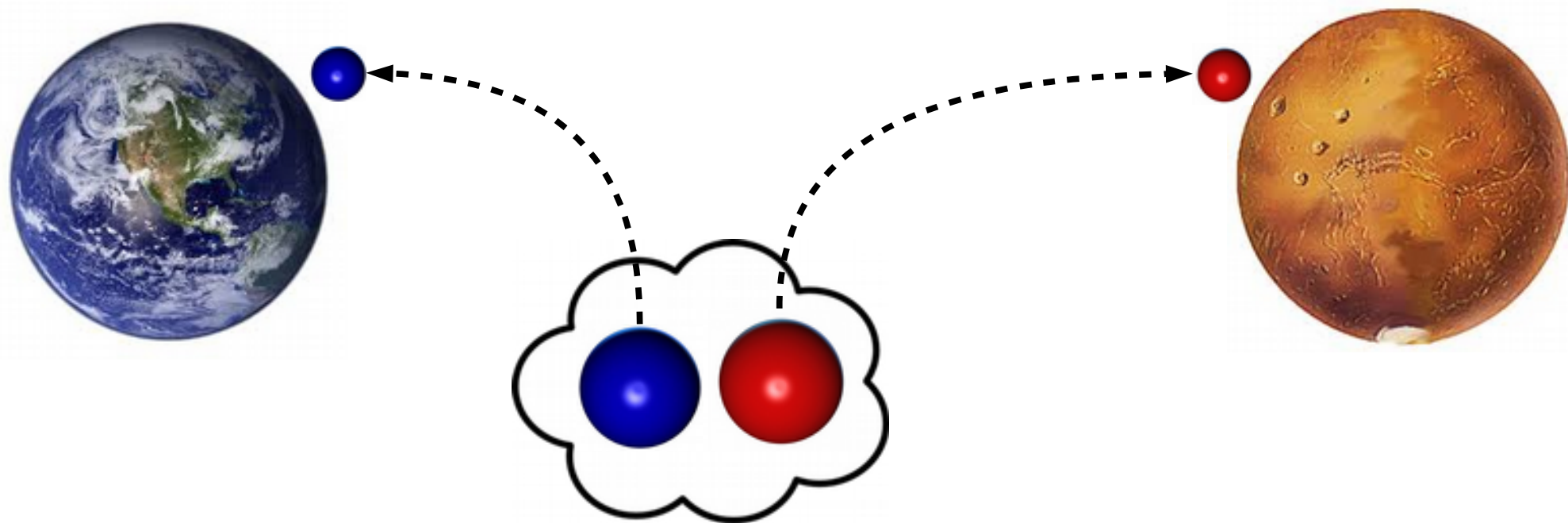
$$|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\uparrow\rangle|\downarrow\rangle = |\leftarrow\rangle|\rightarrow\rangle - |\rightarrow\rangle|\leftarrow\rangle$$

Ez a különös kvantumeffektus általános iskola 4. osztályos  
matekkal levezethető

$$|\leftarrow\rangle|\rightarrow\rangle - |\rightarrow\rangle|\leftarrow\rangle = |\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\uparrow\rangle|\downarrow\rangle$$

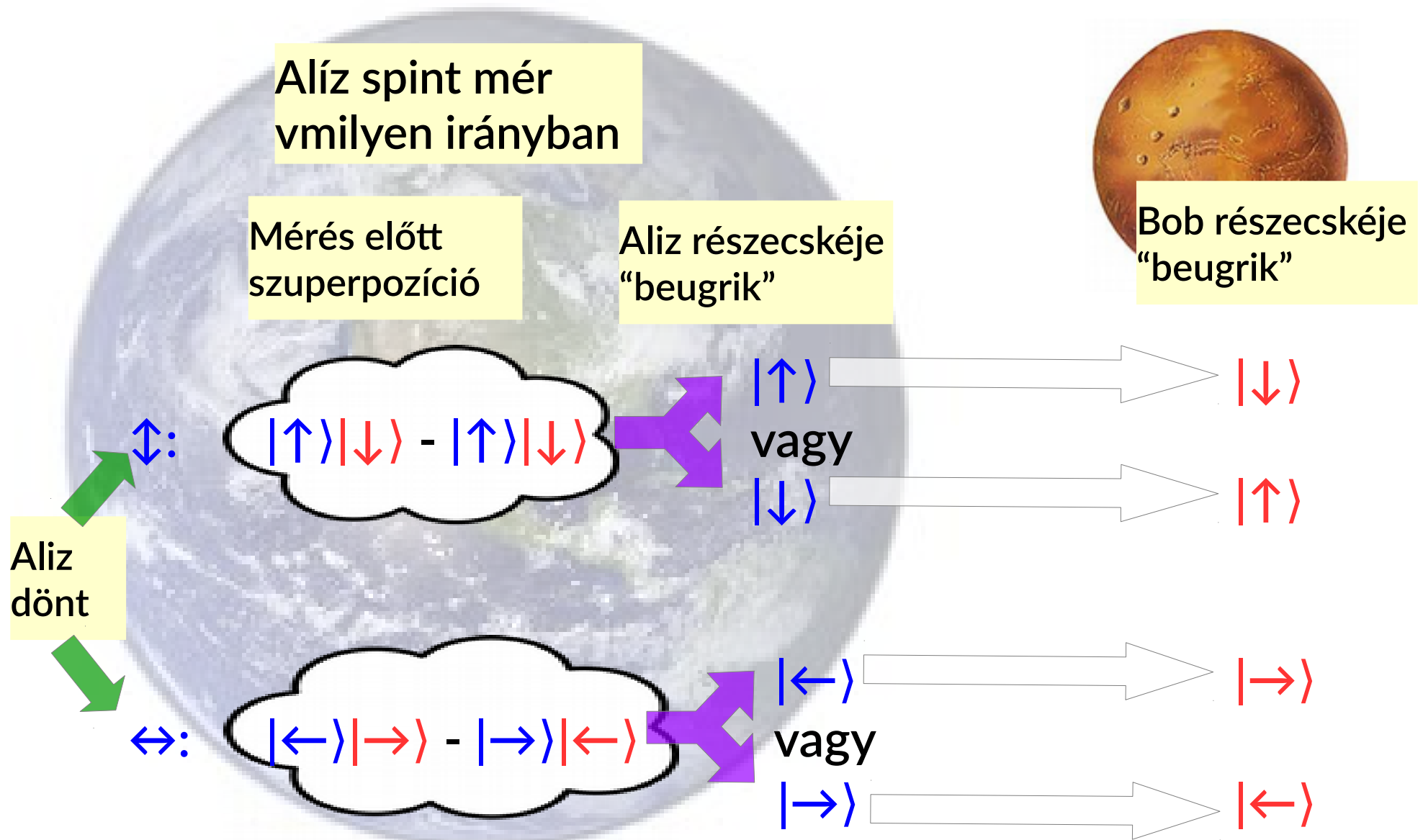
$$\begin{aligned} |\leftarrow\rangle|\rightarrow\rangle - |\rightarrow\rangle|\leftarrow\rangle &= (|\uparrow\rangle - |\downarrow\rangle) \otimes (|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) \\ &\quad - (|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) \otimes (|\uparrow\rangle - |\downarrow\rangle) = \\ &= |\uparrow\rangle|\uparrow\rangle + |\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle - |\downarrow\rangle|\downarrow\rangle - \\ &\quad - |\uparrow\rangle|\uparrow\rangle + |\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle|\downarrow\rangle \\ &= |\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle \end{aligned}$$

1935, Einstein – Podolsky – Rosen gondolatkísérlete:  
... 2. küldjük az egyiket a Földre Alizhoz,  
másikat a Marsra Bobhoz...

