

Kvantumos összefonódás: A 2022-es fizikai Nobel-díj

Asbóth János

BME TTK Elméleti Fizika Tanszék,

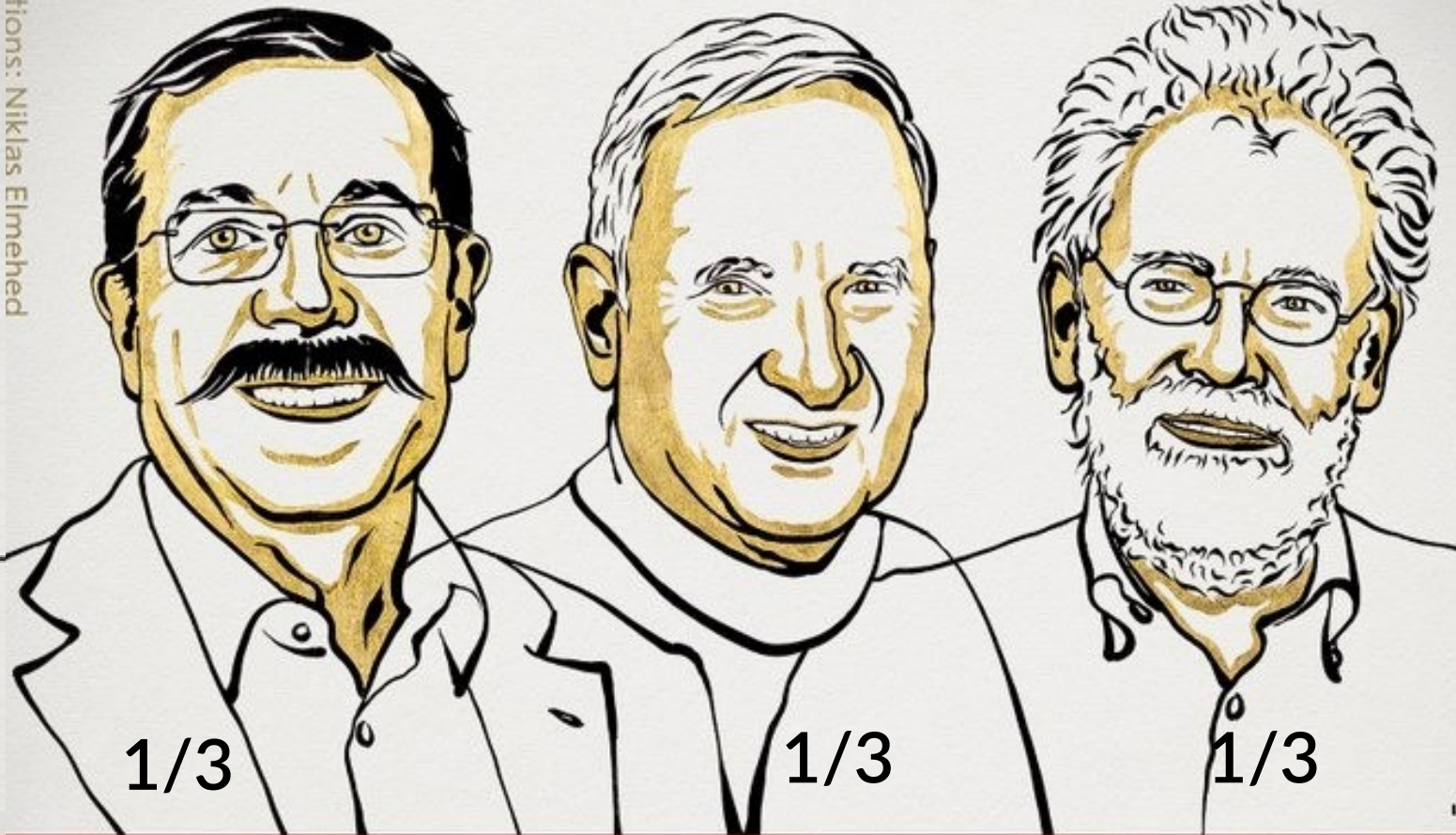
Wigner FK Kvantumoptika és Kvantuminformatika Osztály



Atomcsill, Budapest, 2023. november 9.

THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2022

Illustrations: Niklas Elmehed



1/3

1/3

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

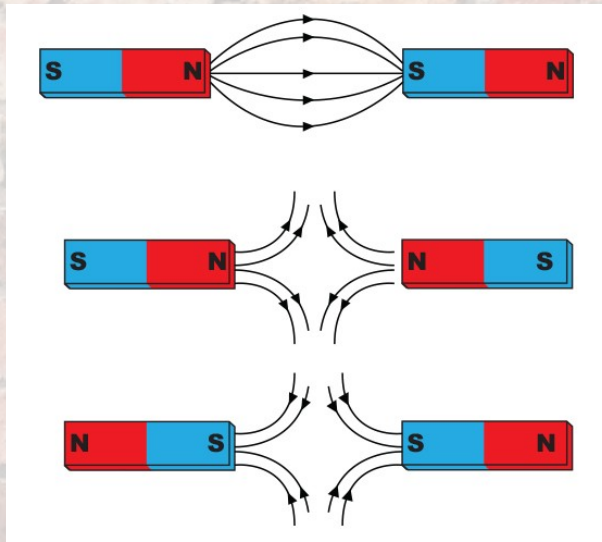
A close-up photograph of a brick wall. The bricks are arranged in a traditional running bond pattern. The colors of the bricks vary, ranging from deep red to light tan. A semi-transparent horizontal band is overlaid across the middle of the image, containing the text "Mik a világ végső építőkövei?".

Mik a világ végső építőkövei?

