

Kvantumos összefonódás: A 2022-es fizikai Nobel-díj

Asbóth János

BME TTK Elméleti Fizika Tanszék,
HUN-REN Wigner FK,

Kvantumoptika és Kvantuminformatika Osztály



BME Kvantummechanika 1, Budapest, 2024. május 22.

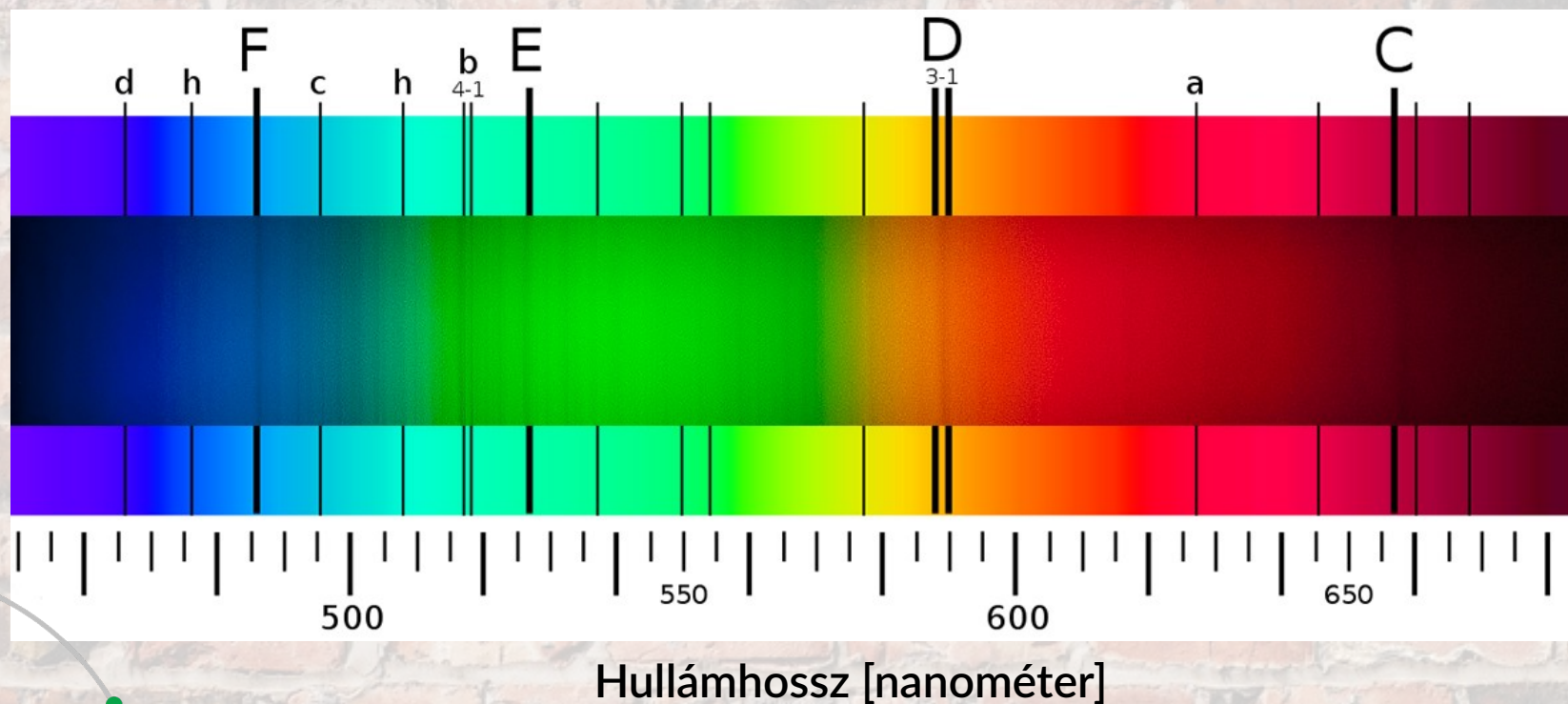
Hol van a kutyám, amikor nem látom? Tárgyállandóság



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



1913: Bohr atommodellje megmagyarázta a Nap színeképében lévő tiltott vonalakat



$n = 3$

$n = 2$

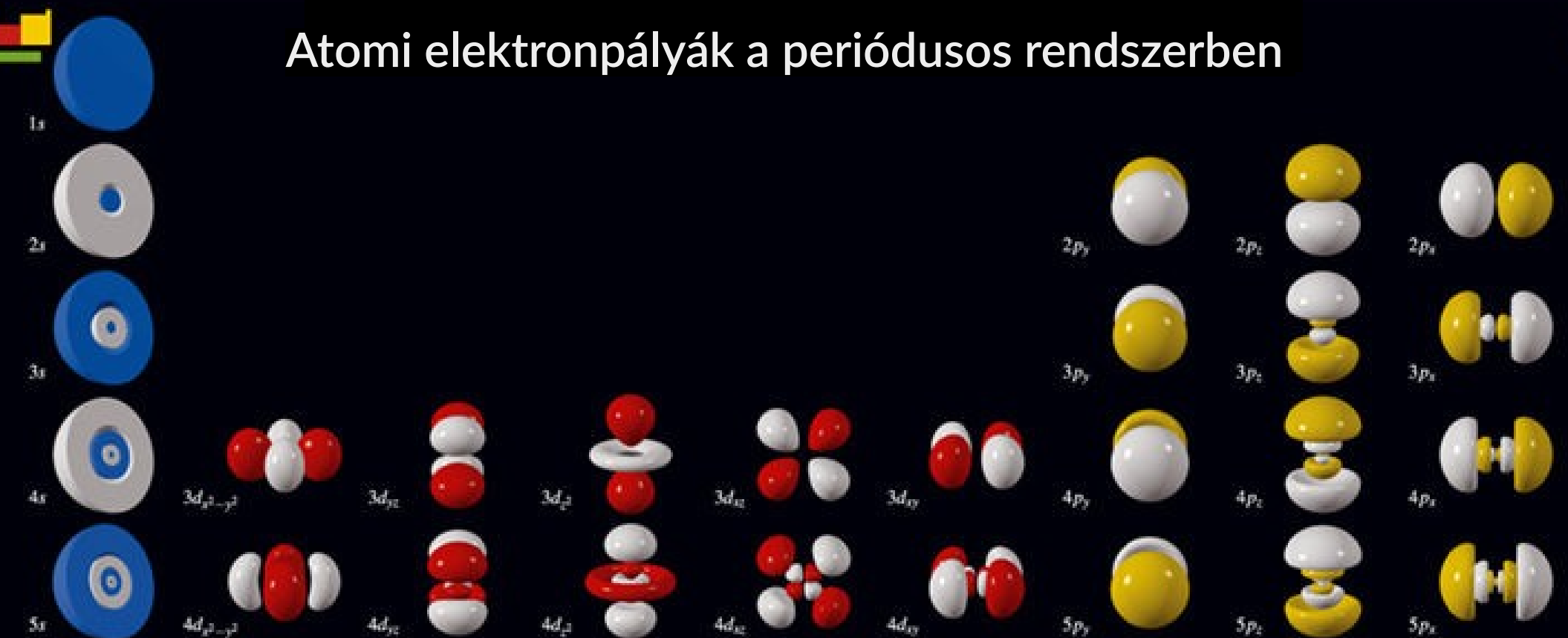
$n = 1$

$+Ze$

$\Delta E = hf$

De mi dönti el, merre állnak az atomi pályák?

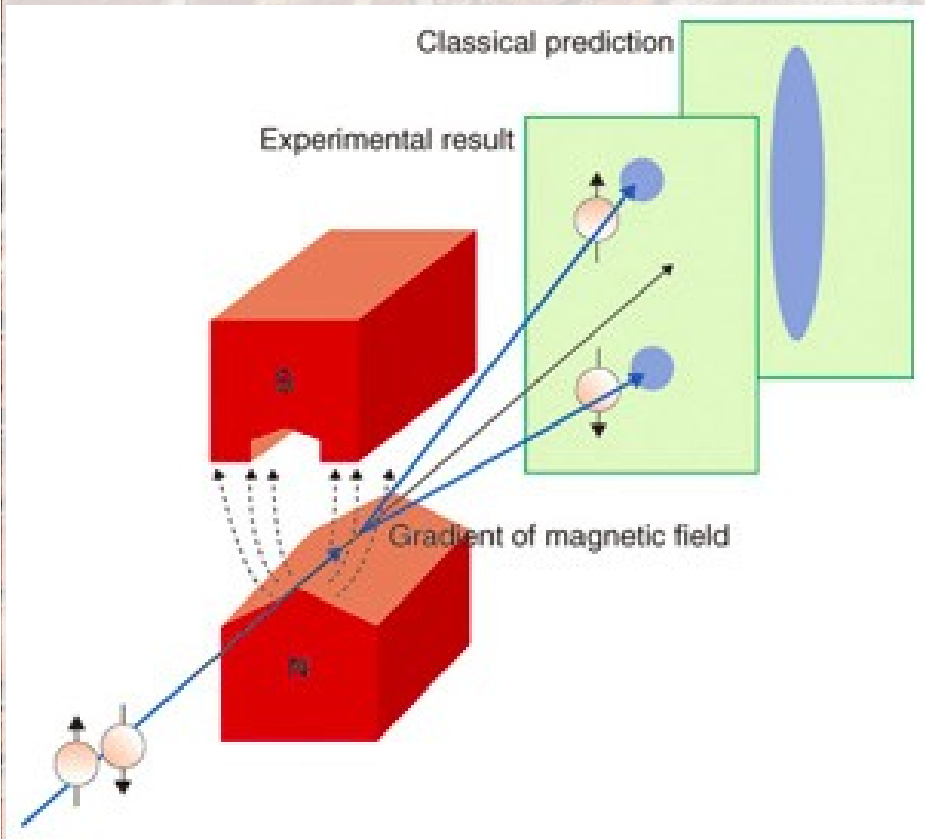
Atomi elektronpályák a periódusos rendszerben



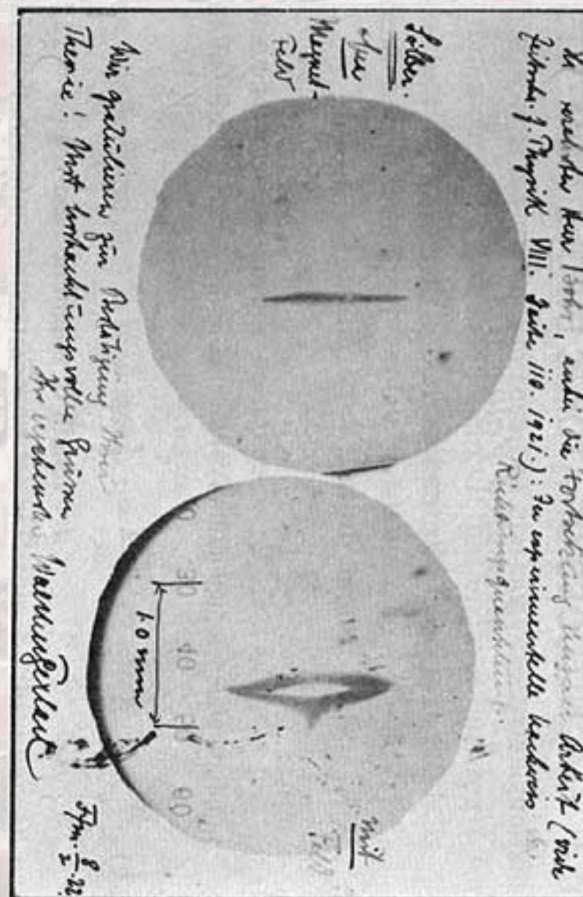
Forrás: <https://winter.group.shef.ac.uk/orbitron/>

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

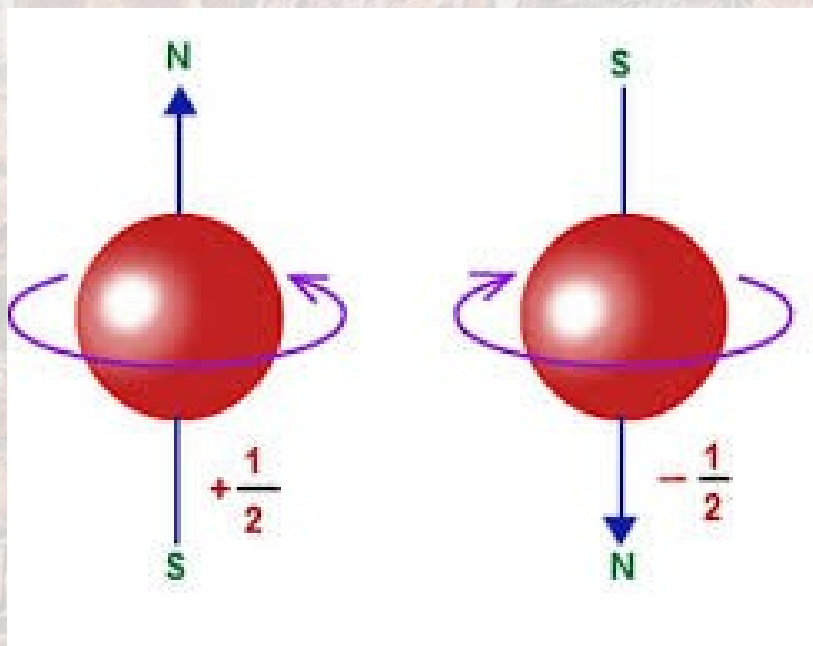
Anyagi támogatás:
Henry Goldman (Goldman-Sachs egyik alapítója)



Levelezőlap, Gerlachtól Bohrnak



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



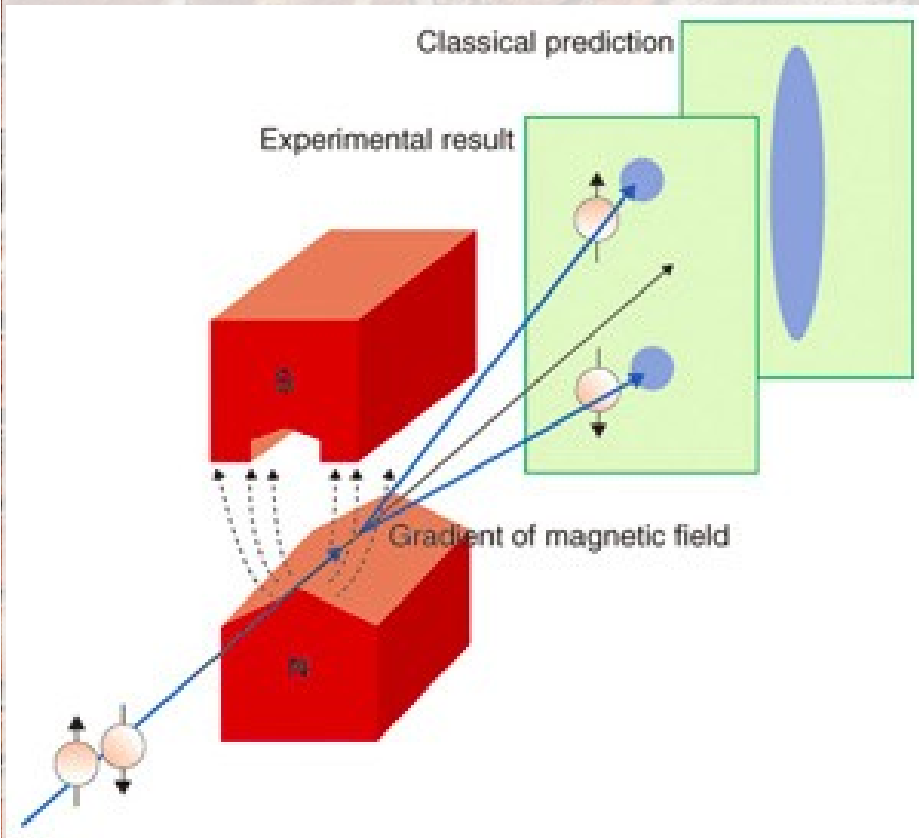
Egyszerűsített jelölés:

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

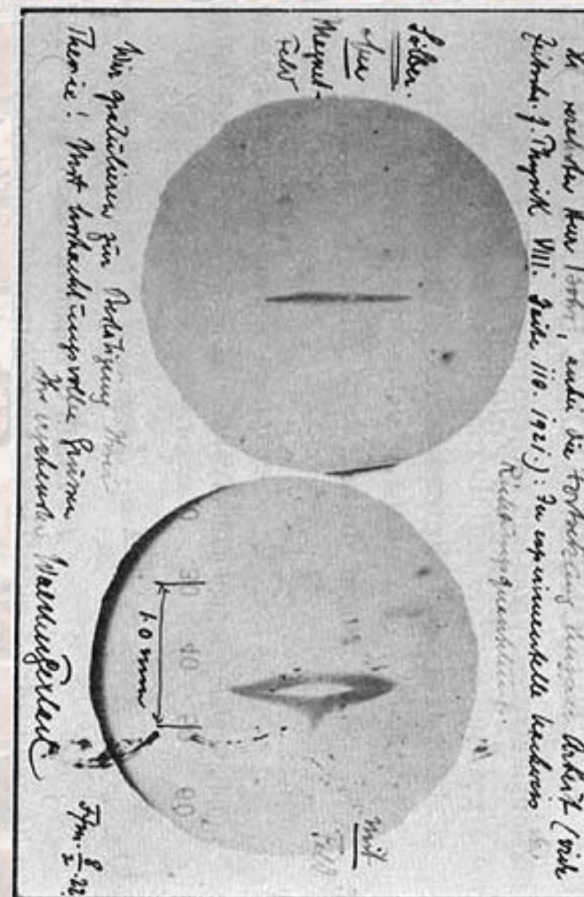


1944: Nobel-díj Sternnek, Gerlach kimarad
(nemzetiszocialista rezsimmel való együttműködés)

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

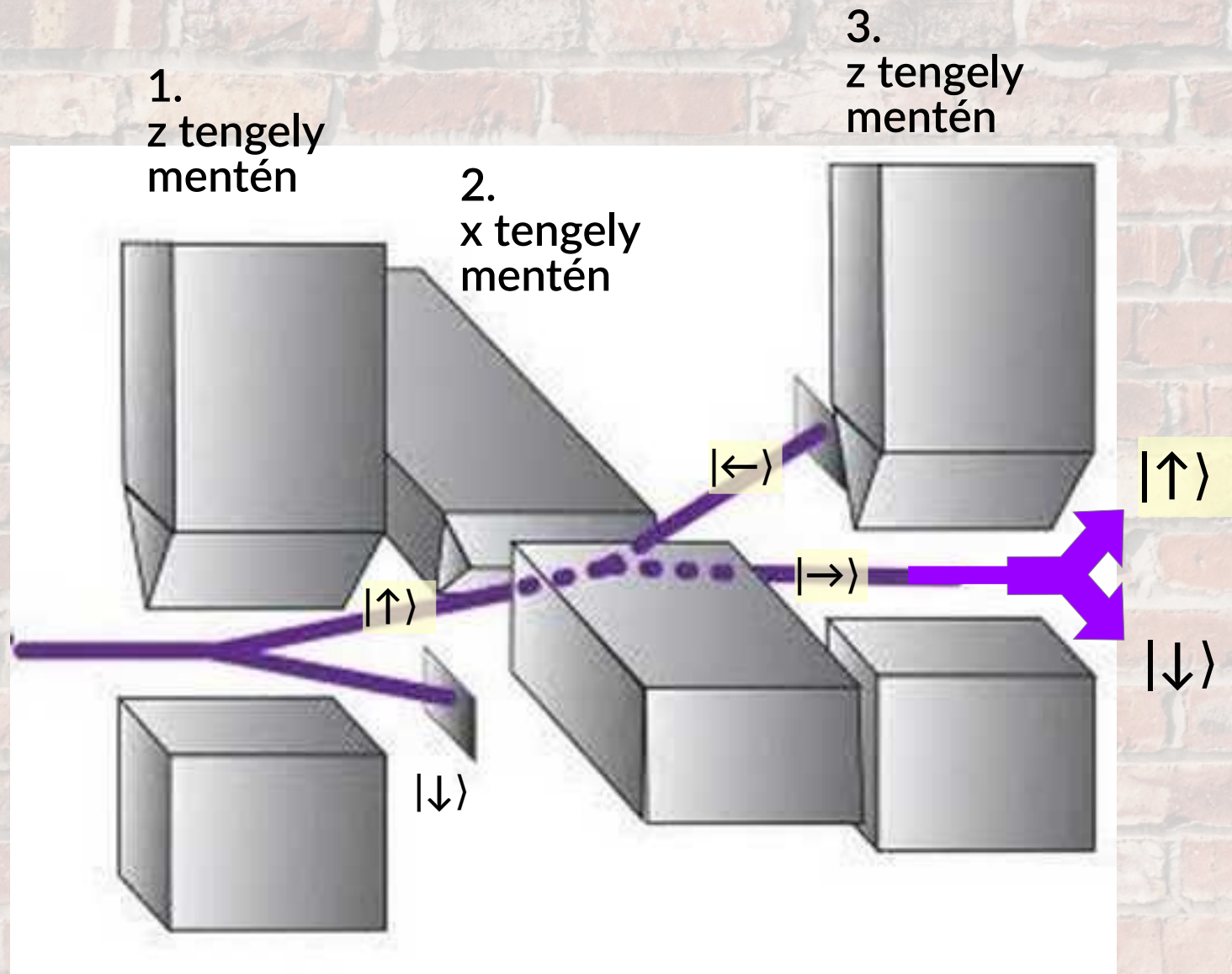


Anyagi támogatás:
Henry Goldman (Goldman-Sachs egyik alapítója)



Levelezőlap, Gerlachtól Bohrnak

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



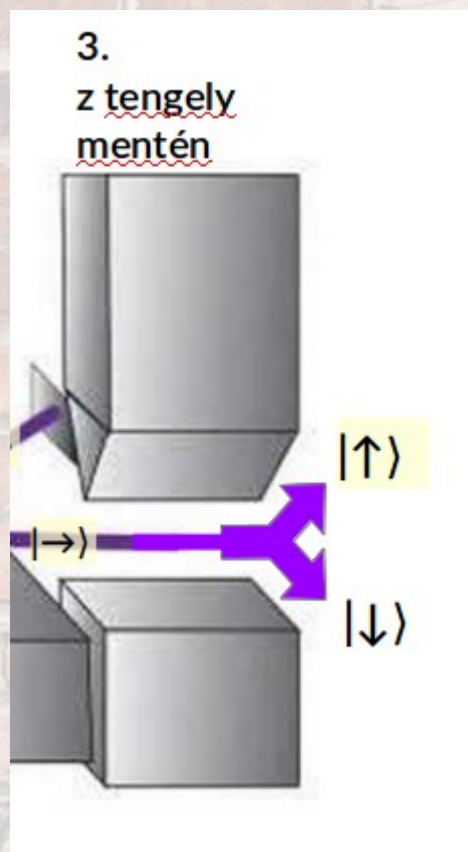
A spin bármerre állhat, de ha megmérjük, két opció között dönt: elemi bit

Mérés előtt:
szuperpozíció

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

Relatív fázis

Mérés



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 filozofálgatás,
az elmélet helyesen jósolja a kísérletet,
csak ez számít
→ *pragmatizmus*

Eddig itt tartunk:

Spin: mérésben kétértékű - elemi bit

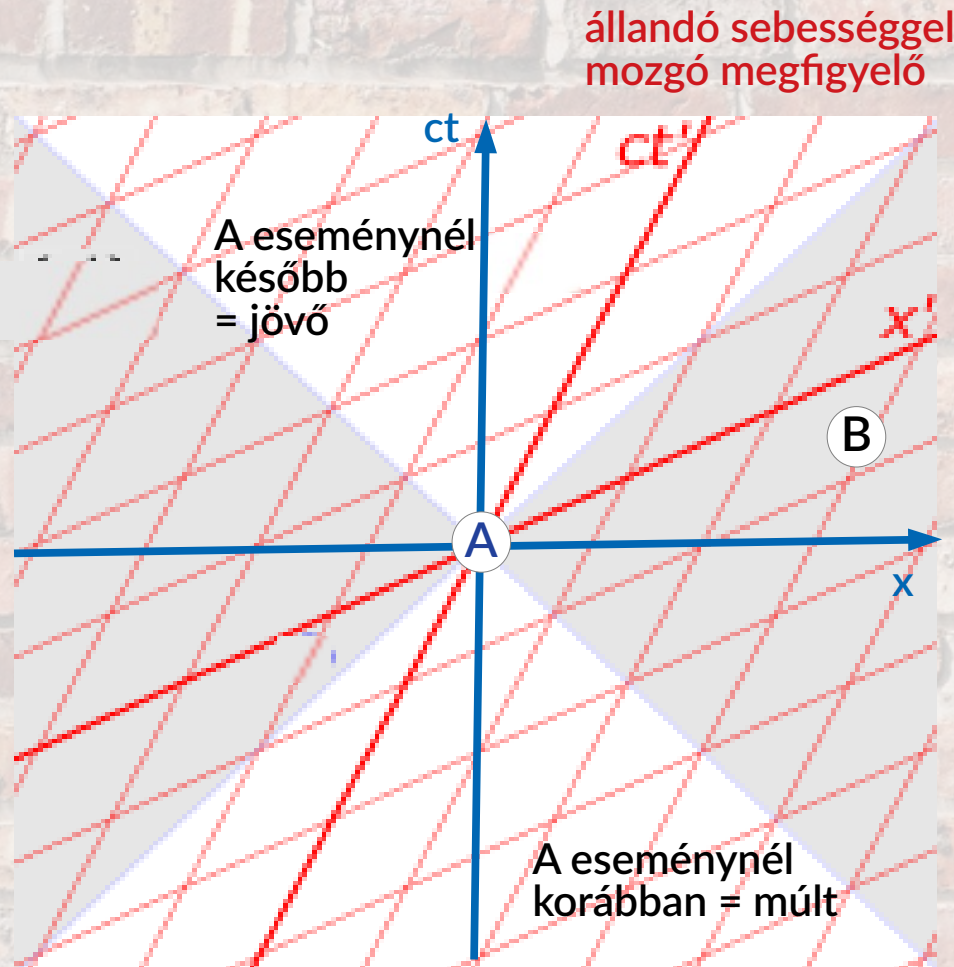
Milyen tengely mentén: mérés dönti el

A mérőberendezéssel döntésre kényszerítjük a részecskét

Részecskének nem lehet “szabad akarata” → ?

Einstein, 1935:
Válasszuk szét a mérésről szóló döntést
a mérés eredményéről szóló döntéstől!

Bármilyen jel legfeljebb fénysebességgel terjedhet, különben nem lenne egyértelmű, ki küldi és ki fogadja a jelet



ha B esemény az A esemény
fénykúpjain (jövő és múlt) kívül
van = A&B térszerűen szeparált

→ B lehet A előtt vagy után,
megfigyelőtől függ

→ A nem lehet B oka,
se B okozata



Einstein 1905

1935, Einstein – Podolsky – Rosen gondolatkísérlet:
Két részecskét összefonunk, eltávolítunk: egyikén helyet vagy
impulzust mérünk, a másikról is megtudjuk.
→ kell legyen valami rejtett valóság (vagy távolhatás lenne).

MAY 15, 1935

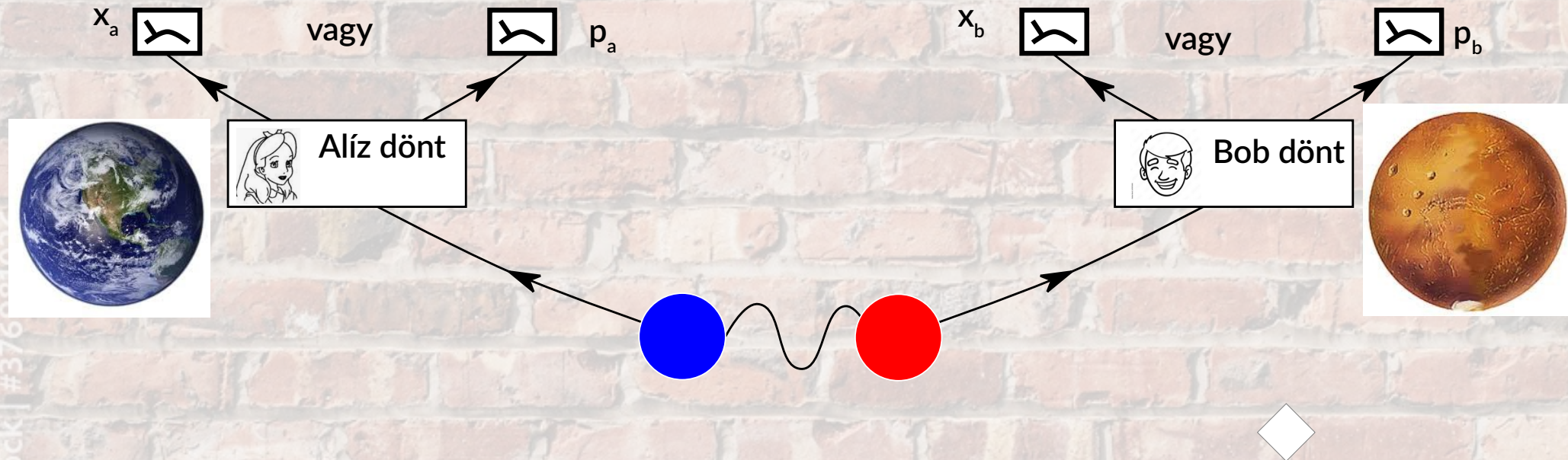
PHYSICAL REVIEW

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)



Alíz és Bob mérései “egyszerre”, távol történik - térszerűen szeparáltak.
Ez kizárja, hogy egymásra hatással legyenek.