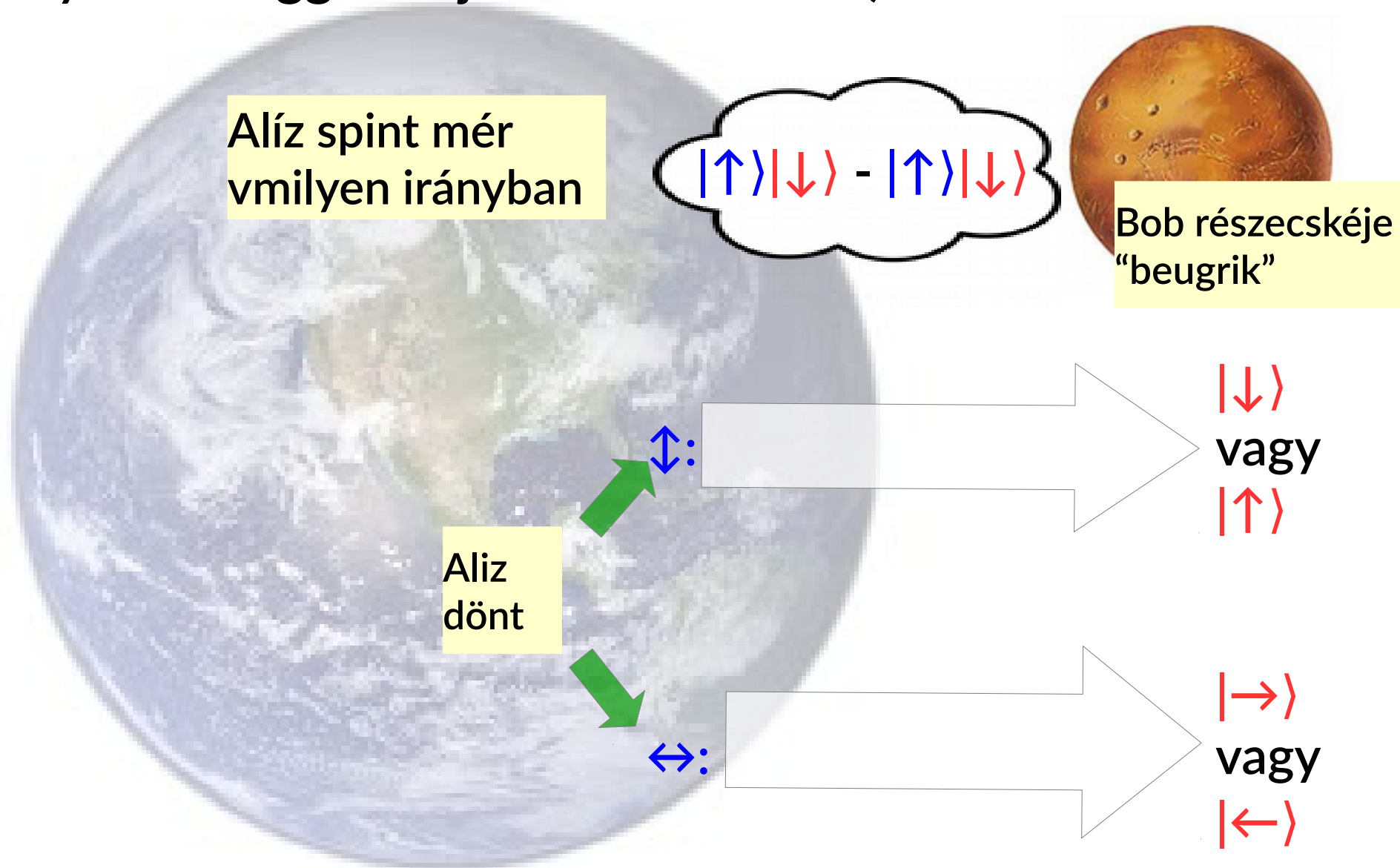


$$|\leftarrow\rangle|\rightarrow\rangle - |\rightarrow\rangle|\leftarrow\rangle = |\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\uparrow\rangle|\downarrow\rangle$$

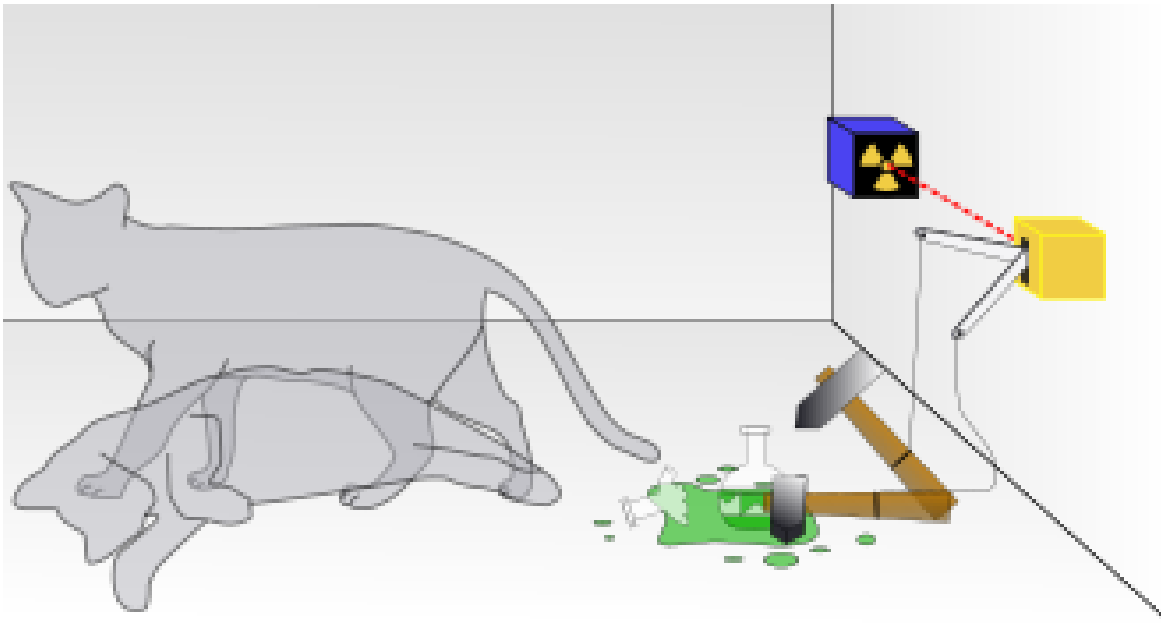
1935, Einstein – Podolsky – Rosen gondolkísérlete:  
Ha a Földön Alíz megméri a részecskéje spinjét,  
a Marson Bob részecskéje “beugrik” ellentétes spinbe