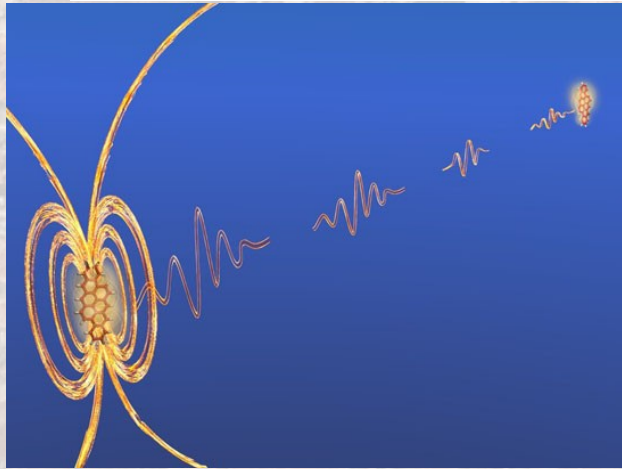
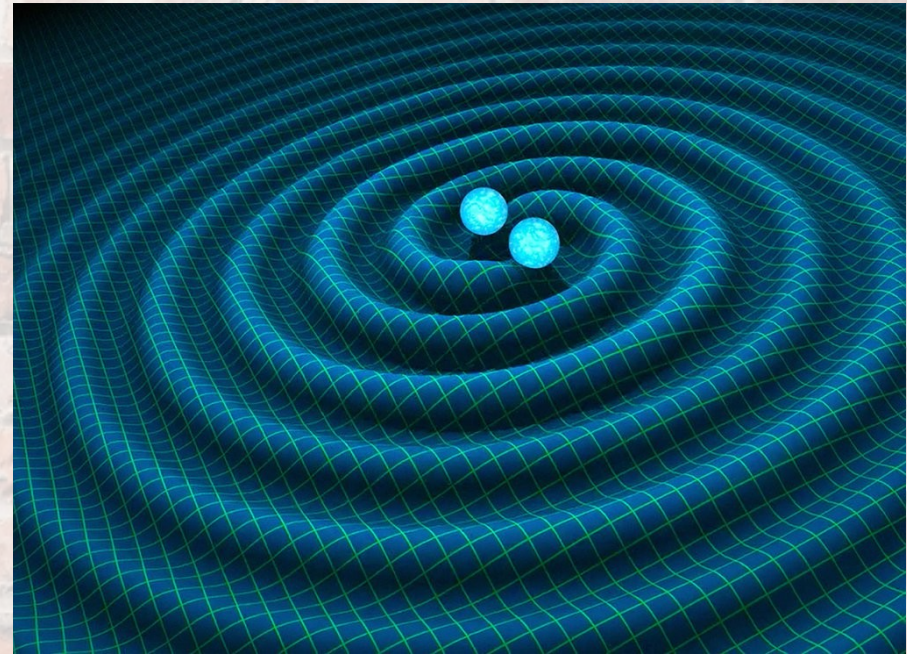
Alapfeltevés: Lokális realizmus.

A világ végső építőkövei vannak, és lokálisak.
Ezek közvetítik a távolhatásnak tűnő kölcsönhatásokat is.

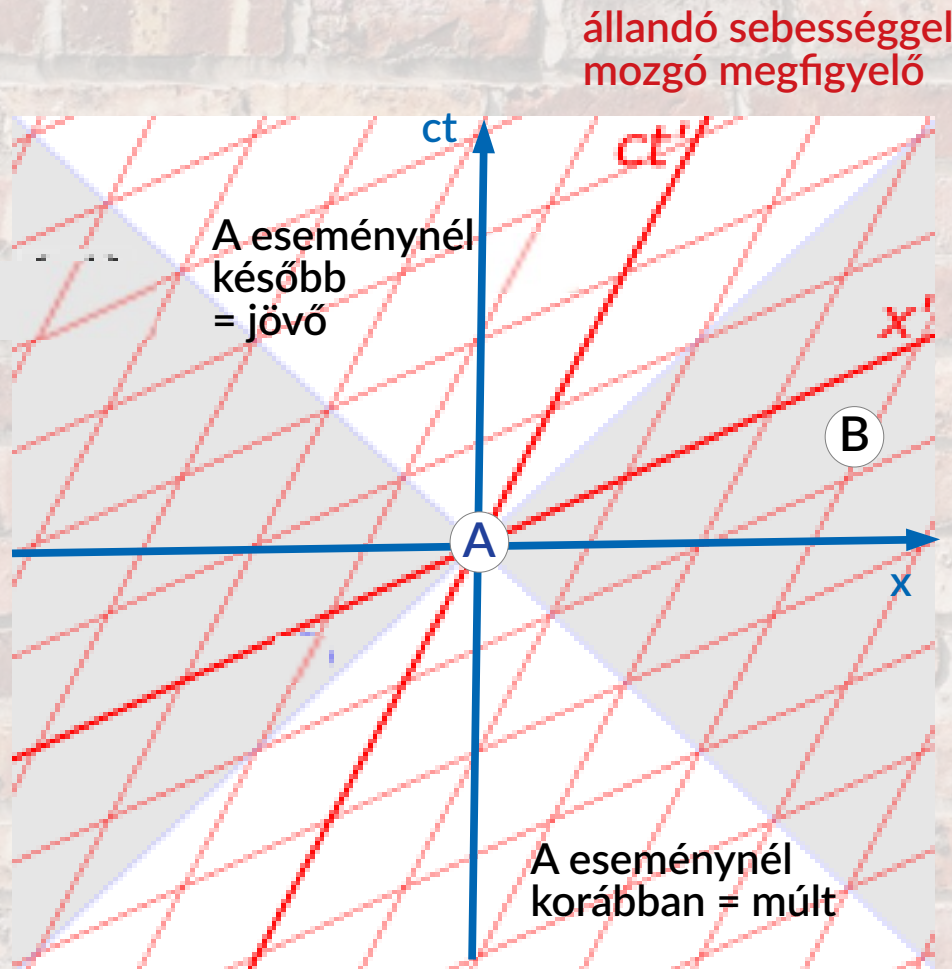
Mágneses “távolhatás” helyett
a végső építőkövek mágneses
mezők, fotonok



Gravitációs távolhatás helyett a
téridő görbülete, hullámai a
gravitációs hullámok. Gravitonok?