1935: Einstein – Podolsky – Rosen gondolkísérlete. Összefonódás → már a mérés előtt beugrasztunk

MAY 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

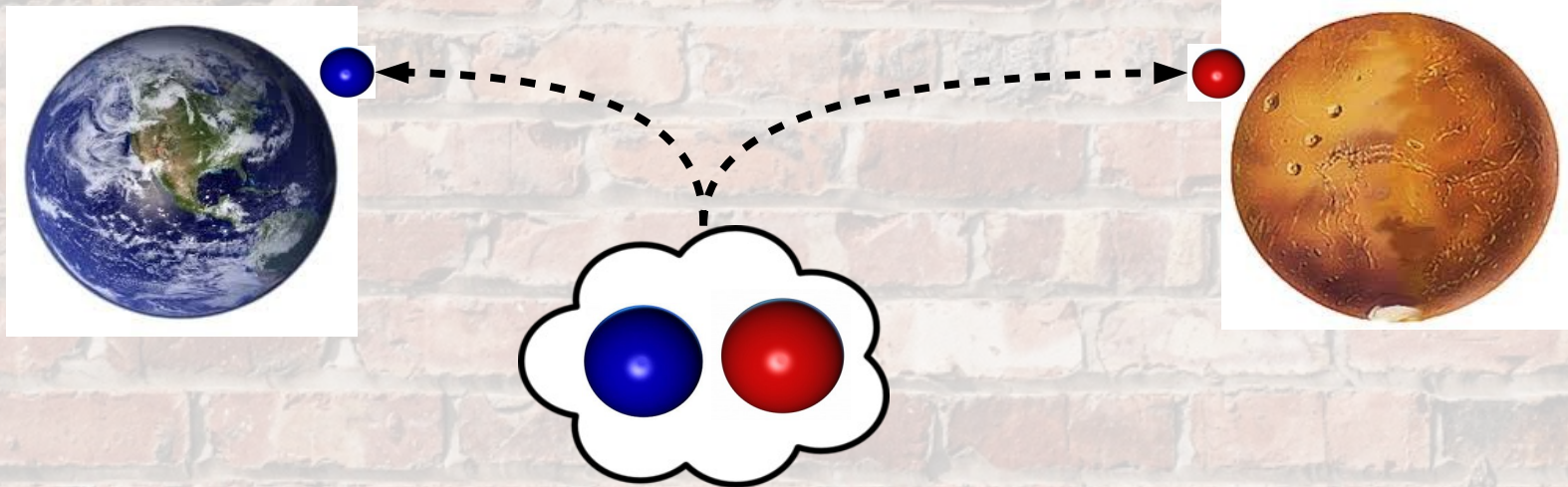
VOLUME 47

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

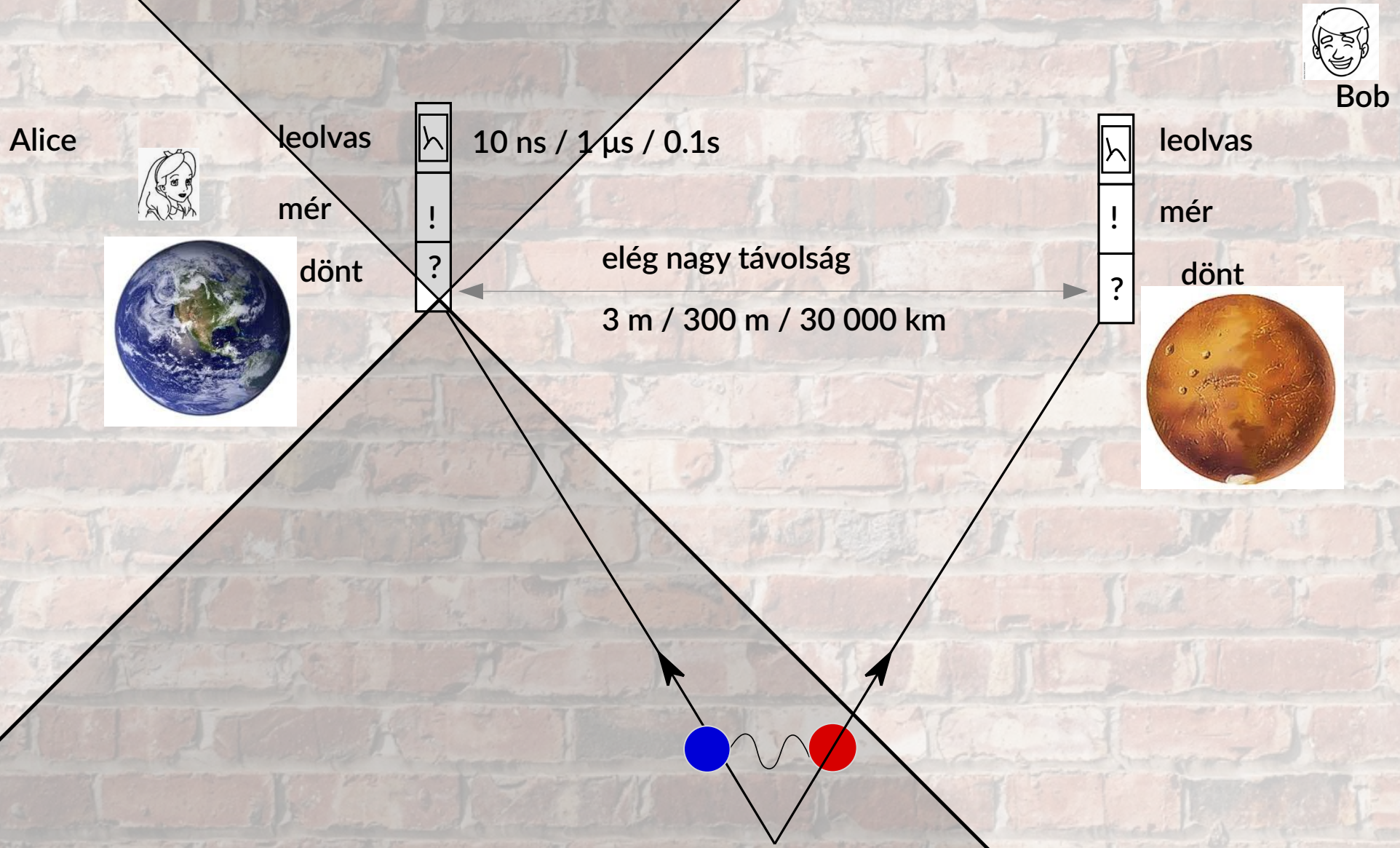
A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

1. Egy doboz helyett kettő, egy-egy macskával részecskével kvantumosan összefonva
→ a részecskék helye és impulzusa is teljesen korrelált véletlen
2. Egyik doboz a Földre, másik a Marsra
3. Földön mérek helyet *vagy* impulzust → Marson hely *vagy* impulzus rögzül, “beugrik”
4. Marson gyorsan mérek helyet *vagy* impulzust.
Összefonódás → ha azt mérem, mint Földön, ugyanazt kell kapjam.
De nincs idő, hogy a földi mérés-választásról infó jusson a Marsra
→ Marson a hely és impulzus is már a mérés előtt fix kellett legyen
5. Heisenberg-féle határozatlanság: ez nem lehet → kvantummechanika nem teljes



EPR gondolkísérlet: hogy kizárhassuk, Alíz mérése hatással van Bobéra, távoli pontokon, gyors mérésekre van szükség. Alíz és Bob spontán, véletlenszerűen kell döntsön. A mérések pontosak kell legyenek.

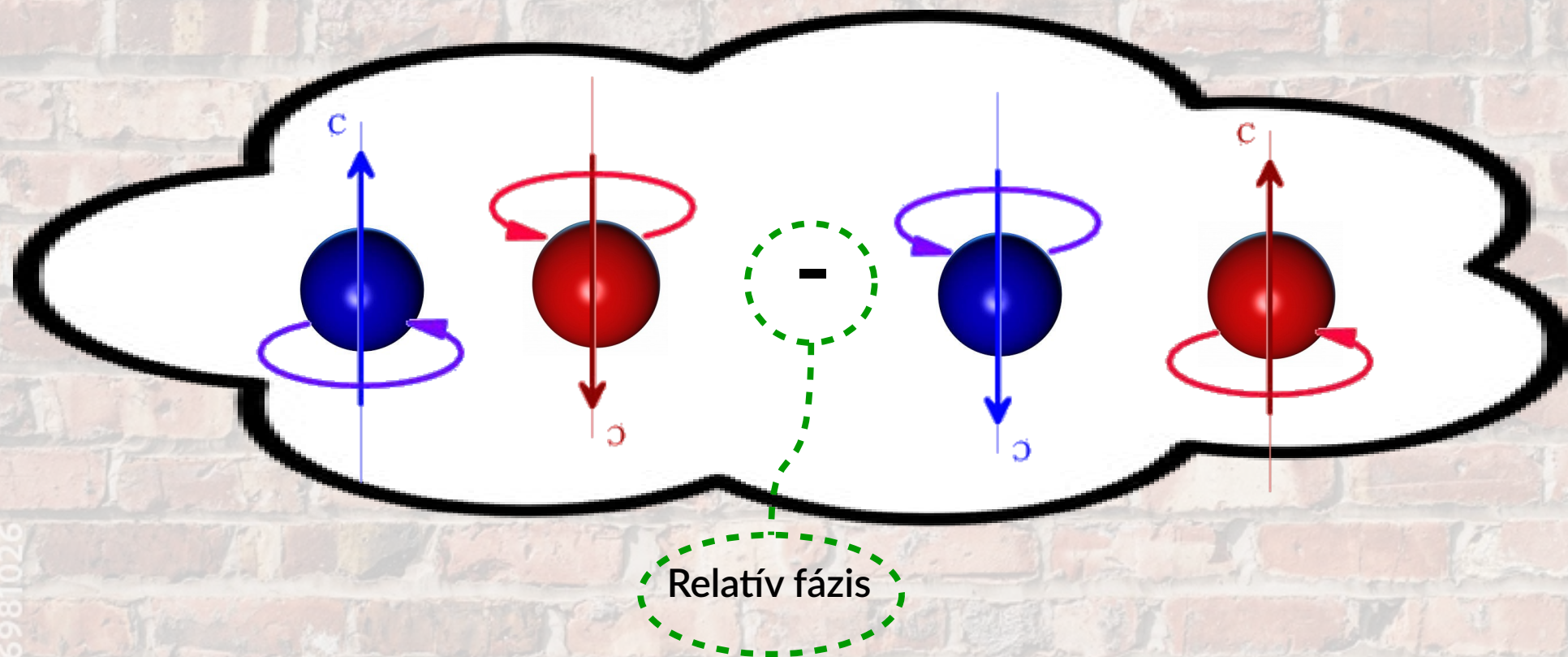




A kvantummechanika mögött valamilyen
mélyebb elmélet van, lokális rejtett változók,
hiszen a “kísérteties távolhatás” abszurd.

Nincs gond a kvantummechanikával.
Ne törődj ilyen filozofikus hülyeséggel!
Fogd be a szád, és számolj!

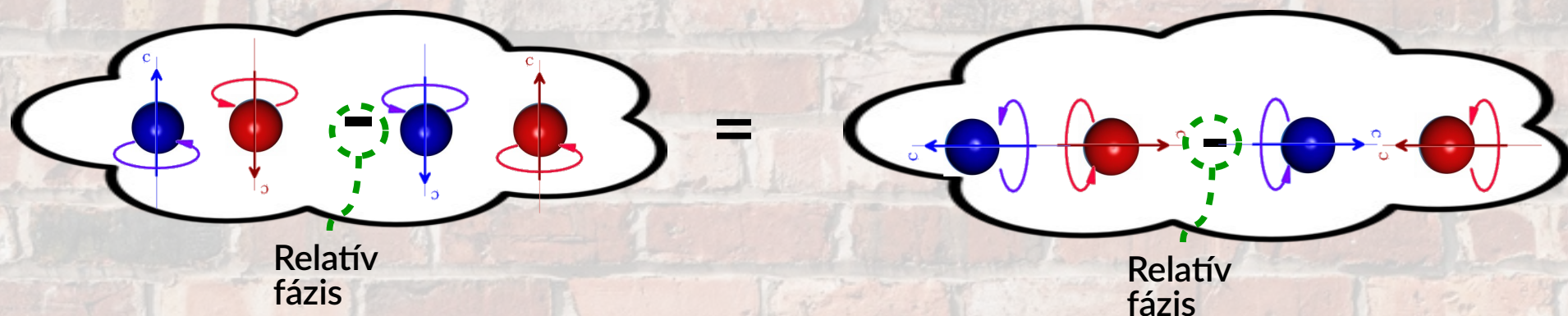
1951: Bohm átfogalmazza az EPR-paradoxont bitekre
1. vegyünk két részecskét, ellentétes spinű állapotok
szuperpozíciójában



Egyszerű jelölés:

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

1951: Bohm átfogalmazza az EPR-paradoxont bitekre
 Különös kvantumos effektus: a két részecske spinje
 ekkor bármely tengely mentén ellentétes



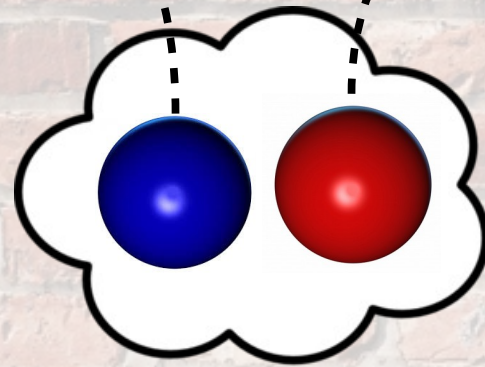
$$\begin{aligned}
 |\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle &= |\leftarrow\rangle|\rightarrow\rangle - |\rightarrow\rangle|\leftarrow\rangle \\
 &= |\uparrow_{\theta\varphi}\rangle|\downarrow_{\theta\varphi}\rangle - |\downarrow_{\theta\varphi}\rangle|\uparrow_{\theta\varphi}\rangle
 \end{aligned}$$

Ez a különös kvantumeffektus általános iskola 4. osztályos
matekkal levezethető

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

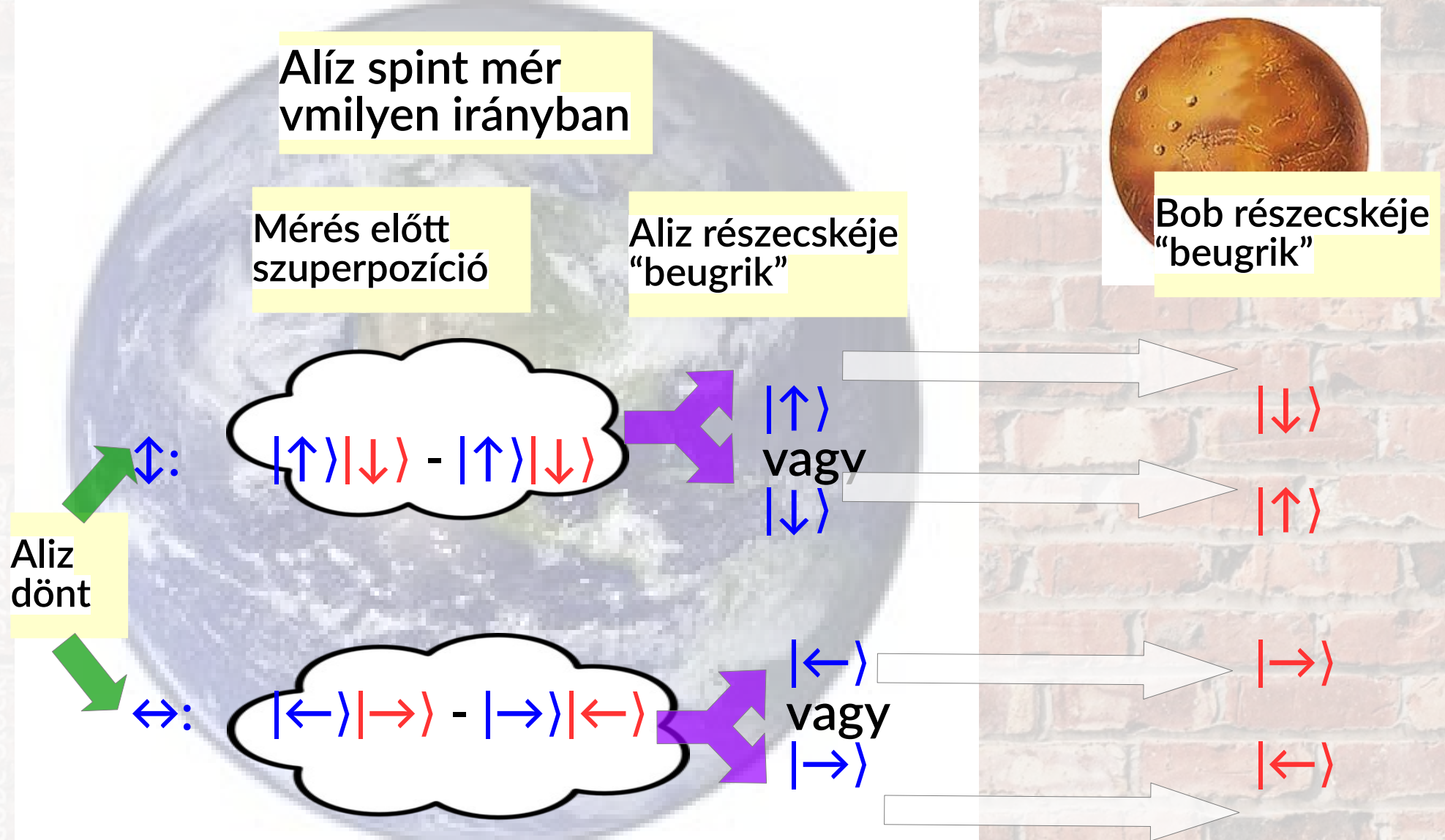
$$\begin{aligned} |\leftarrow\rangle|\rightarrow\rangle - |\rightarrow\rangle|\leftarrow\rangle &= (|\uparrow\rangle - |\downarrow\rangle) \otimes (|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)/2 \\ &\quad - (|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) \otimes (|\uparrow\rangle - |\downarrow\rangle)/2 = \\ &= \frac{1}{2} (|\uparrow\rangle|\uparrow\rangle + |\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle - |\downarrow\rangle|\downarrow\rangle - \\ &\quad - |\uparrow\rangle|\uparrow\rangle + |\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle|\downarrow\rangle) \\ &= |\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle \end{aligned}$$

1951: Bohm átfogalmazza az EPR-paradoxont bitekre
... 2. küldjük az egyiket a Földre Alizhoz,
másikat a Marsra Bobhoz...