1935, Einstein – Podolsky – Rosen gondolatkísérlete:  
Einstein: Ez abszurd, Bob választása a Földön nem  
okozhat azonnali változást a Marson (legfeljebb  
fénysebességgel terjednek a hatások)



# 1935: a friss Nobel-díjas Schrödinger elnevezi ezt a “távirányítást” összefonódásnak



1935: levelezés Einsteinnel,  
“verschränkung” → entanglement



1933: a kvantummechanikát  
Megalapozó Schrödinger-egyenletért

1935: Schrödinger macskája

[E. Schrödinger, "Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik",  
Naturwissenschaften 23: pp.807-812; 823-828; 844-849 (1935)]

# 1935-: A fizikusok nem filozófusok

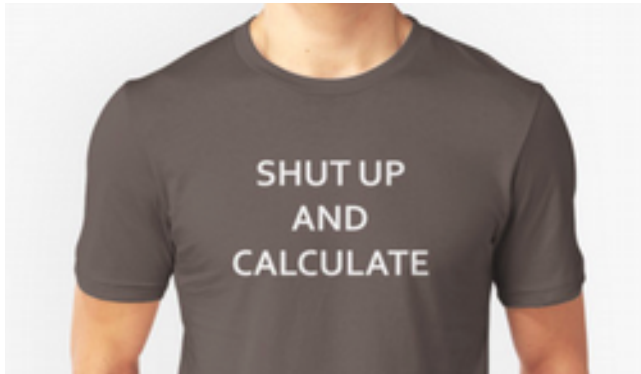


David Mermin (1989):

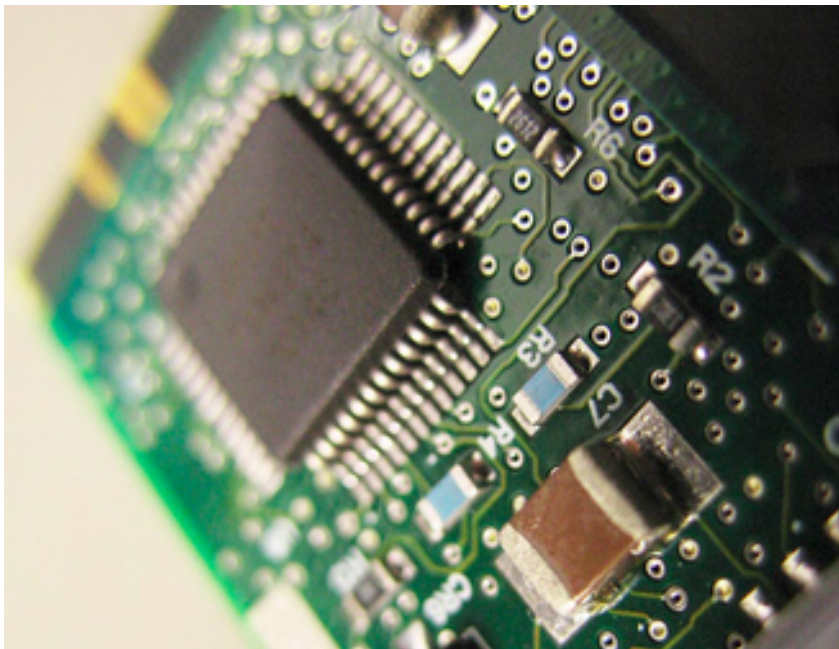
“A kvantummechanika koppenhágai értelmezését egy mondatban így foglalnám össze:  
-Fogd be a szád és számolj!”



# 1935- Filozófiai nehézségek ellenére a kvantummechanika a modern tudomány és technológia alapja



R. Feynman:  
Kvantum-  
elektrodinamika,  
1965 🏆



J. Bardeen:  
Tranzisztor  
1956, 🏆  
Szupravezetés  
1972 🏆

Eddig itt tartunk:

A kvantummechanika működik,  
bár filozófiai alapjai ingatagok.

Azt, hogy probléma van, leginkább az  
összefonódás mutatja.

De ez nem olyan jelenség, amit ki lehetne  
mérni → nem fizikai probléma, csupán  
metafizikai.

# III. Kísérleti metafizika: A Bell-egyenlőtlenség

# 1964: Bell északír fizikus megmutatja, hogyan lehetne kimérni az összefonódást

1964: Bell a CERN elméleti osztályról sabbaticaljét tölti

$$C_h(a, b) + C_h(a, b') + C_h(a', b) - C_h(a', b') \leq 2$$



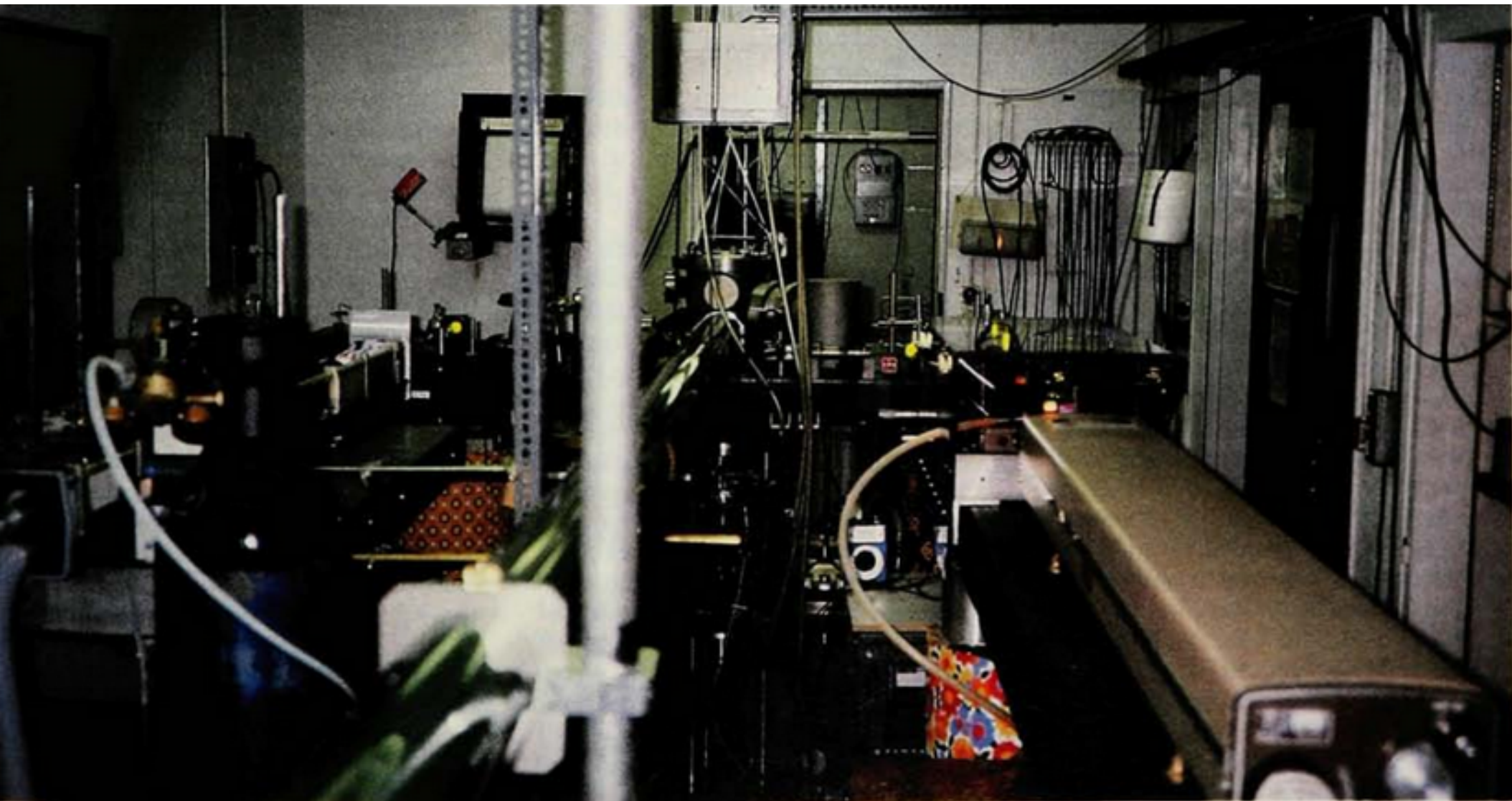
Alíz dönt:      a = x-tengely  
                    a' = z-tengely