Einstein: A világ végső építőkövei lokálisak.
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

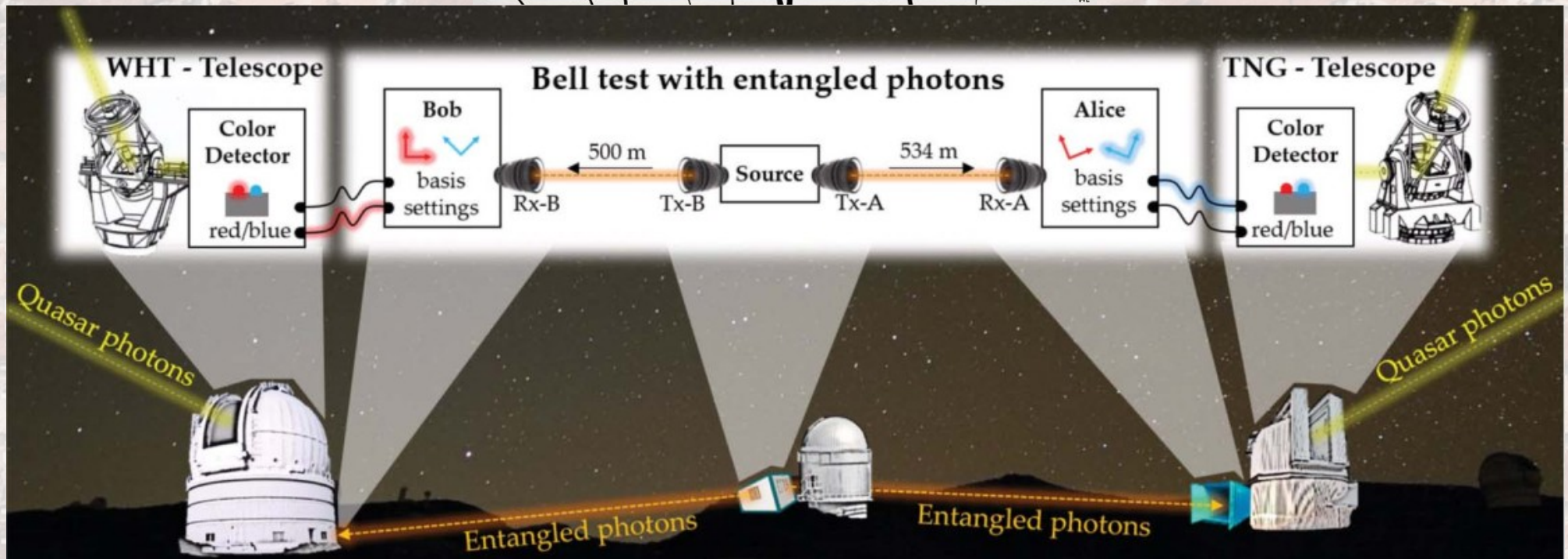
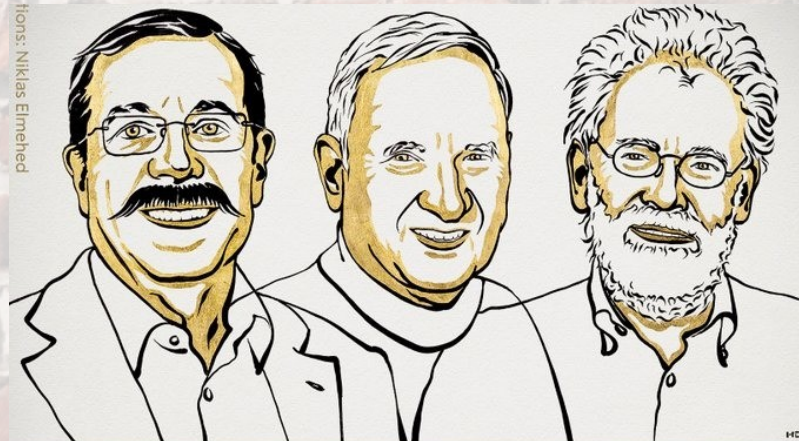
→ A nem lehet B oka,
se B okozata



Einstein 1905

2022. fizikai Nobel-díj: Az alapfeltevés hibás.

A világ végső építőkövei nem lokálisak, vagy nem “vannak”.
Sok erőfeszítéssel kvantummechanikus kísérleti távolhatás idézhető elő,
ami nem magyarázható fénysebességnél lassabb jelekkel.



Kvantummechanika: Pontos hely és sebesség helyett hullámfüggvény, határozatlanság. Tudásunk hiánya?



1922



Bohr 1913

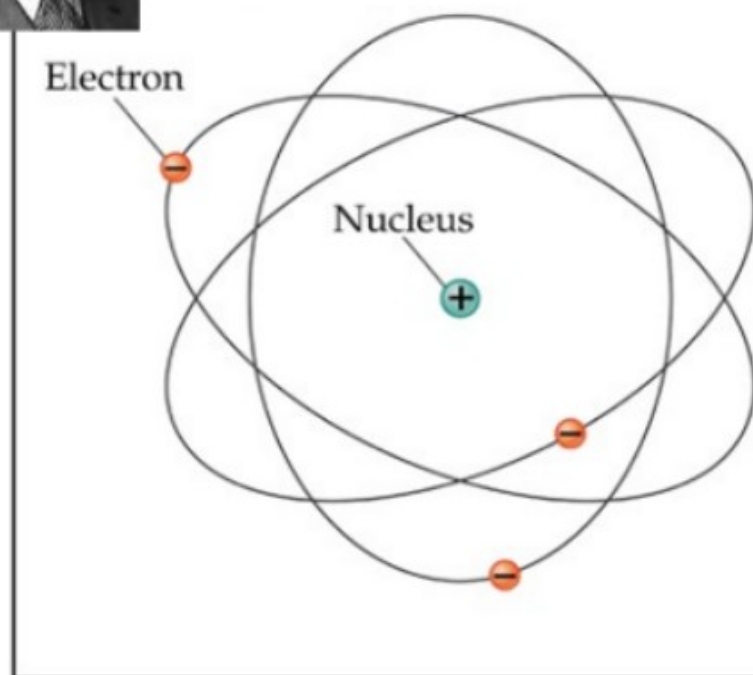


Schrödinger 1925



1933

What An Electron Isn't



What An Electron Is



Hullámfüggvény = valószínűségi felhő?
Az elektron valahol van, csak nem tudjuk, hol?
Nullponti rezgés?