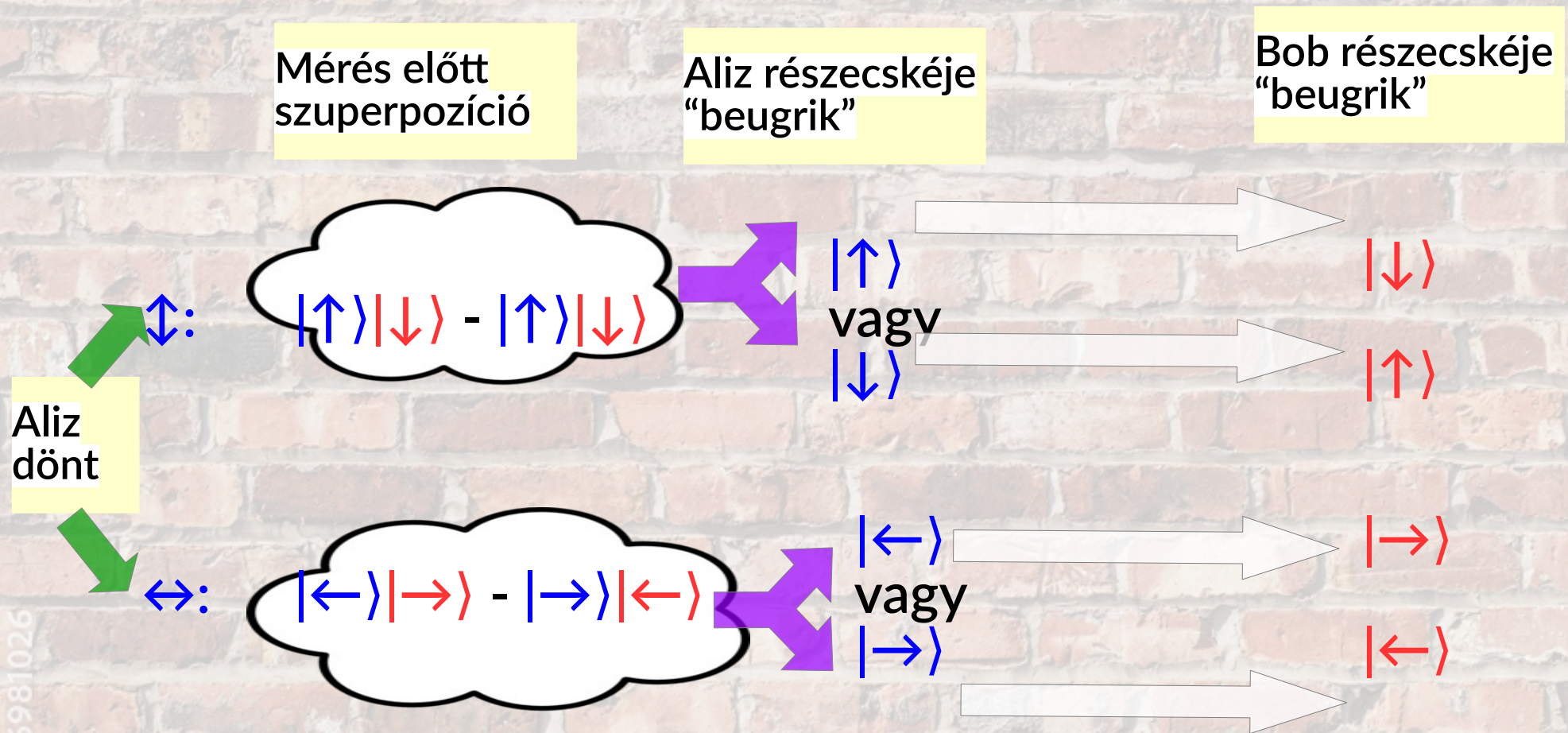


$$|\leftarrow\rangle|\rightarrow\rangle - |\rightarrow\rangle|\leftarrow\rangle = |\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\uparrow\rangle|\downarrow\rangle$$

1951: Bohm átfogalmazza az EPR-paradoxont bitekre
Ha a Földön Alíz megméri a részecskéje spinjét,
a Marson Bob részecskéje “beugrik” ellentétes spinbe



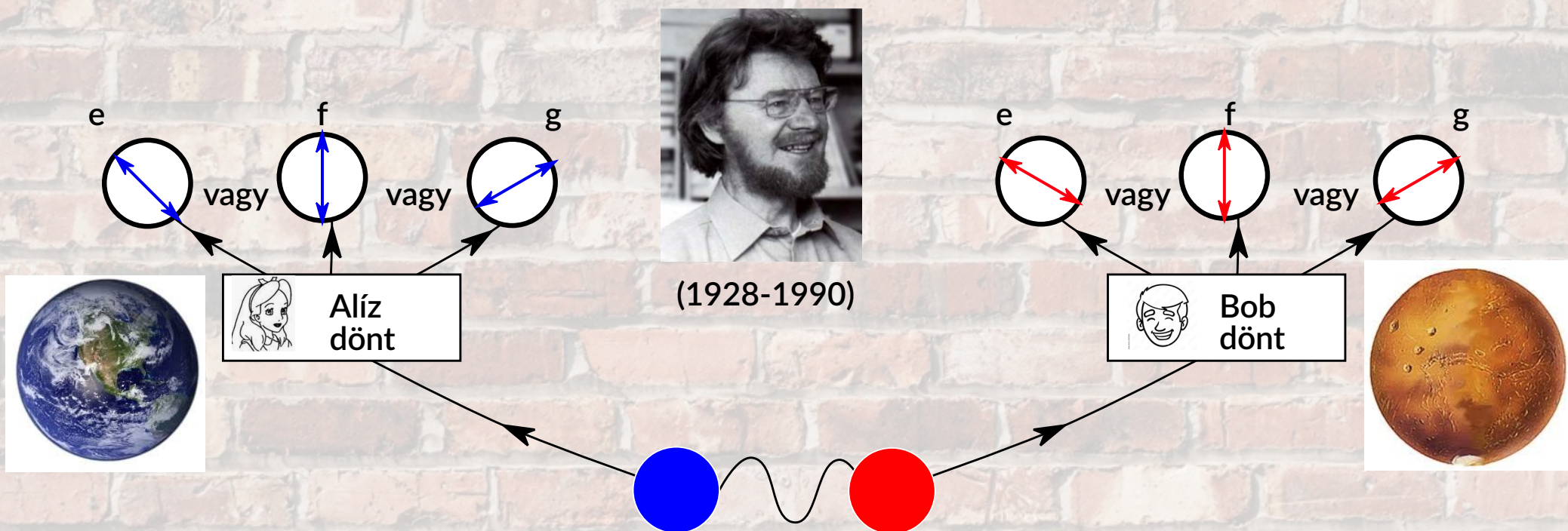
Einstein 1935 + Bohm 1951: A kvantummechanika mögött lokális rejtett változók vannak



Egyetlen józan ésszel felfogható lehetőség: Bob (és Alíz) részecskéje már előre bekészítette a "válaszát" minden lehetséges "kérdésre"
= lokális rejtett változók

Einstein 1935 + Bohm 1951:
A kvantummechanika mögött lokális rejtett változók vannak
Bell 1954:
A lokális rejtett változókat kizárhatjuk

1964, JS Bell: Az EPR-kísérlet egy verziójával tetten lehet érni a “kísérteties távolhatást”.



$$|\Psi\rangle_{ab} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow_{\theta}\downarrow_{\theta}\rangle - |\downarrow_{\theta}\uparrow_{\theta}\rangle)$$

Ha Einsteinnek igaza van, a kvantumos hullámfüggvény mögött rejtett változók:

3 érmét lerakok egy asztalra, min. 2 azonos oldalát mutatja



Kvantumosan összefonódott állapottal $S < 1$

$$S = P(e = f) + P(f = g) + P(e = g) \geq 1$$

THE NOBEL PRIZE
IN PHYSICS 2022



1/3

Alain
Aspect

John F.
Clauser

Anton
Zeilinger

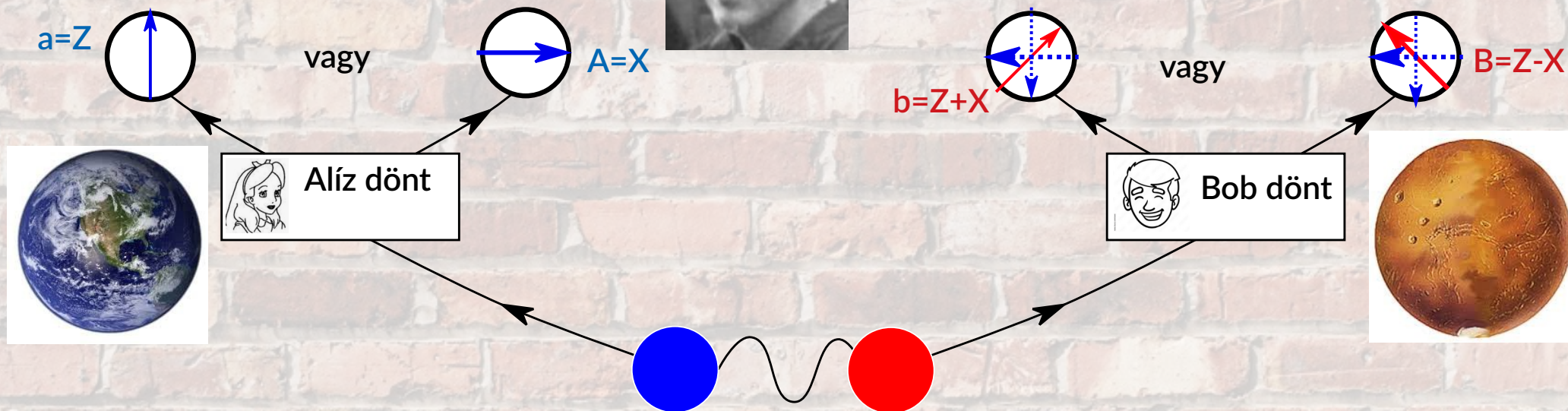
"for experiments with entangled photons,
establishing the violation of Bell inequalities
and pioneering quantum information science"

THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

1969: Clauser-Horne-Shimony-Holt (CHSH): A Bell-kísérlet egyszerűsítése, általánosítása



John F. Clauser: PhD-hallgató, mikrohullámú háttérsugárzáson kísérletezik. Mellékesen ír Bellnek, innen történelem

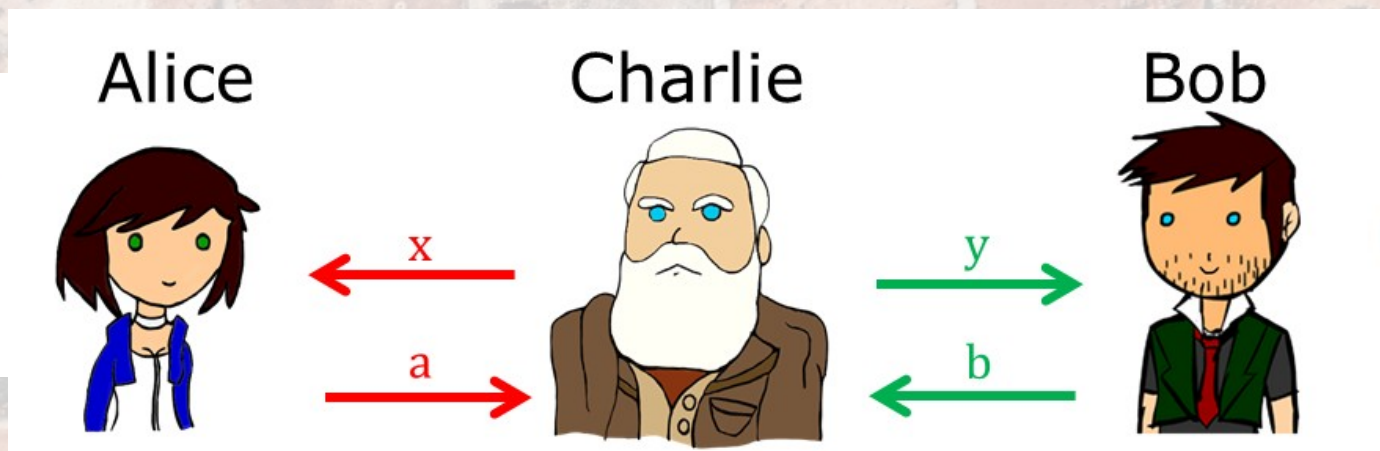


$$|\Psi\rangle_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow_{\theta,\phi}\downarrow_{\theta,\phi}\rangle - |\downarrow_{\theta,\phi}\uparrow_{\theta,\phi}\rangle)$$

Lásd még: CHSH game

$$S = \langle ab \rangle + \langle Ab \rangle + \langle aB \rangle - \langle AB \rangle \leq 2$$

A CHSH-játék: Bell-egyenlőtlenség sértése, kvantumos nemlokalitás játékos formában Játék sok független körben, véletlen bitekkel



Sok
(10000)
ismétlés

1. Kérdések:

Charlie küld egy-egy független, egyenletesen véletlenszerű kérdést Alicenak és Bobnak ($x, y = \text{MÁS/UGYANAZ}$)

2. Válaszok:

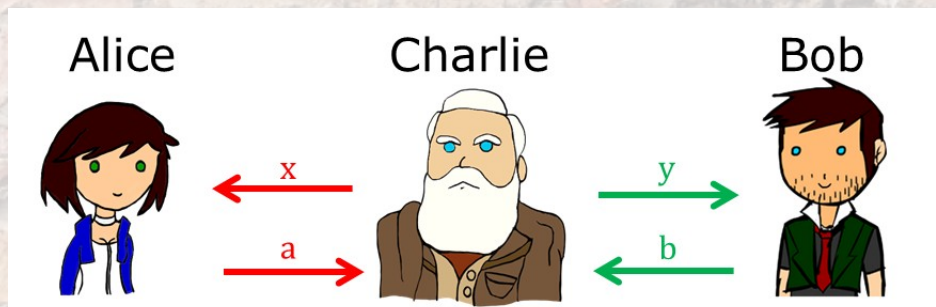
Egy-egy választ küld Charlienak Alice és Bob ($a, b = \text{IGEN/NEM}$)

3. Kiértékelés:

Ha $x=y=\text{UGYANAZ}$: A+B nyert, ha $a=b$, C nyert különben

Ha x vagy y MÁS: A+B nyert, ha $a \neq b$, C nyert különben

A CHSH-játék: Mi Alice és Bob legjobb stratégiája?