Bob dönt:  
b = ferde tengely  
b' = másik ferde tengely



# 1984, Aspect, Párizs: a Bell-egyenlőtlenség első komoly kísérleti tesztje



# Kísérleti metafizika: Bújócska

1997, *Zeilinger*, Innsbruck: fotonok,  
kampusz két végén detektálva  
Szigorúan lokális kísérlet  
Statisztikus kibúvó?



2001, *Wineland*, Colorado:  
csapdázott Be-ionokkal:  
Statisztikus kibúvó kizárva.  
Lokalitás kibúvó?



2012

# 2015: statisztikus és lokalitás kibúvók egyszerre kizárva

Kísérleti versenyfutás, “loophole-free Bell test”

- Hanson, Delft [Nature, Oct 29 2015]
- Shalm, Colorado [Phys. Rev. Lett., Dec 18 2015]
- Zeilinger, Bécs [Phys. Rev. Lett., Dec 18 2015]

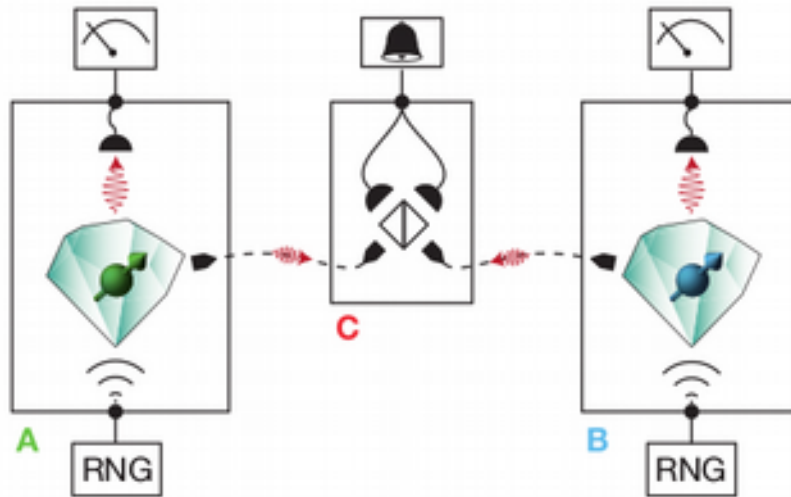
## Viewpoint: Closing the Door on Einstein and Bohr’s Quantum Debate

**Alain Aspect**, Laboratoire Charles Fabry, Institut d’Optique Graduate School, CNRS, Université Paris-Saclay, Palaiseau, France

December 16, 2015 • *Physics* 8, 123

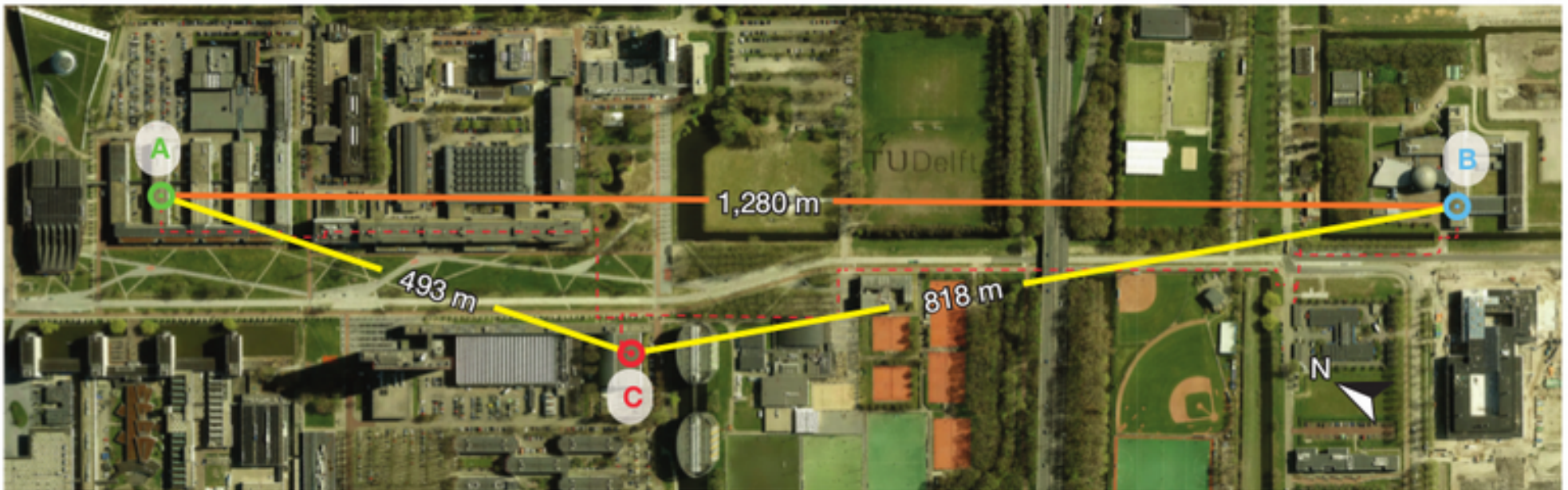
By closing two loopholes at once, three experimental tests of Bell’s inequalities remove the last doubts that we should renounce local realism. They also open the door to new quantum information technologies.