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x, t) \right] \Psi(x, t)$$

Adobe Stock | #376981026

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

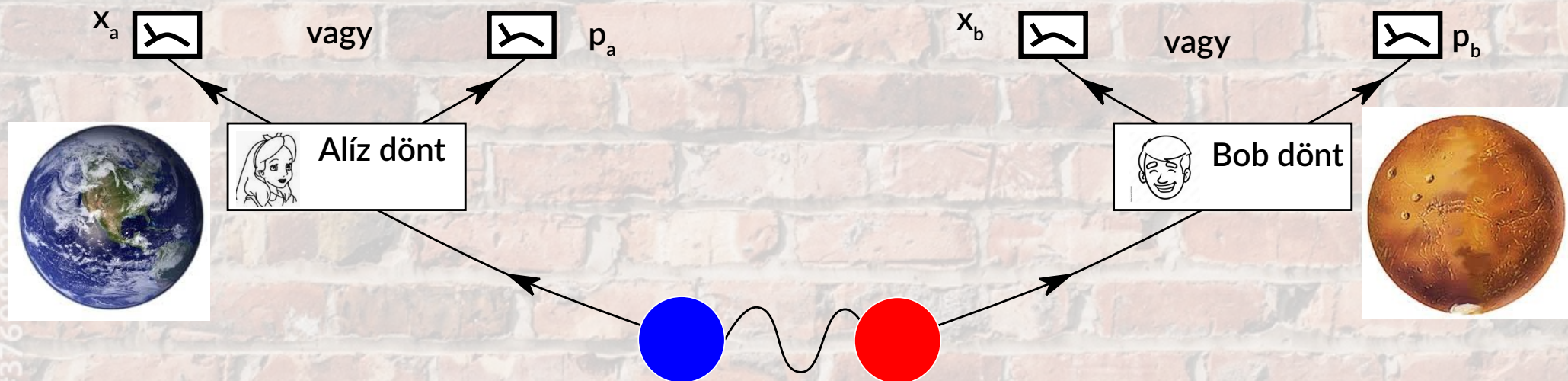
MAY 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 47

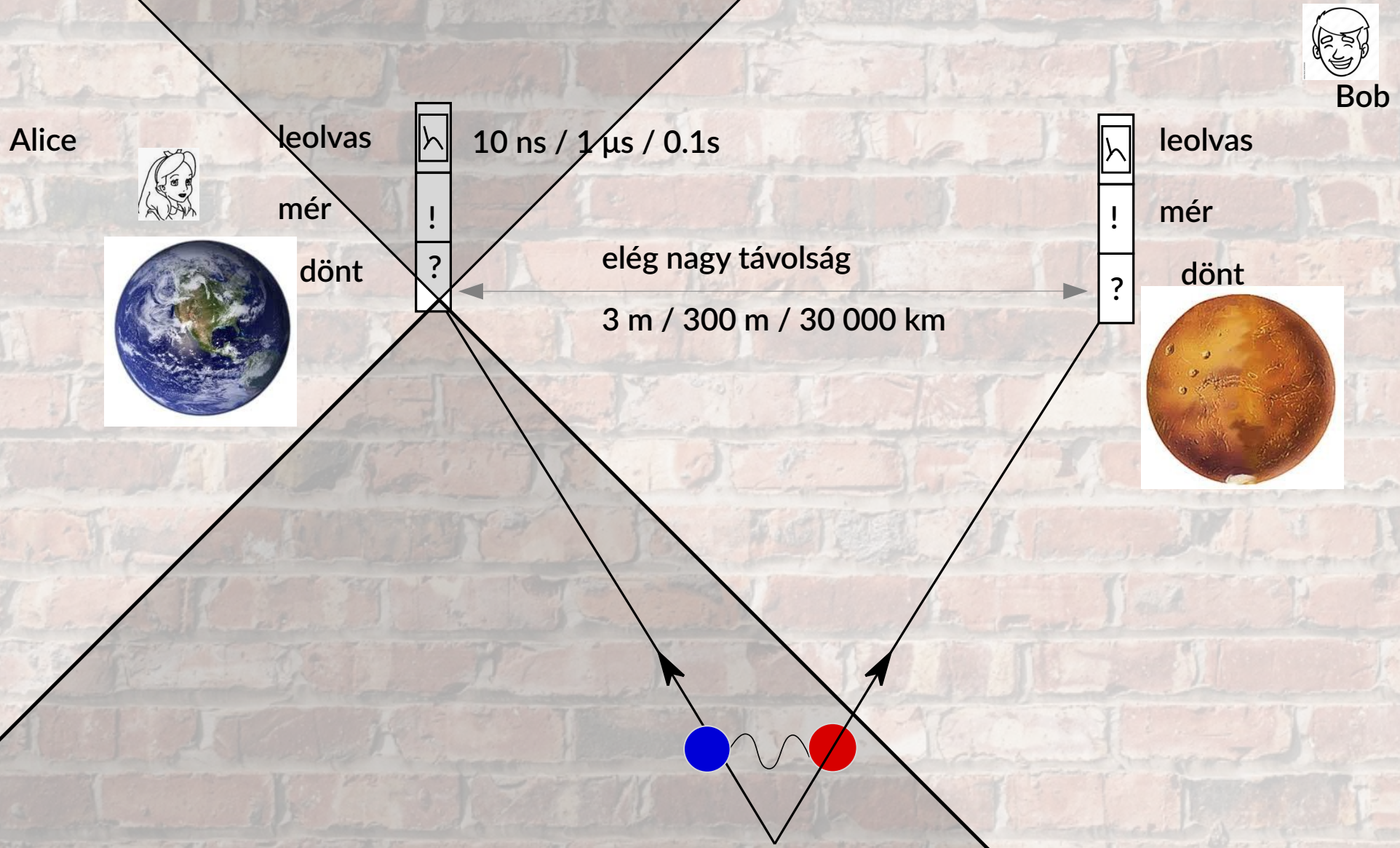
Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?