Sok
(10000)
ismétlés

1. Kérdések:

Charlie küld egy-egy független, egyenletesen véletlenszerű kérdést Alicenak és Bobnak ($x, y = \text{MÁS/UGYANAZ}$)

2. Válaszok:

Egy-egy választ küld Charlienak Alice és Bob ($a, b = \text{IGEN/NEM}$)

3. Kiértékelés:

Ha $x=y=\text{UGYANAZ}$: A+B nyert, ha $a=b$, C nyert különben
Ha x vagy y MÁS: A+B nyert, ha $a \neq b$, C nyert különben

Kérdések véletlenszerűek: nincs értelme megjegyezni őket.

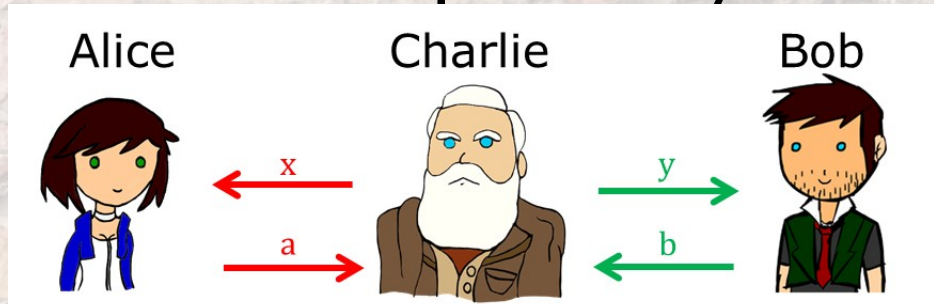
A és B távol vannak: nem tudnak kommunikálni

→ Lokális stratégia kell

Alíz és Bob nyerő válaszpárja:

	UGYANAZ?	MÁS?
UGYAN-AZ?	11 vagy 00	10 vagy 01
MÁS?	10 vagy 01	10 vagy 01

Alice és Bob legjobb klasszikus stratégiája: kérdéstől függetlenül **01** válaszpár → Nyerési esély 75%



Sok
(10000)
ismétlés

1. Kérdések:

Charlie küld egy-egy független, egyenletesen véletlenszerű kérdést Alicenak és Bobnak ($x, y = \text{MÁS/UGYANAZ}$)

2. Válaszok:

Egy-egy választ küld Charlienak Alice és Bob ($a, b = \text{IGEN/NEM}$)

3. Kiértékelés:

Ha $x=y=\text{UGYANAZ}$: A+B nyert, ha $a=b$, C nyert különben
Ha x vagy y MÁS: A+B nyert, ha $a \neq b$, C nyert különben

Kérdések véletlenszerűek: nincs értelme megjegyezni őket.

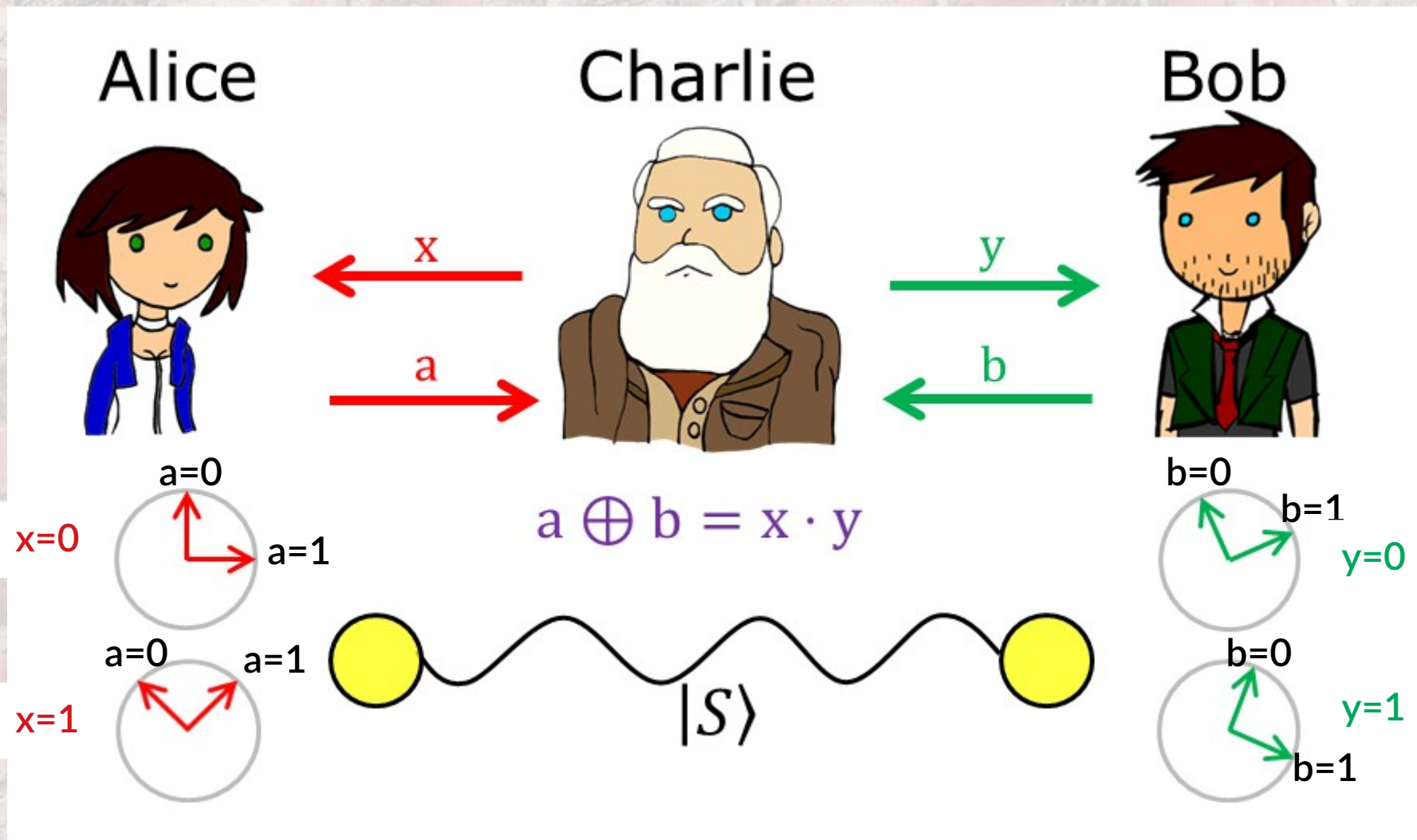
A és B távol vannak: nem tudnak kommunikálni

→ Lokális stratégia kell

Alíz és **Bob** nyerő válaszpárja:

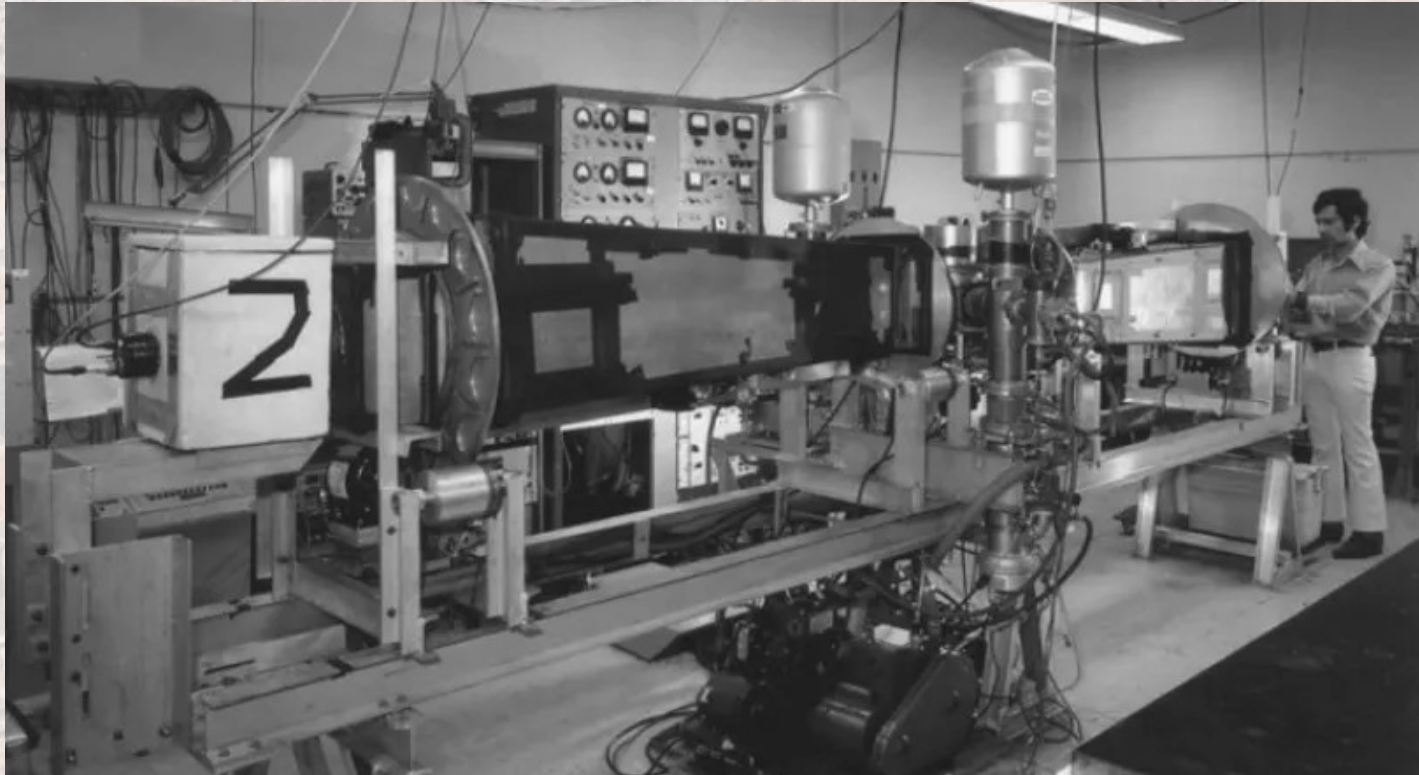
	UGYANAZ?	MÁS?
UGYAN-AZ?	11 vagy 00	10 vagy 01
MÁS?	10 vagy 01	10 vagy 01

Alice és Bob legjobb kvantumos stratégiája: összefonódással,
két kvantumbittel
feltornázható a nyerési esély 85%-ra

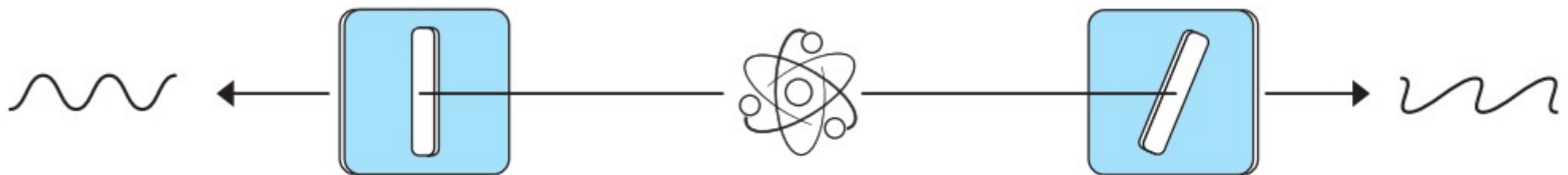


számolás: akármik az x és y kérdések, és Alice a válasza,
Bob b válasza $\cos^2(22.5^\circ) \approx 85\%$ valószínűséggel nyerő lesz

1972-74, Clauser&Freedman @ Berkeley: Bell-kísérlet.
Rögzített polarizátorok, sok foton elvesz, nem váltogatnak

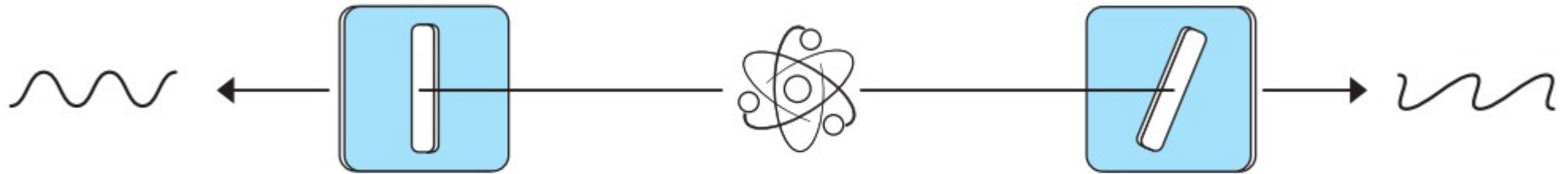


2022



John Clauser used calcium atoms that could emit entangled photons after he had illuminated them with a special light. He set up a filter on either side to measure the photons' polarisation. After a series of measurements, he was able to show they violated a Bell inequality.

1973, Holt&Pipkin a Harvardon: Bell-egyenlőtlenségek NEM sérülnek, lehetnek lokális rejtett változók!



$$S = 1.728 \pm 0.104$$

Hg-atomok a Ca helyett. Publikálás előtt visszavonták a tanulmányt.