# Hanson kísérlete Delftben



Fotonforrás: Nitrogén-vakancia centrum gyémántban

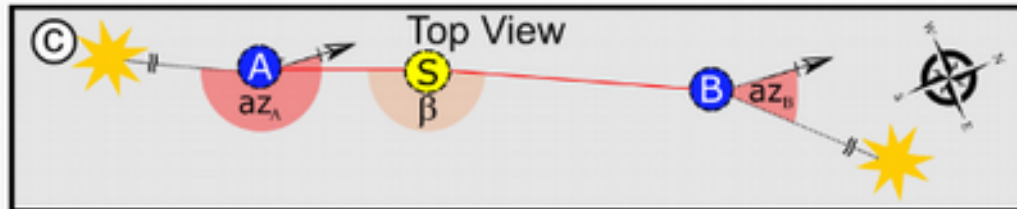
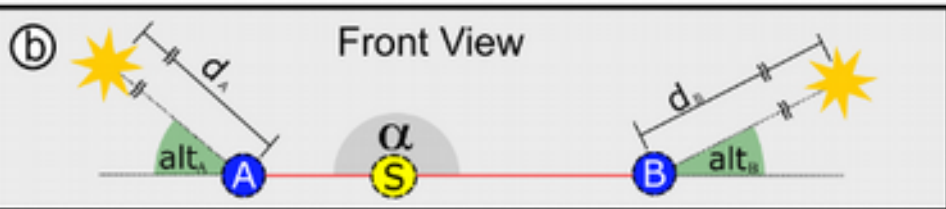
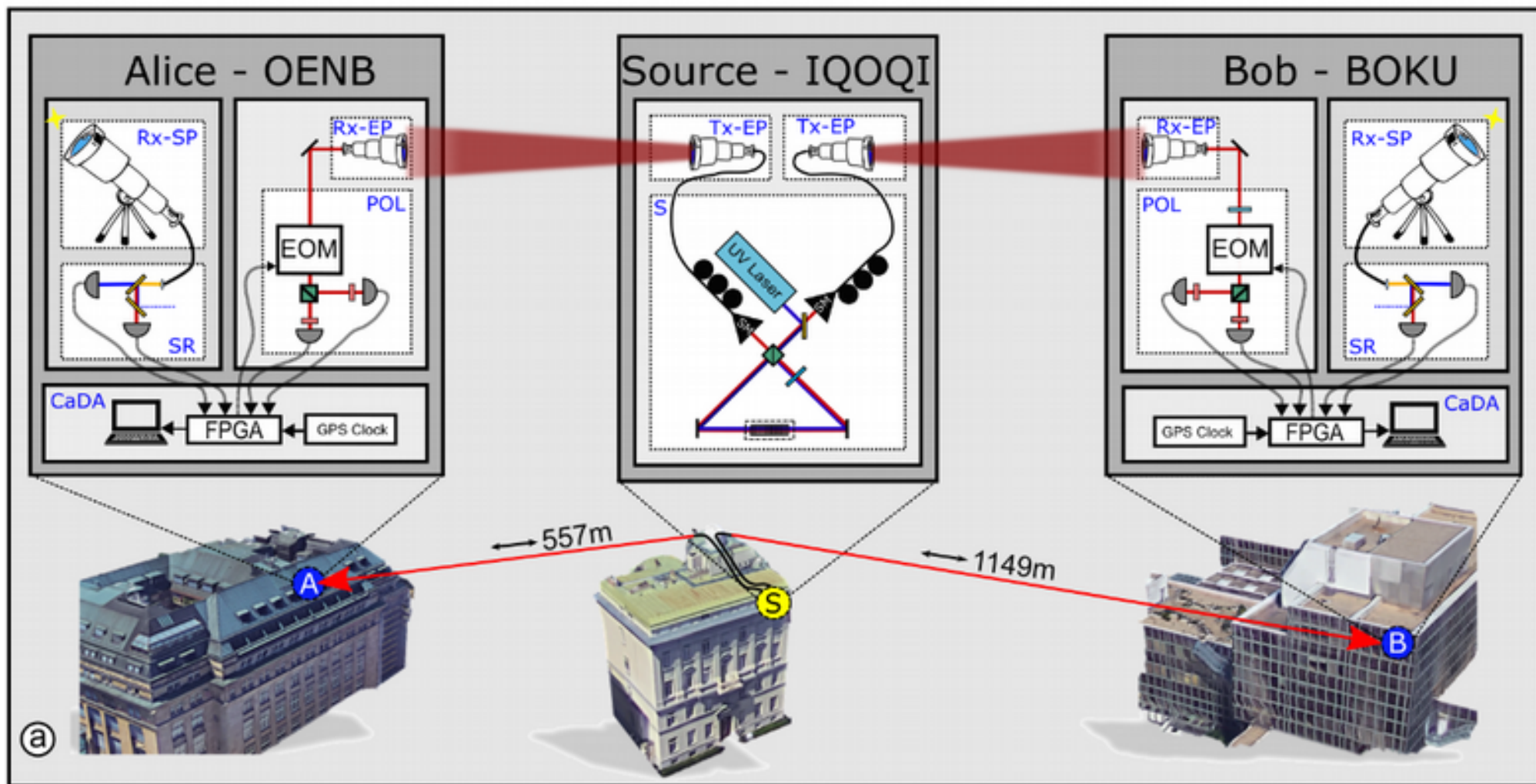
RNG = gyors, kvantumoz véletlenszám-generátor





**Mi van a szabad akarattal?**

# 2016, Zeilinger: Bell-egyenlőtlenség kozmikus fotonokkal



**Eddig itt tartunk:**

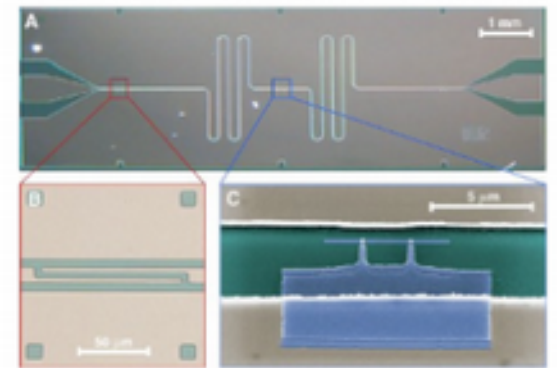
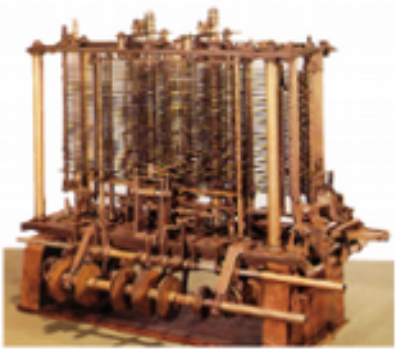
**A természet nem írható le lokális változókkal.**