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.

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.

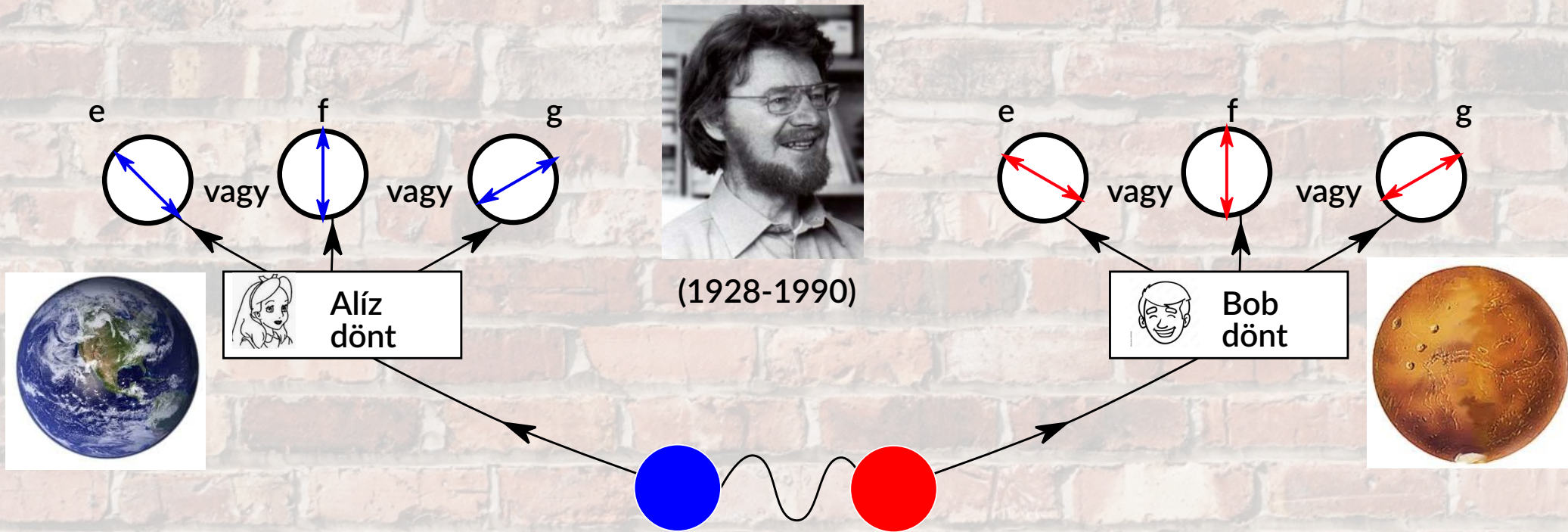




A kvantummechanika mögött valamilyen mélyebb elmélet van, lokális rejtett változók, hiszen a “kísérteties távolhatás” abszurd.

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

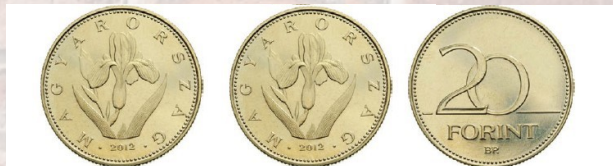
1964, JS Bell: Az EPR-kísérlet egy verziójával tetten lehet érni a “kísérteties távolhatást”.



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

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

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



Kvantumosan összefonódott állapottal $S < 1$

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

Adobe Stock | #376981026

THE NOBEL PRIZE
IN PHYSICS 2022



Alain
Aspect

John F.
Clauser

Anton
Zeilinger

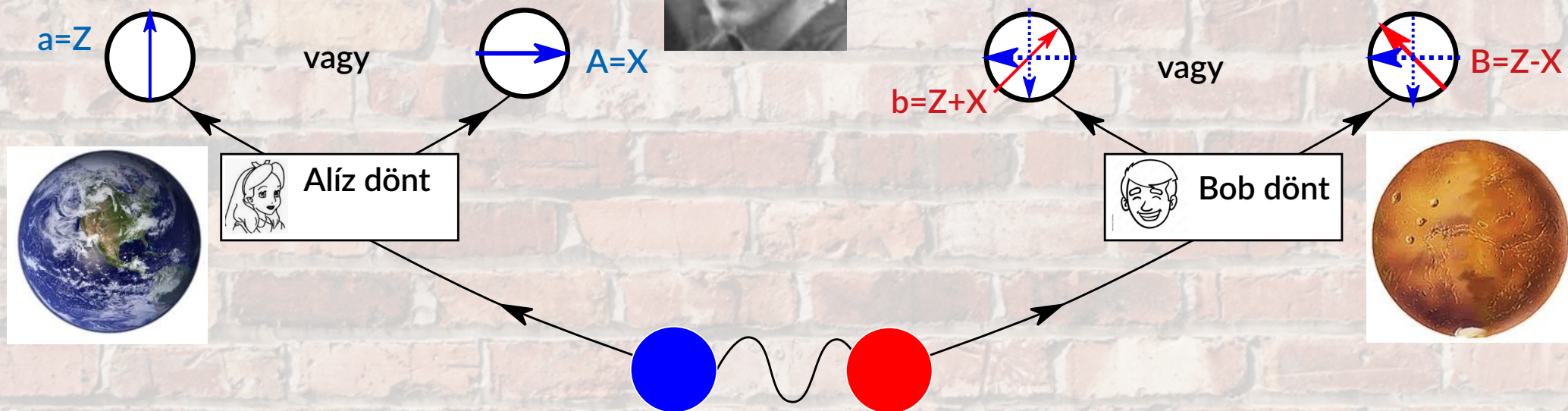
“for experiments with entangled photons,
establishing the violation of Bell inequalities
and pioneering quantum information science”