1976: Clauser megismétli a Holt&Pipkin kísérletet

$$S = 2.308 \pm 0.0744$$



2022



1/3

Alain
Aspect

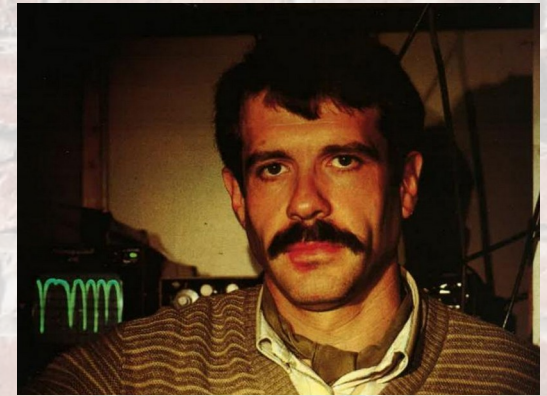
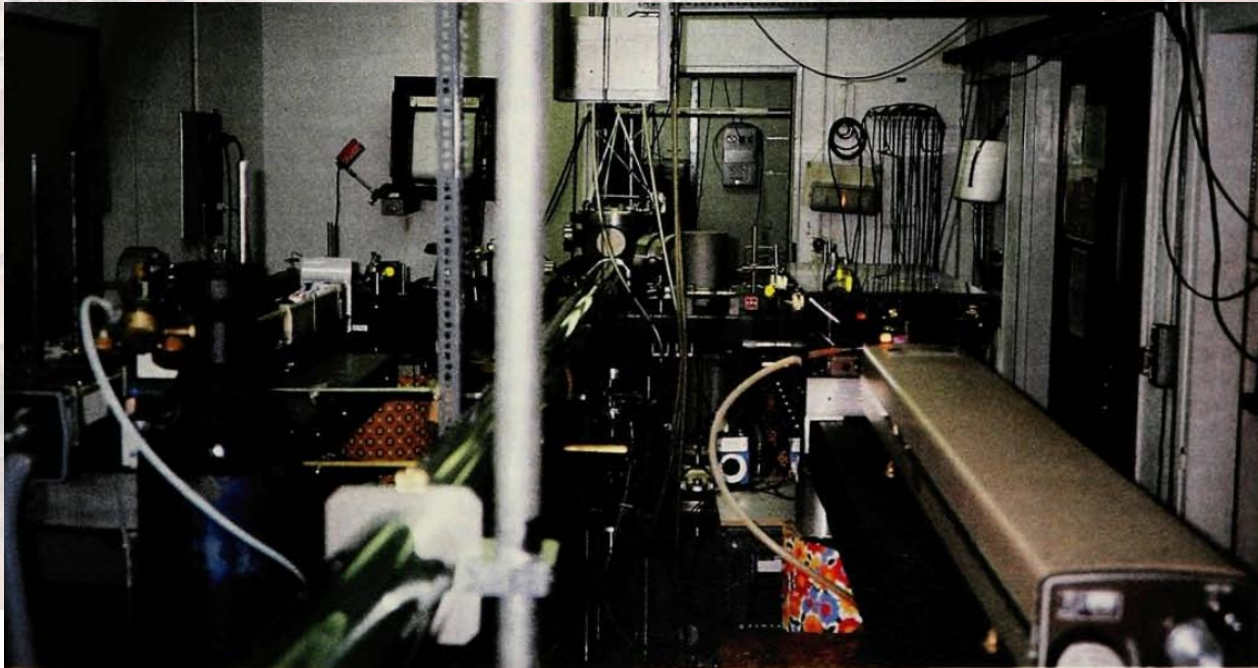
John F.
Clauser

Anton
Zeilinger

"for experiments with entangled photons,
establishing the violation of Bell inequalities
and pioneering quantum information science"

THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

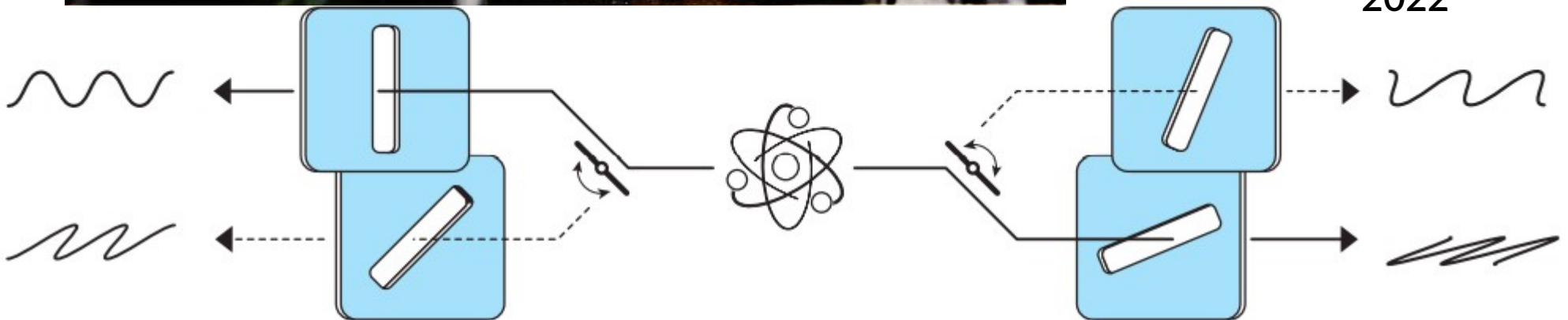
1982-84: Aspect, Paris: Lézerek → több foton,
akusztó-optikai modulátorok → Alíz és Bob változat
De: nem teljesen véletlenszerű, mérési határfok alacsony



Alain Aspect



2022



Alain Aspect developed this experiment, using a new way of exciting the atoms so they emitted entangled photons at a higher rate. He could also switch between different settings, so the system would not contain any advance information that could affect the results.



Alain
Aspect

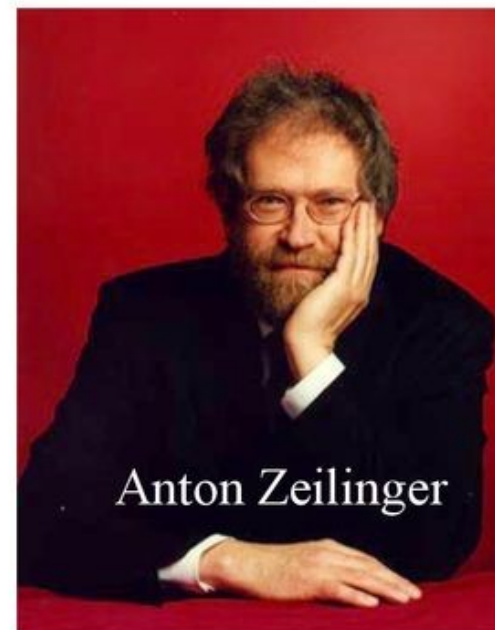
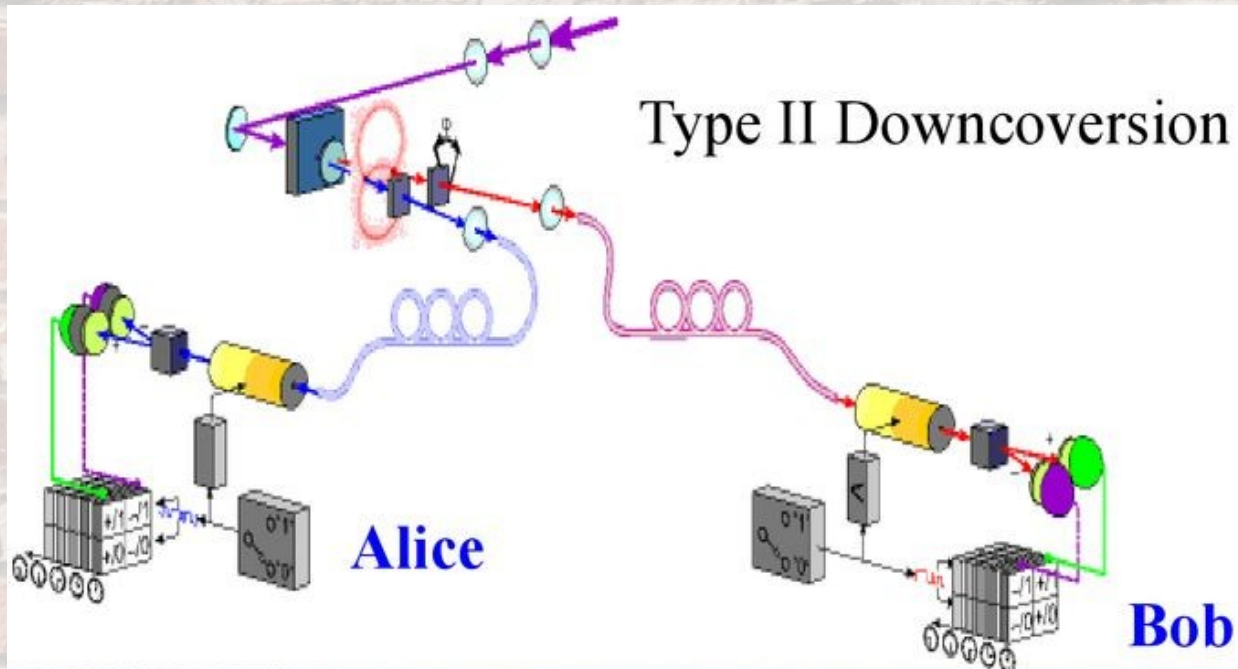
John F.
Clauser

Anton
Zeilinger

"for experiments with entangled photons,
establishing the violation of Bell inequalities
and pioneering quantum information science"

THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

1998: Zeilinger: Fotonpárok lézerrel gerjesztett kristályból,
Alíz és Bob kampusz két végén, véletlen mérésváltogatás.
De: mérési hatásfok alacsony.

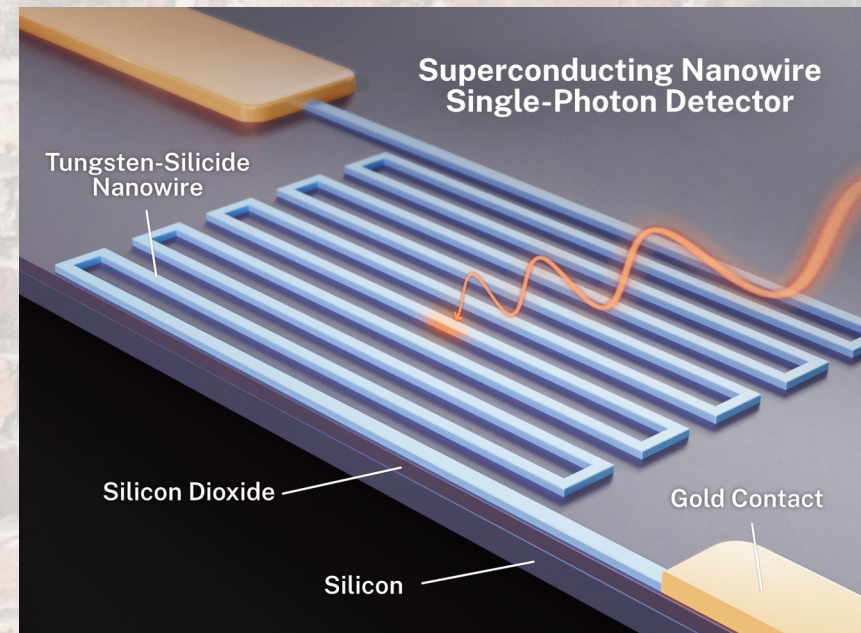


2022



2015: Zeilinger és két vetélytársa egyszerre zárja be a lokalitás- és detektálási kibúvót

- Hanson, Delft [Nature, Oct 29 2015]
nanogyémántok + összefonódás kicserélése
- Shalm, Colorado
[Phys. Rev. Lett., Dec 18 2015]
szupravezető nanodrót-detektor
- Zeilinger, Bécs [Phys. Rev. Lett., Dec 18 2015]
szupravezető nanodrót-detektor



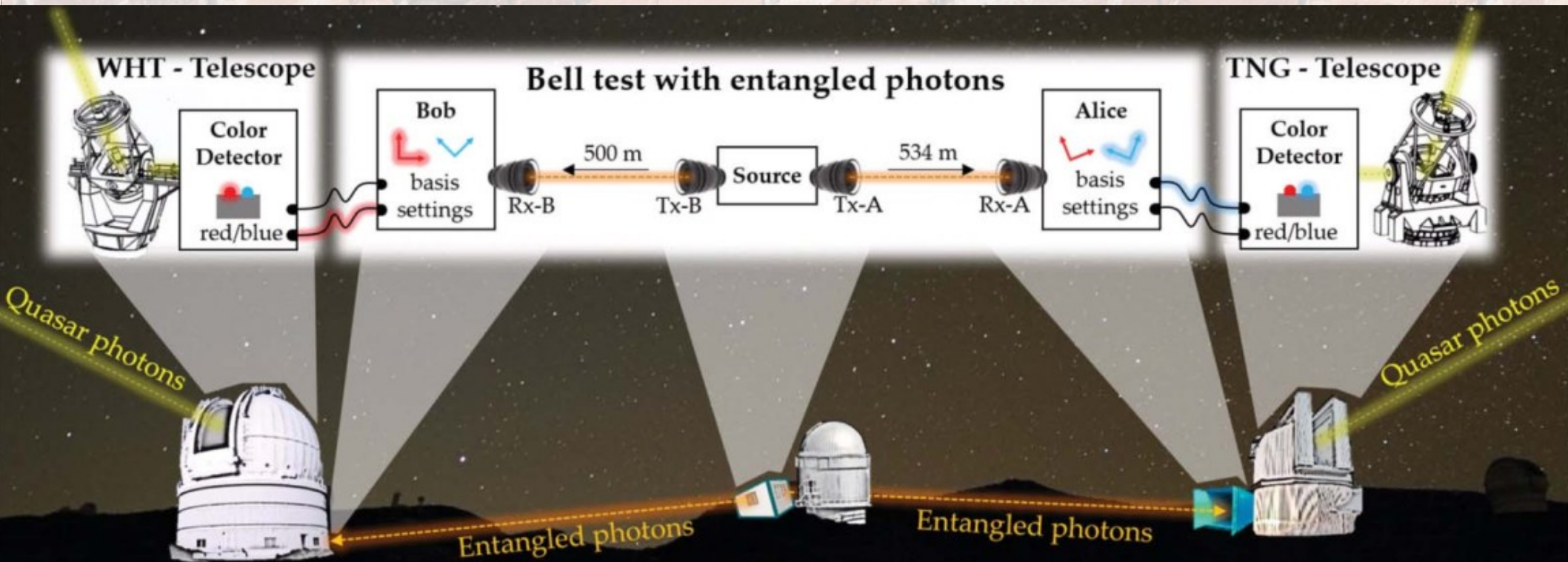
Viewpoint: Closing the Door on Einstein and Bohr's Quantum Debate

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.

2016, Zeilinger: Bell-mérés kozmikus fotonokkal
2018, Zeilinger: Kanári-szigeteken, kvazárok fényével.
(véletlen számokat 7,8 mrd éve generálták)



Zeilinger: A kvantuminformáció úttörő kísérletei. A kvantumos összefonódás létezik, mi mindenre jó?

1989: Három részecske összefonódása,
GHZ=Greenberger-Horne-Zeilinger

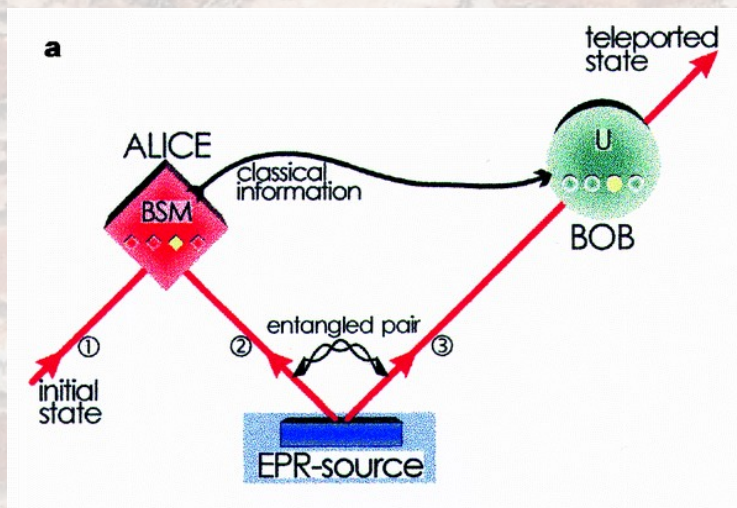
1997: Kvantumteleportáció

1998: Összefonódás kicserélése

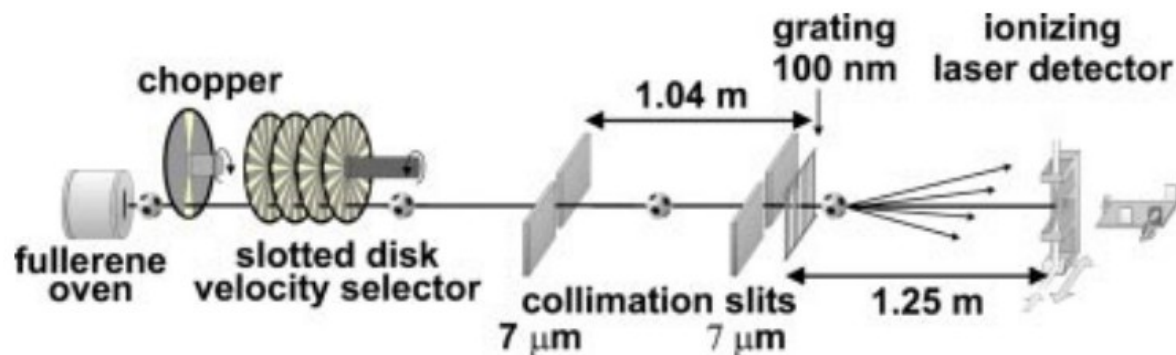
1998: Kvantumosan titkosított kommunikáció,
összefonódással biztosítva