**Ezt kísérletileg igazoltuk.**

**Az összefonódás valamilyen “kísérteties távolhatás”.**

# IV. Az összefonódás a kvantumtechnológia alapja

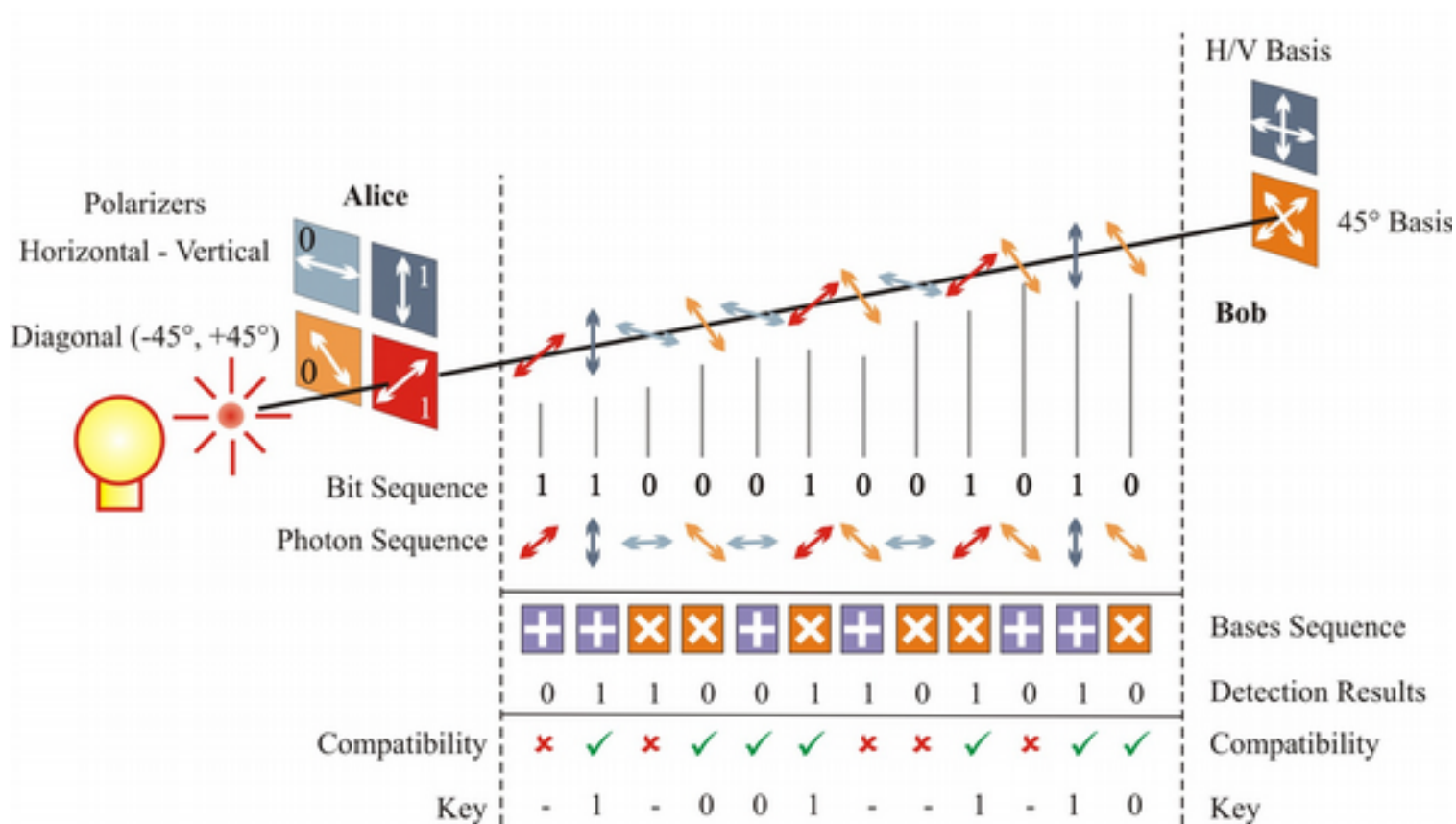
# Kvantummechanika “filozófiai nehézségére” építő technológia = kvantumtechnológia



# 1984, Bennett&Brassard: Kvantumbiteken alapuló titkosítás

Charles Bennett, IBM (1943-)

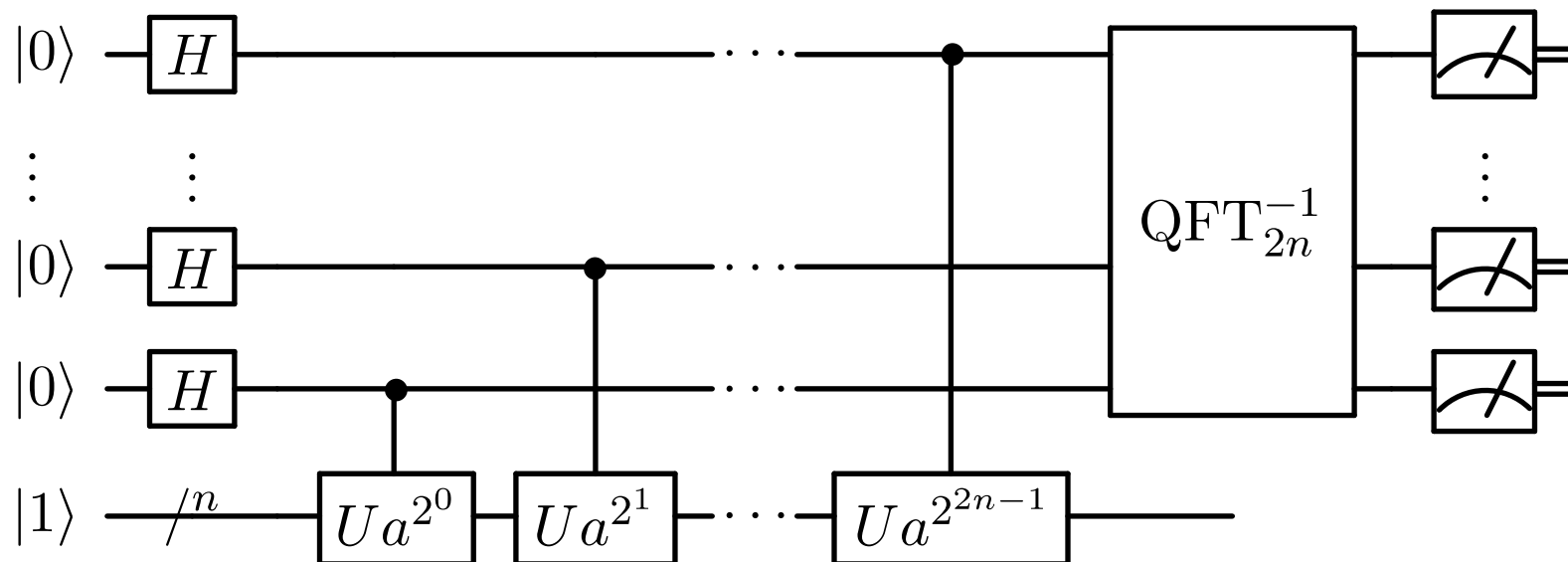
- 1972→ információelmélet
- 1984: BB84, első kvantum titkosítási protokoll
- 1993: kvantumteleportáció



# 1994, Shor: Ha lenne kvantumszámítógép, gyorsan tudna prímtényezőkre bontani

Peter Shor, MIT (1959-)