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

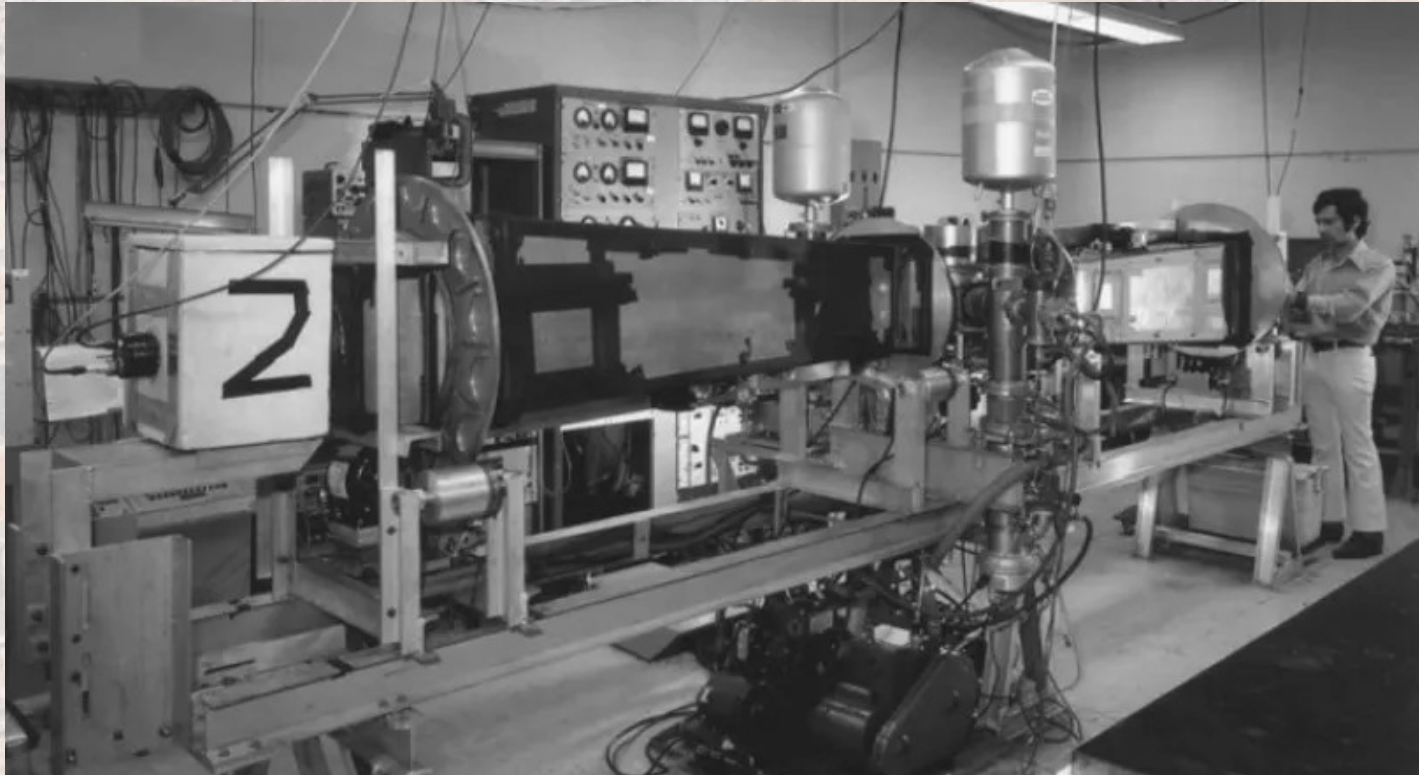


$$|\Psi\rangle_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow_{\theta,\phi}\downarrow_{\theta,\phi}\rangle - |\downarrow_{\theta,\phi}\uparrow_{\theta,\phi}\rangle)$$