1999: GHZ-állapotok kísérletben

2012: Kvantumteleportáció 143 km-re



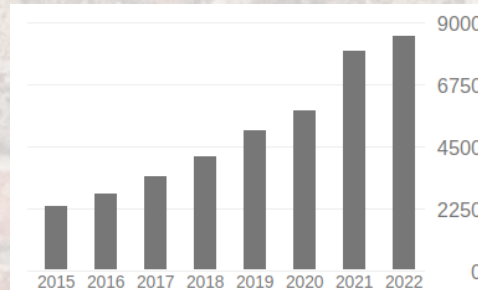
1999: Kétréskísérlet C60 fullerén molekulával



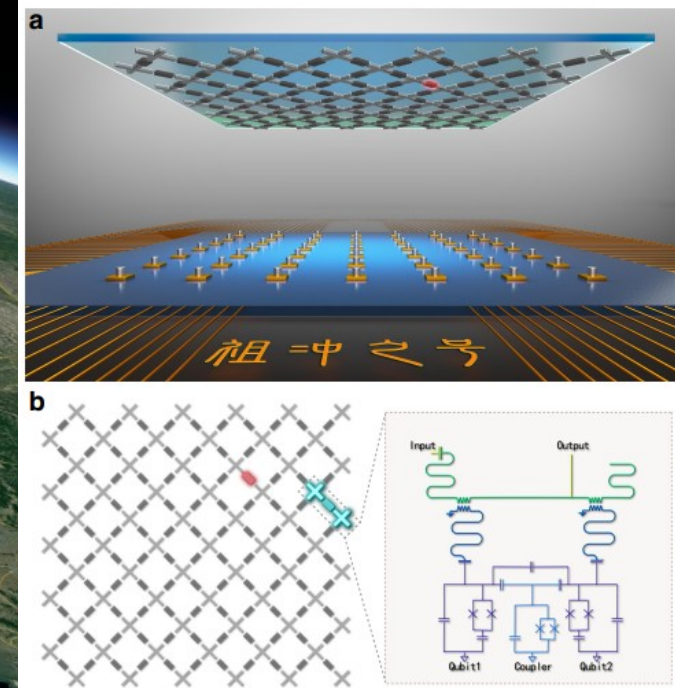
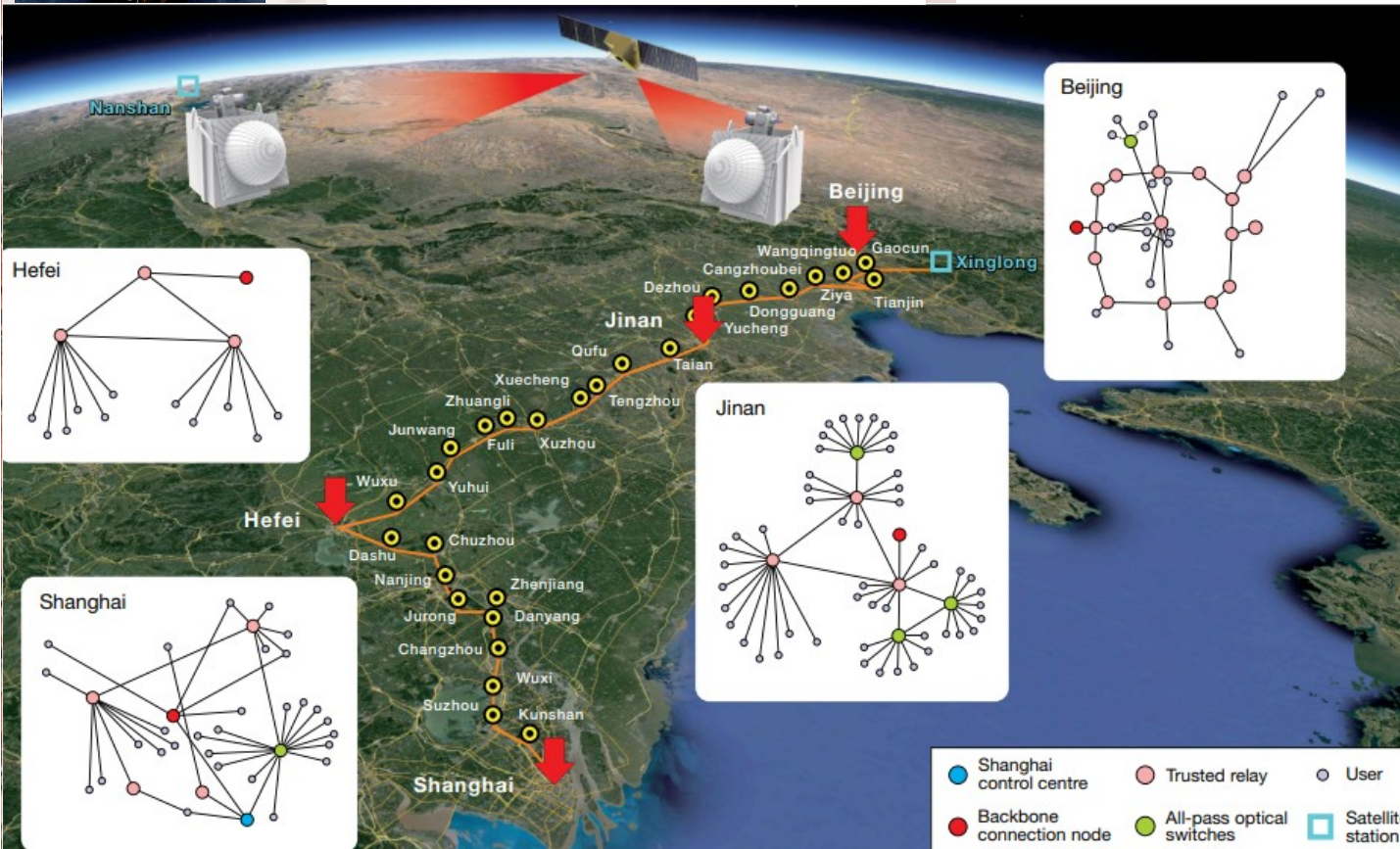
Zeilinger diákjai a kvantumtechnológia úttörői. Pl. Kínában.



	All	Since 2017
Citations	58982	35026
h-index	115	93
i10-index	362	326

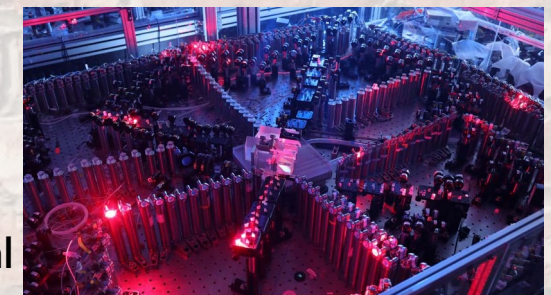


“Zhuchongzhi”
szupravezető transzmonos
kvantumszámítógép,
60 kvantumbit, hasonlóan
jó, mint a Google gépe

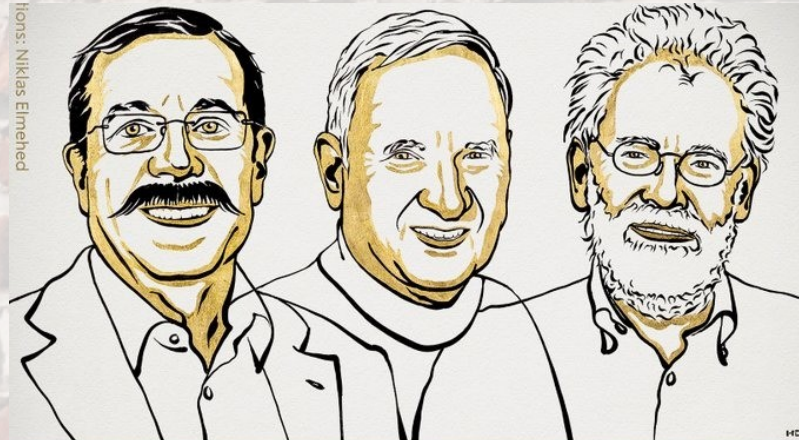


Kvantumkommunikációs hálózat:
2000 km gerinc (Shanghai-Beijing)
+ 4 városi hálózat sok csomóponttal
+ műhold (Micius)

Gaussos bozon-
mintavételezés,
100 fénymódussal



~~Alapfeltevés: Lokális realizmus.
A világ végső építőkövei vannak, és lokálisak.
Ezek közvetítik a távolhatásnak tűnő kölcsönhatásokat is.~~



A tudomány alapfeltevése megbukott.
A kvantummechanika mögött nincsenek lokális rejtett
változók → lokális realizmus nem teljesül.
A világ végső építőkövei nem lokálisak, vagy nem “vannak”.

Na de akkor mi van?

Na de akkor mi van?

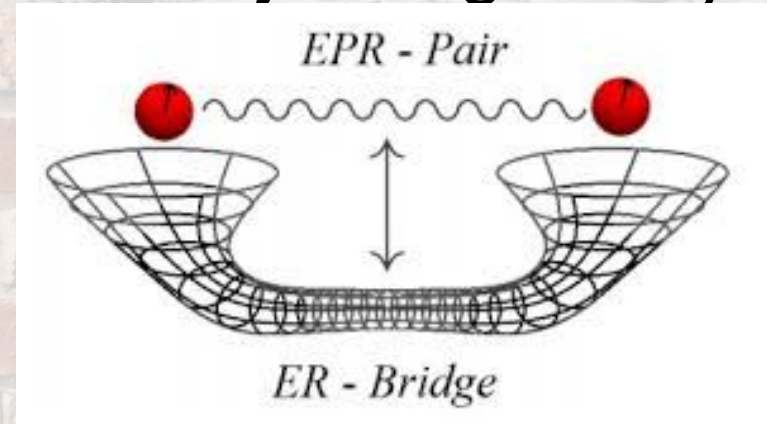
lokális realizmus

A természet végső építőelemei nem lokálisak.
Talán a téridő maga csak kialakul valamilyen kvantumozott építőkövekből? Ezt a kialakulást tudjuk megakadályozni?

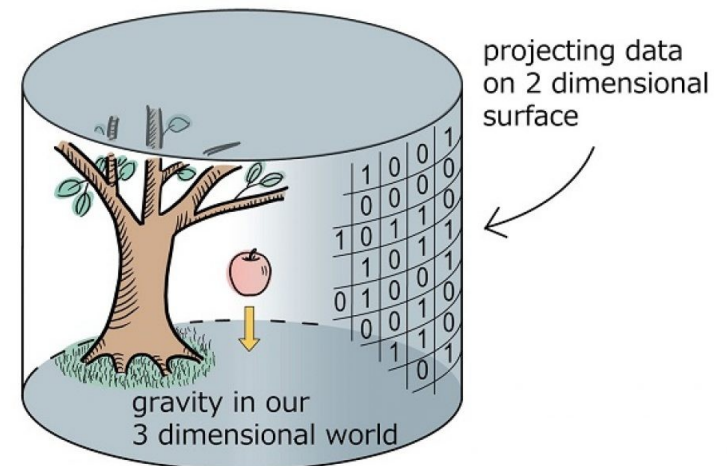
ER=EPR ?

Einstein-Rosen-bridge
= Entangled qubits?

[Susskind, Sean Carroll]



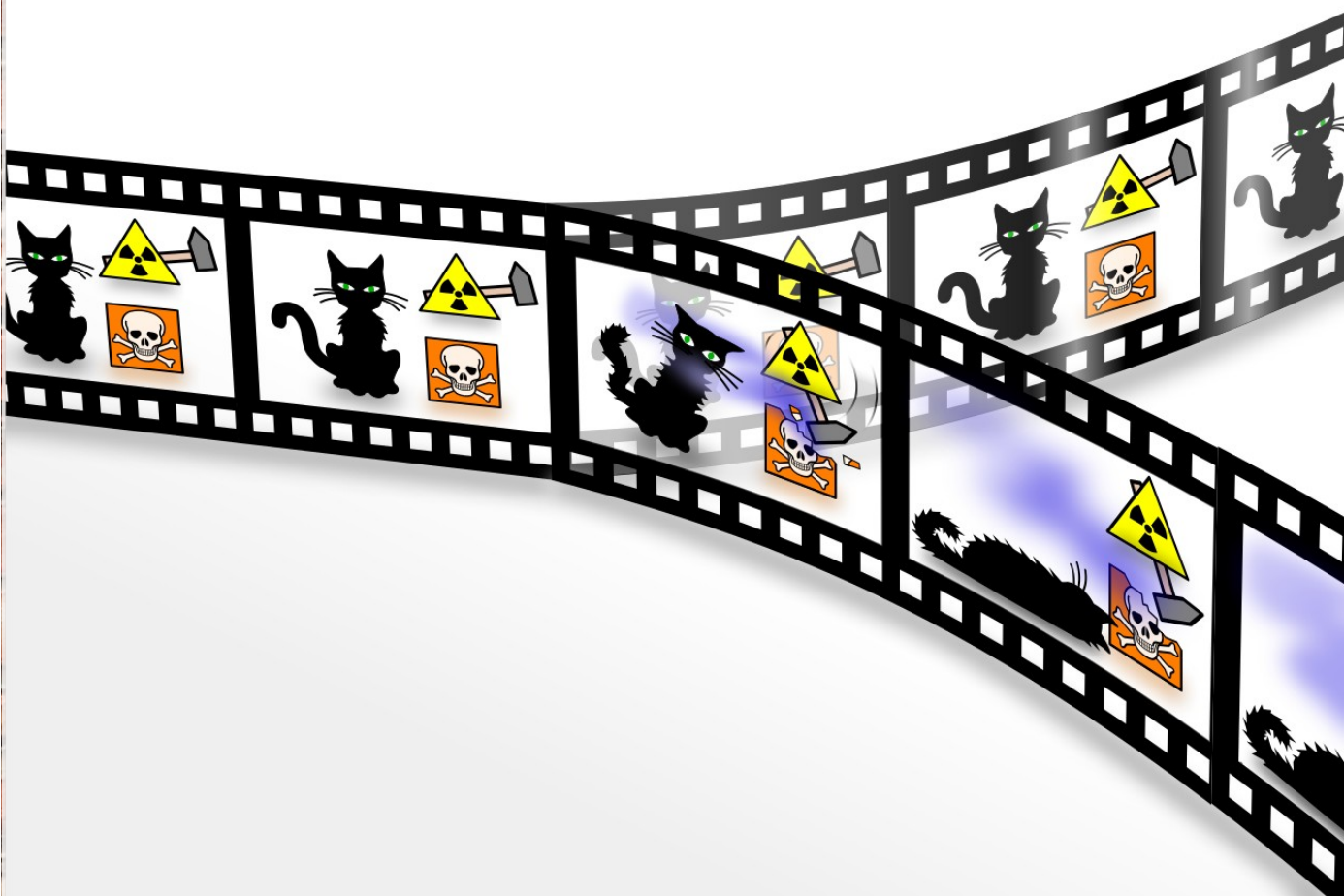
Space from Hilbert Space:
Recovering Geometry from Bulk Entanglement



Na de akkor mi van?

lokális realizmus

Az építőkövek nem “vannak”. A “klasszikus” világunk elemei nem objektív létezők. Nincs szék, nincs fa, nincs én.



Sokvilág-értelmezés
[Susskind, Sean Carroll]

Világ = nagy kvantumos
leves,
kölsönhatások révén
egymáshoz képest
kialakulnak “klasszikus
világok”.