- 1994: prímtényezőket találó kvantum algoritmus
- 1996: kvantum hibajavítás

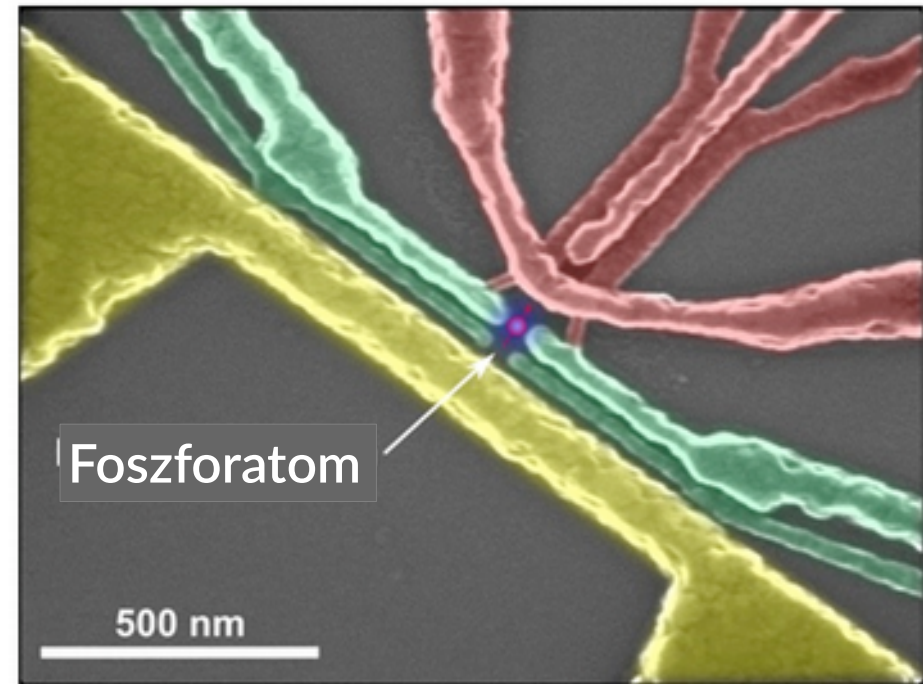


# Még nem tudni, milyen hardver lesz a kvantumszámítógép

Chris Monroe, USA,  
Joint Quantum Inst.:  
csapdázott ionok

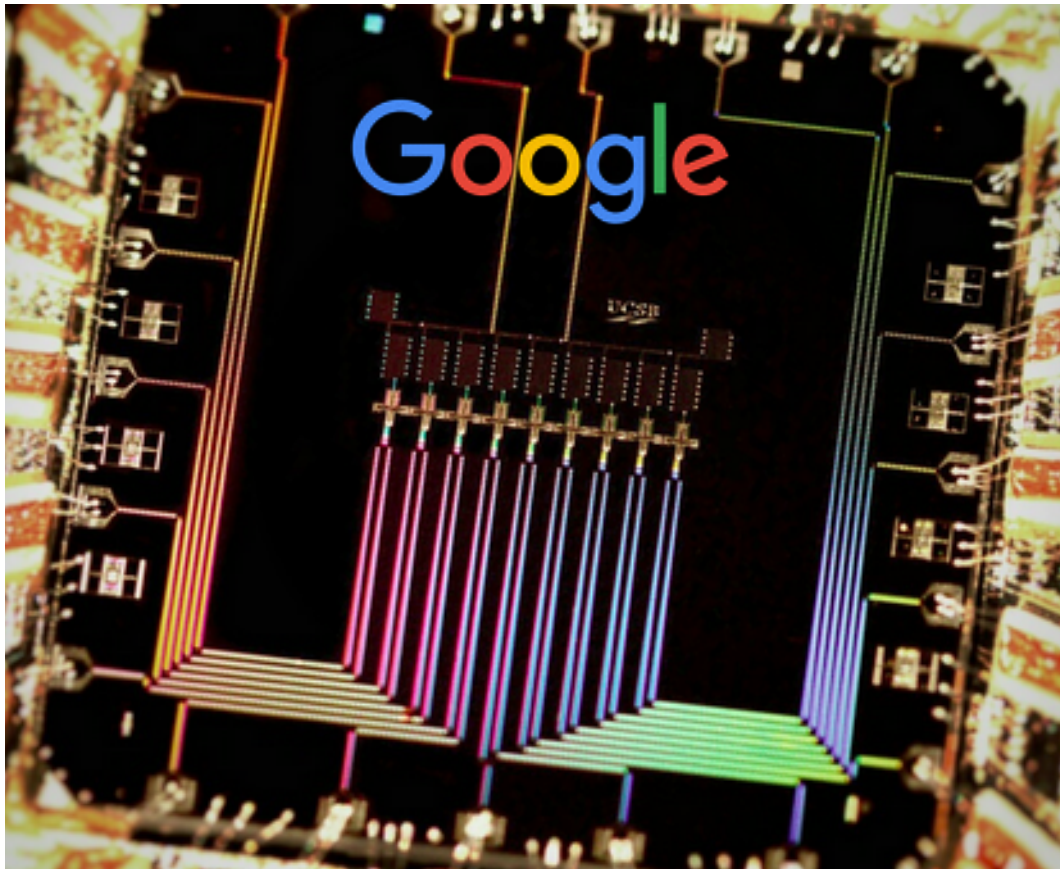


Ausztrália (UNSW):  
szilíciumba ültetett  
foszforatom magspinje

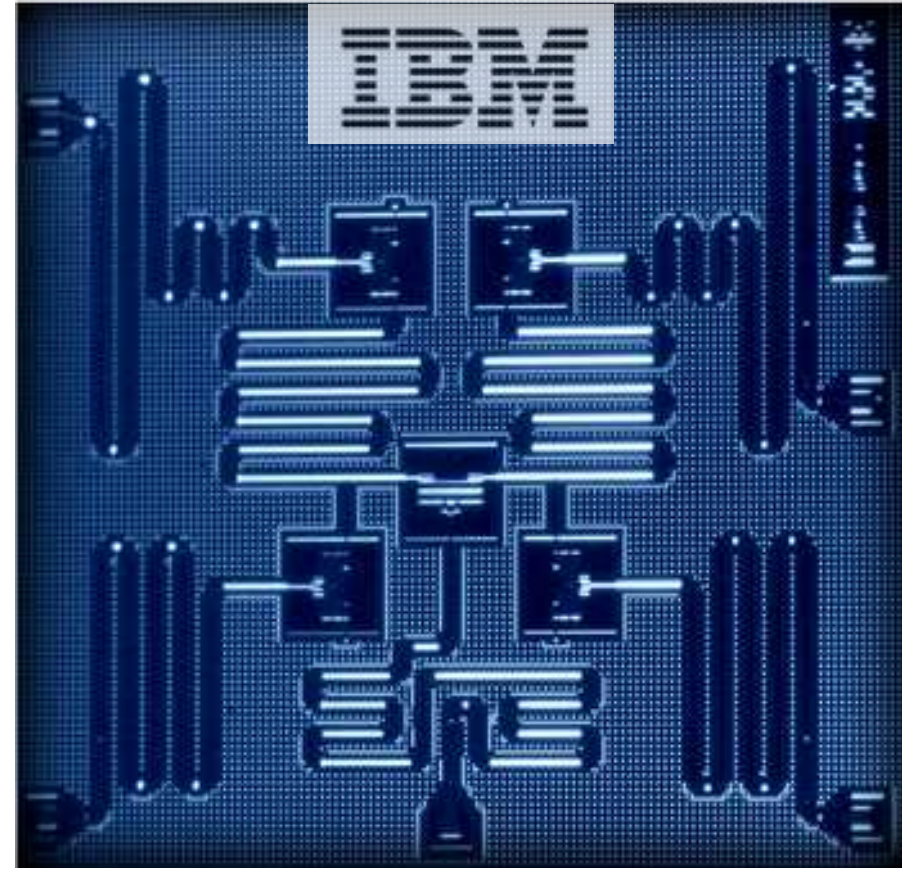




# Az ipari szereplők szupravezető áramkörökből akarnak kvantumszámítógépet



John Martinis, UCSB+Google  
9 kvantumbit

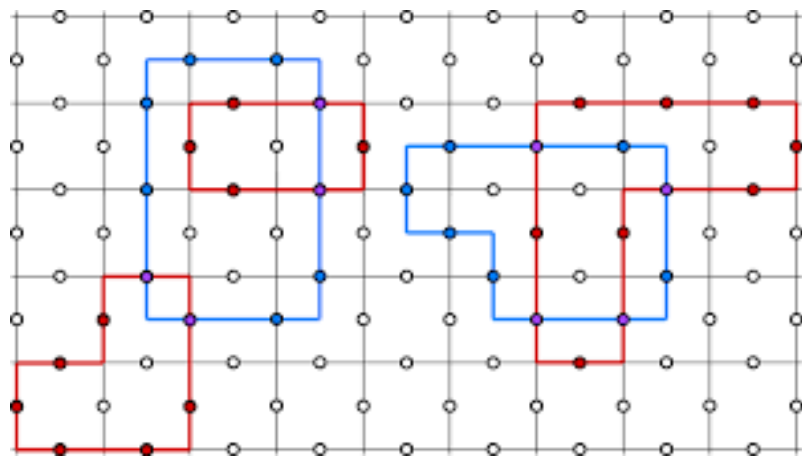


Jay Gambetta, IBM Q  
5 kvantumbit  
online: Quantum Experience

# Bármiből lesz a hardver, a kvantumszámítógép összefonódást fog használni

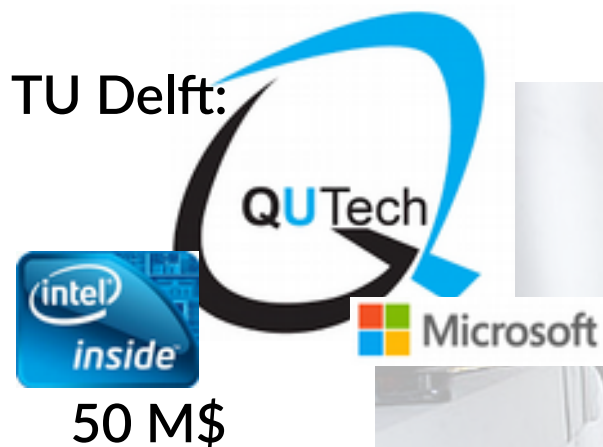
Alexei Kitaev, Caltech (1963-)

- 1997: összefonódással “elrejtteni” a kvantuminformációt  