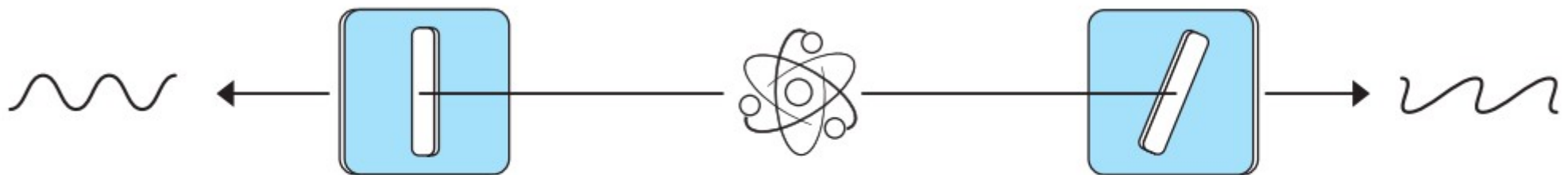
Lásd még: CHSH game

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

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

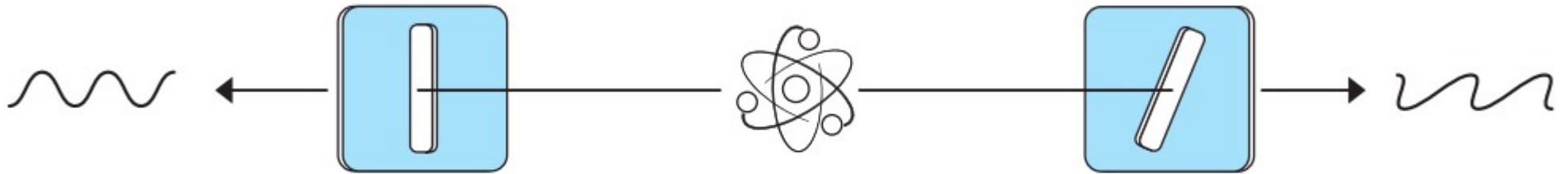


2022



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



Alain
Aspect

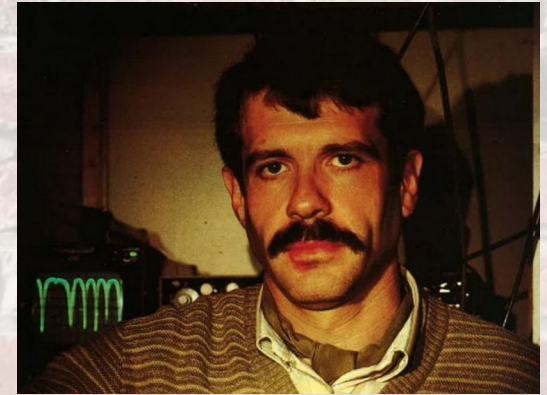
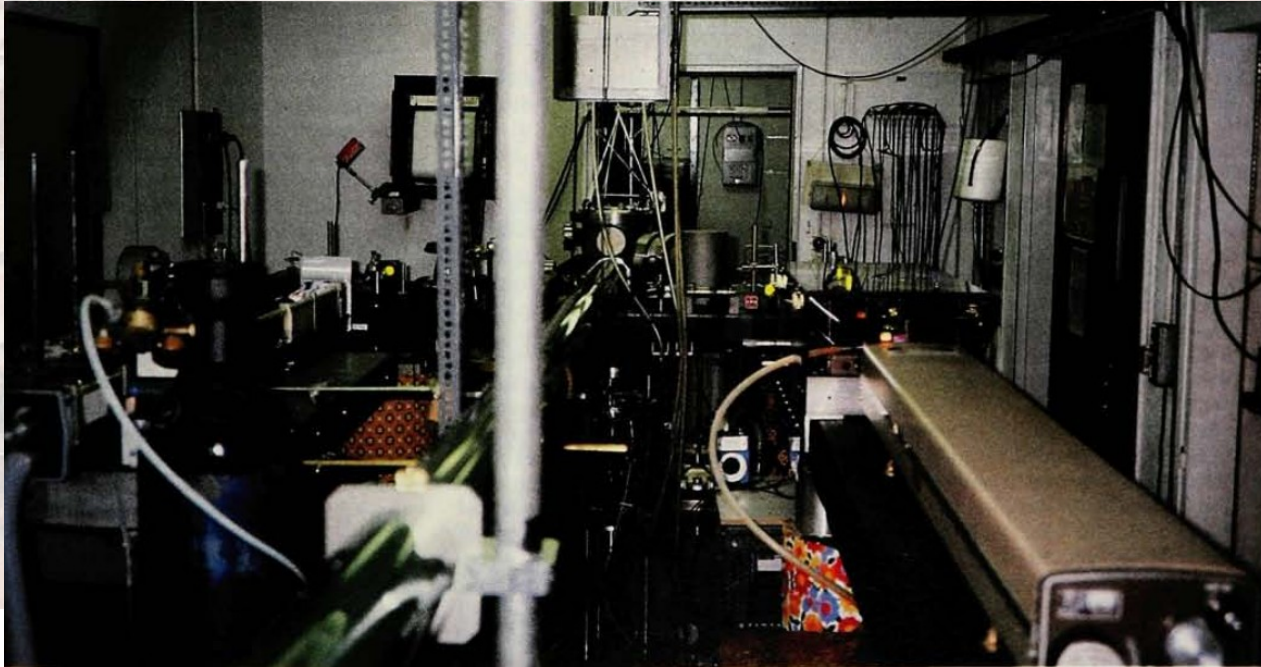
John F.
Clauser

Anton
Zeilinger

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

THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

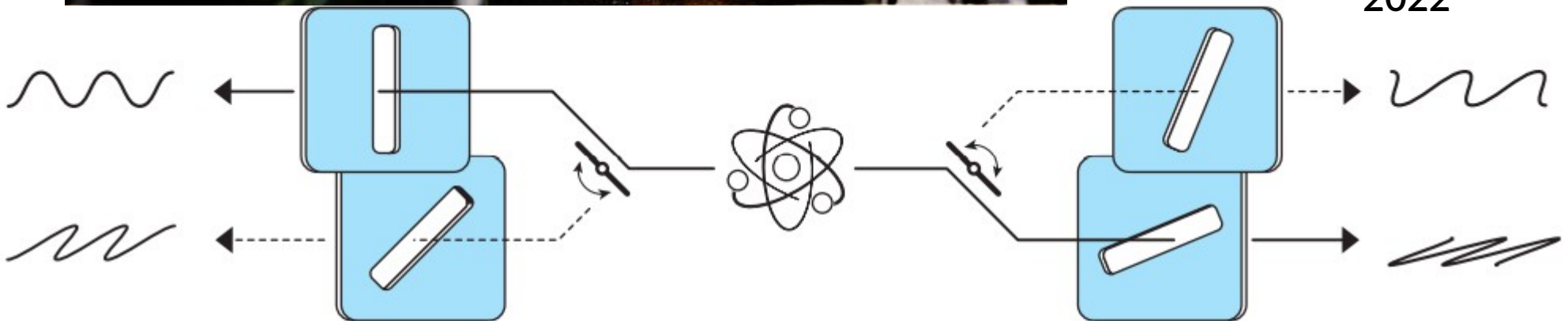
1982-84: Aspect, Paris: Lézerek → több foton,
akusztó-optikai modulátorok → Alíz és Bob váltogat
De: nem teljesen véletlenszerű, mérési határfok alacsony