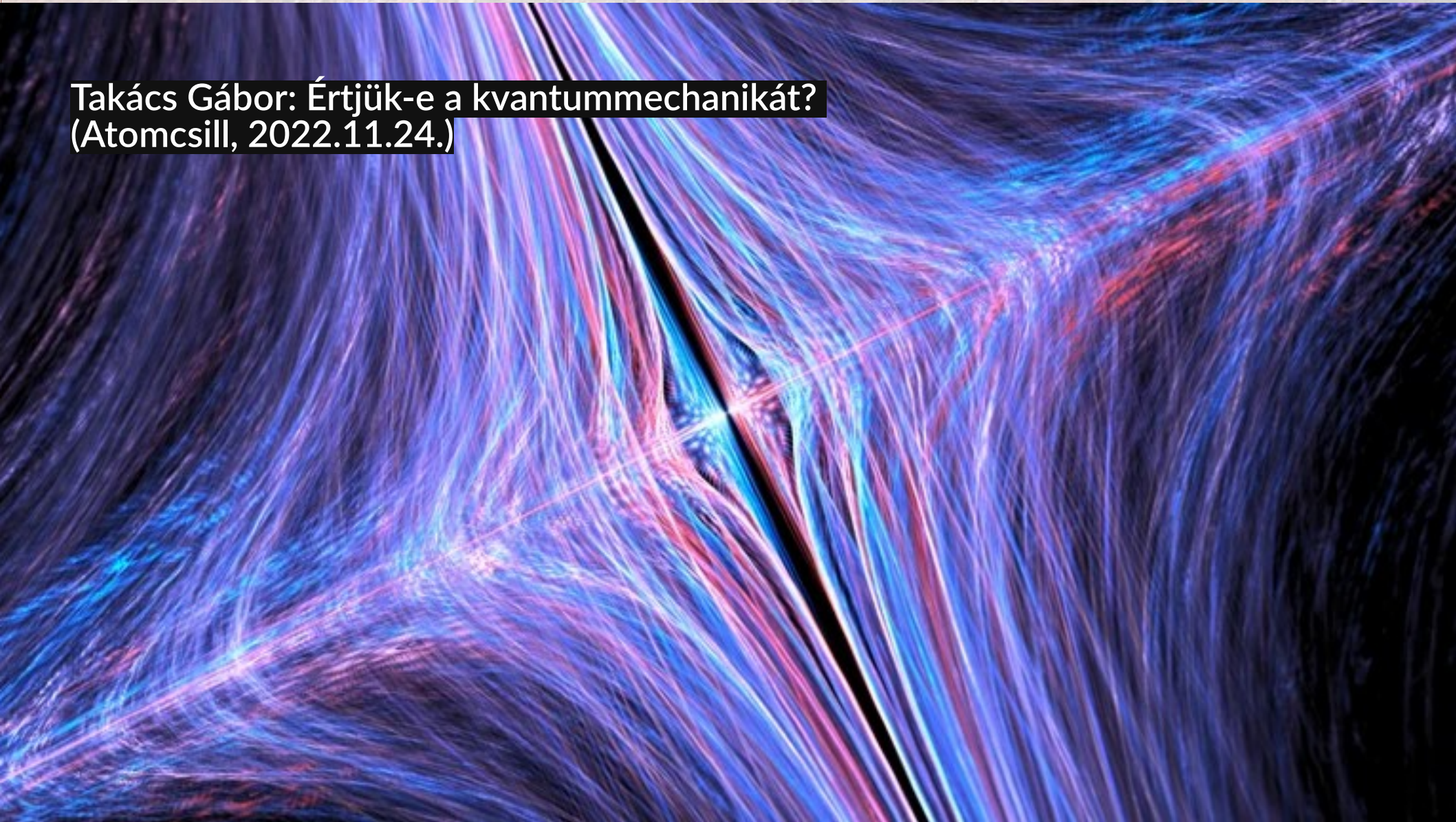
Ezek mindig újabb és újabb
ágakra bomlanak.

Az “én” egy fikció, az egész
belülről nézve.

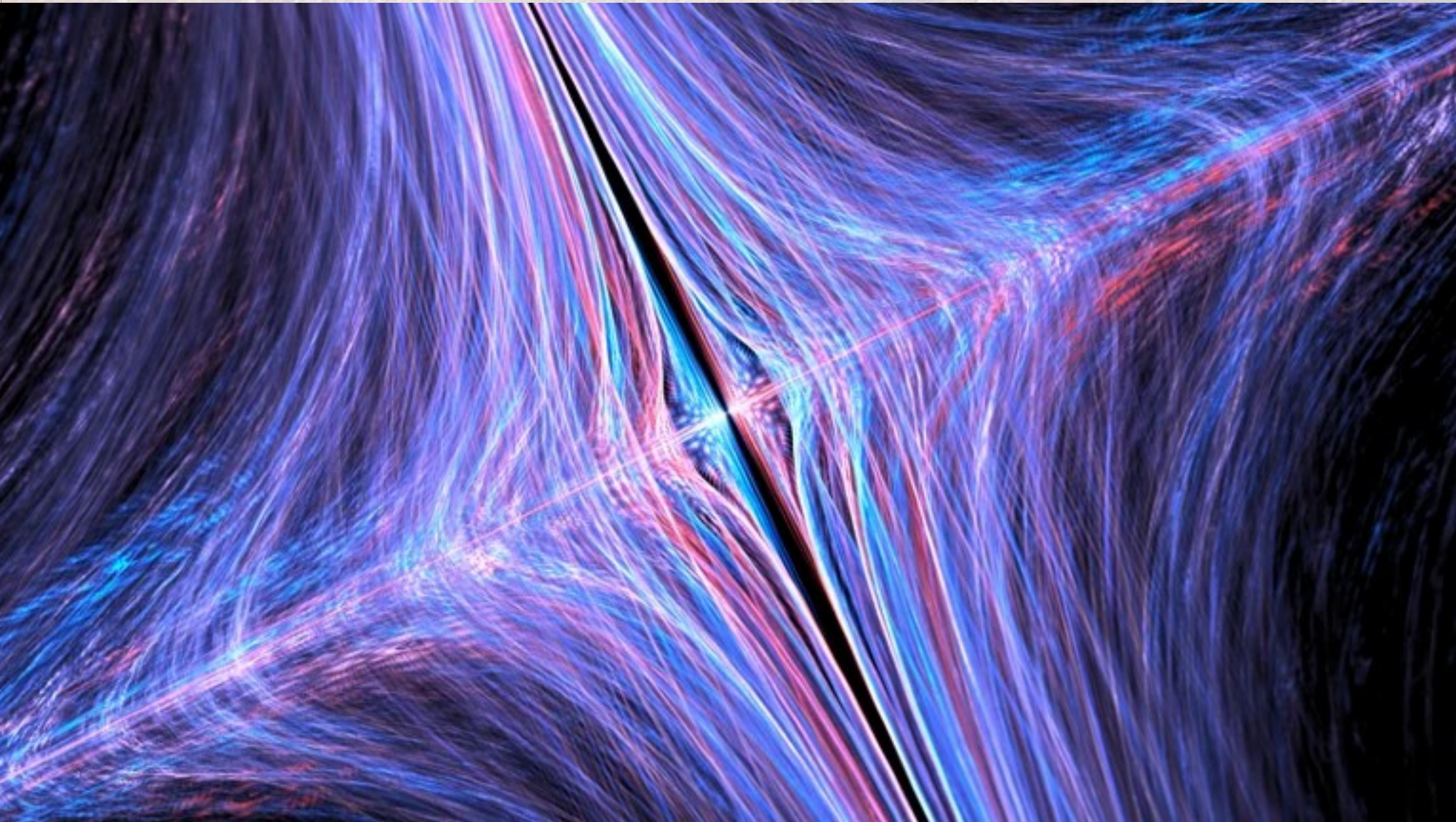
A kvantumos sokvilág-elméletben a világ hullámfüggvénye nagyon bonyolult, minden lehetőséget tartalmaz.

Az objektív valóság: a világegyetem hullámfüggvénye – de minden benne van, mint Borges bábeli könyvtárában

Takács Gábor: Értjük-e a kvantummechanikát?
(Atomcsill, 2022.11.24.)



Többet erről: Quantum World spec. koll., őszi félév
Takács Gábor



Egy a fizika iránt is érzékeny költőóriásunk ezt így fogalmazta:

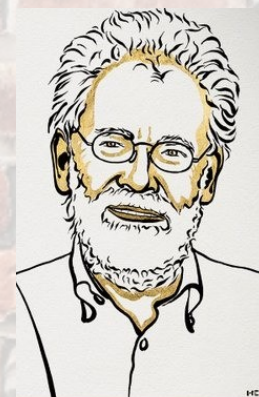
Én fölnéztem az est alól
az egek fogaskerekére -
csilló véletlen szálaiból
törvényt szőtt a mult szövőszéke
és megint fölnéztem az égre
álmaim gőzei alól
s láttam, a törvény szövedéke
mindíg fölfeslik valahol.

Egy a fizika iránt is érzékeny költőóriásunk ezt így fogalmazta:

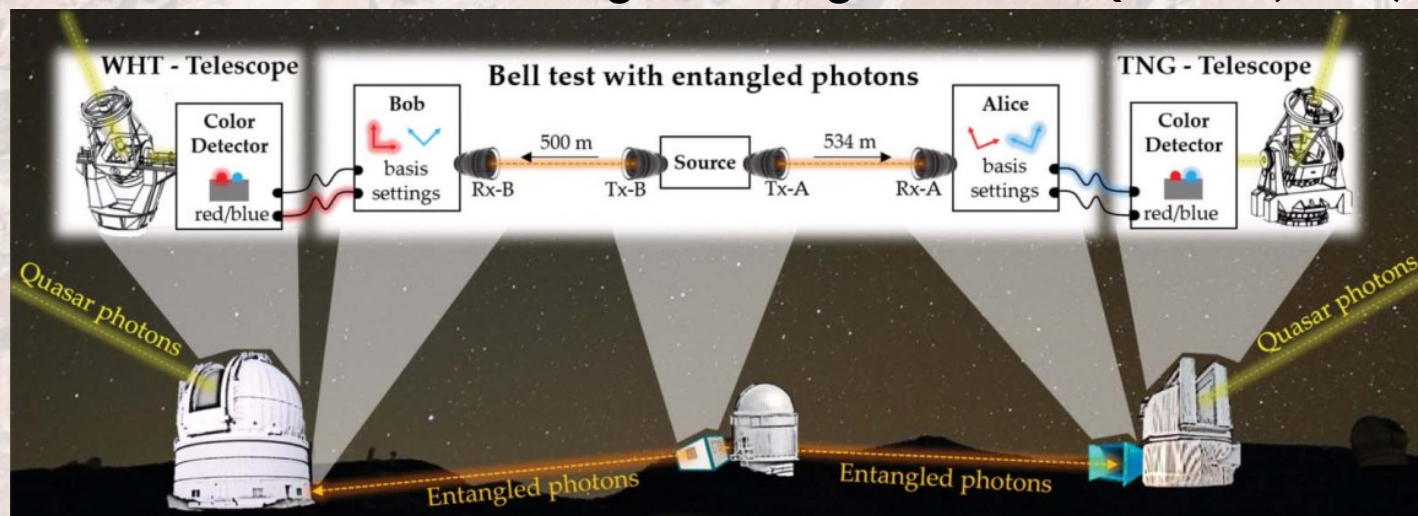
József Attila:
Eszmélet
(1934)



Én fölnéztem az est alól
az egek fogaskerekére -
csilló véletlen szálaiból
törvényt szőtt a mult szövőszéke
és megint fölnéztem az égre
álmaim gőzei alól
s láttam, a törvény szövődéke
mindig fölfeslik valahol.

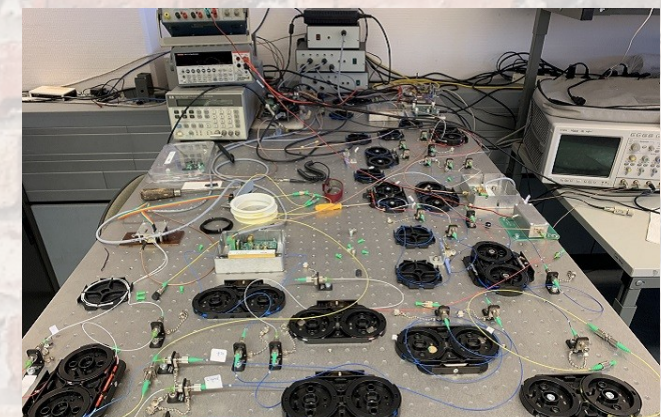
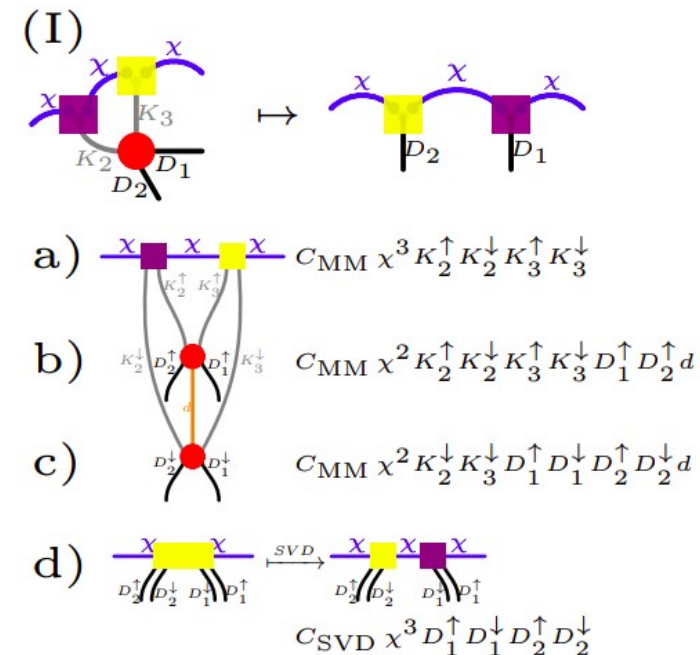
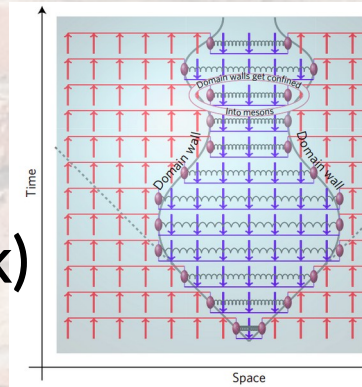


Anton Zeilinger: Cosmic Bell Test Using Random Measurement Settings from High-Redshift Quasars (2018)



Érdekel a kvantumtechnológia? Gyere a BME-re fizikusnak vagy fizikus-mérnöknek!

- Országosan egyedülálló kísérletek
(BME Fizikai Intézet + MFA)
- Kvantuminformatika matematikai háttere
(BME Matematikai Intézet)
- Kvantumelmélet
(BME Elméleti Fizika Tanszék)
- Úttörő kvantumkommunikációs fejlesztések
(BME Villamosmérnöki Kar)



Quantum Information
National Laboratory
HUNGARY

<https://qi.nemzetilabor.hu/>

Összefoglalás: 2022. fizikai Nobel-díj, kvantumozás kísérletekben, a természet alapvetően nem lokális



Alain
Aspect

John F.
Clauser

Anton
Zeilinger

"for experiments with entangled photons,
establishing the violation of Bell inequalities
and pioneering quantum information science"

THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

Természet végső építőkövei nem lokálisak, és/vagy nem "vannak"

Kísérletekkel beláttuk ezt, a Bell-egyenlőtlenségek sérülnek

"Kísérteties távolhatás"

Kvantumos távolhatás hasznos
(kvantumbitek teleportációja,
kvantumozás internet)

Összefonódás miatt
exponenciálisan összetett
állapotok → kvantumszámítógép

A téridő nem alapvető, csak
kialakul?

Gyere a BME-re kvantumozni!