= topologikus kvantumszámítógép
- 1999-2001: Microsoft, 2002- : Caltech
- 2012: Fundamental Physics Prize, 3M\$



# Az Európai Unió és Magyarország külön pályázatokkal erősíti a versenyt

Vezető európai csoportok:

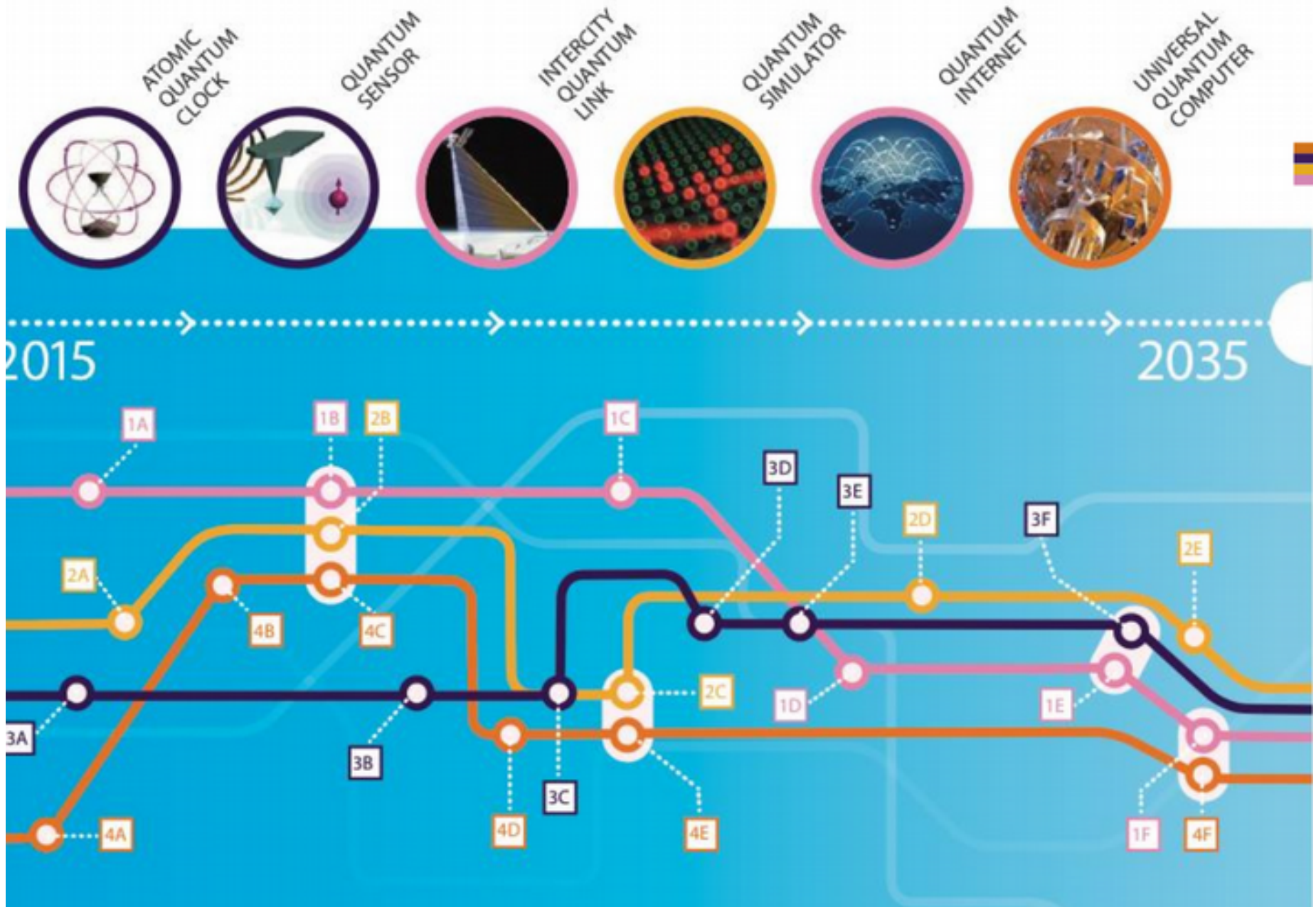


Koppenhága:



2018 -	EU QuantERA	-	34 millió €/4 év
2018 ?-	EU Quantum Technology Flagship	-	1000 millió €/10 év
2017 -	Magyar Kvantumtechnológia Program	-	12 millió €/4 év

# Az európai Quantum Technology Flagship fejlesztési terve: ambíciózus, de ez a jövő



# Összefonódás: filozófiai kuriózumtól az új technológia alapjáig

- Természetben elemi bitek vannak, pl. ezüstatom
- Kvantumbitek, furcsa tulajdonságokkal
- Összefonódás: távoli bitek közötti kapcsolat
- Összefonódás kísérletileg igazolva
- Összefonódás a kvantumszámítógép alapja