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

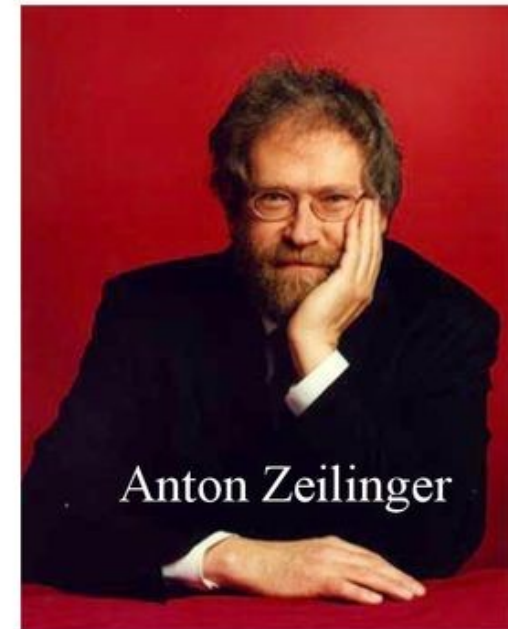
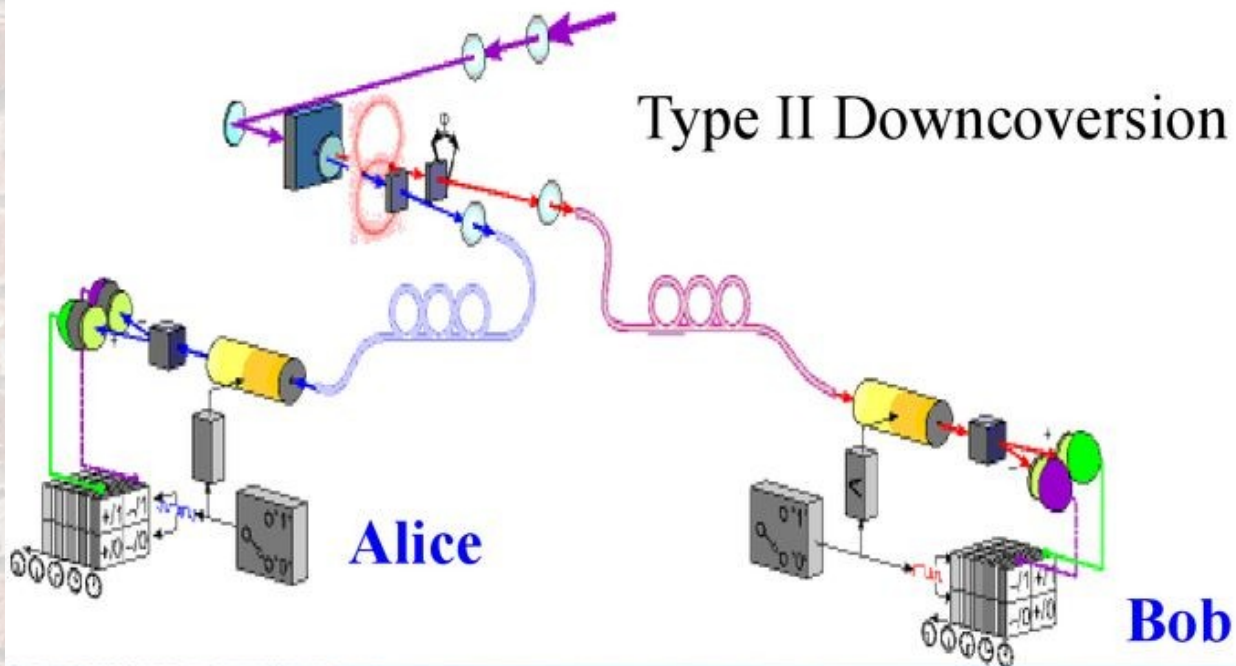
John F.
Clauser

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 határfok alacsony.



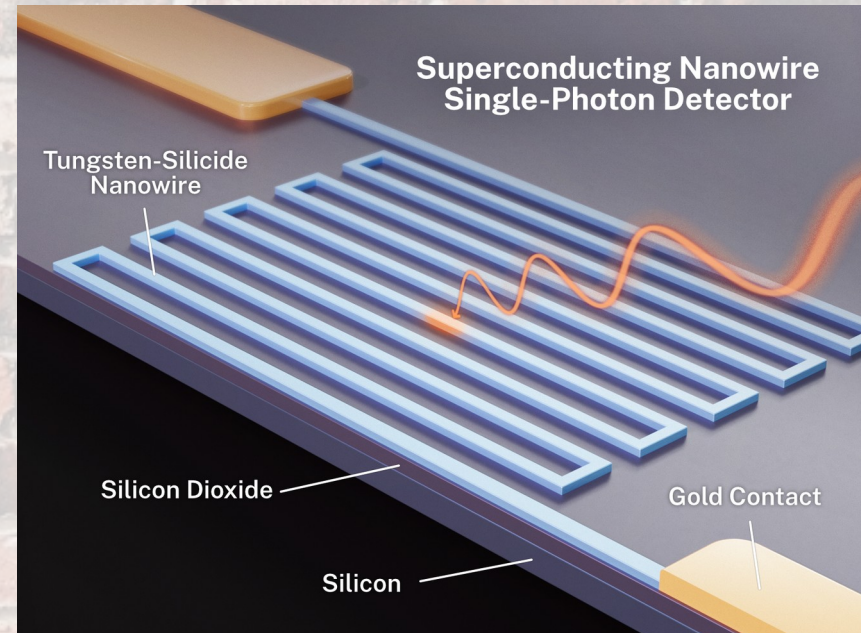
2022



Adobe Stock | #376981026

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



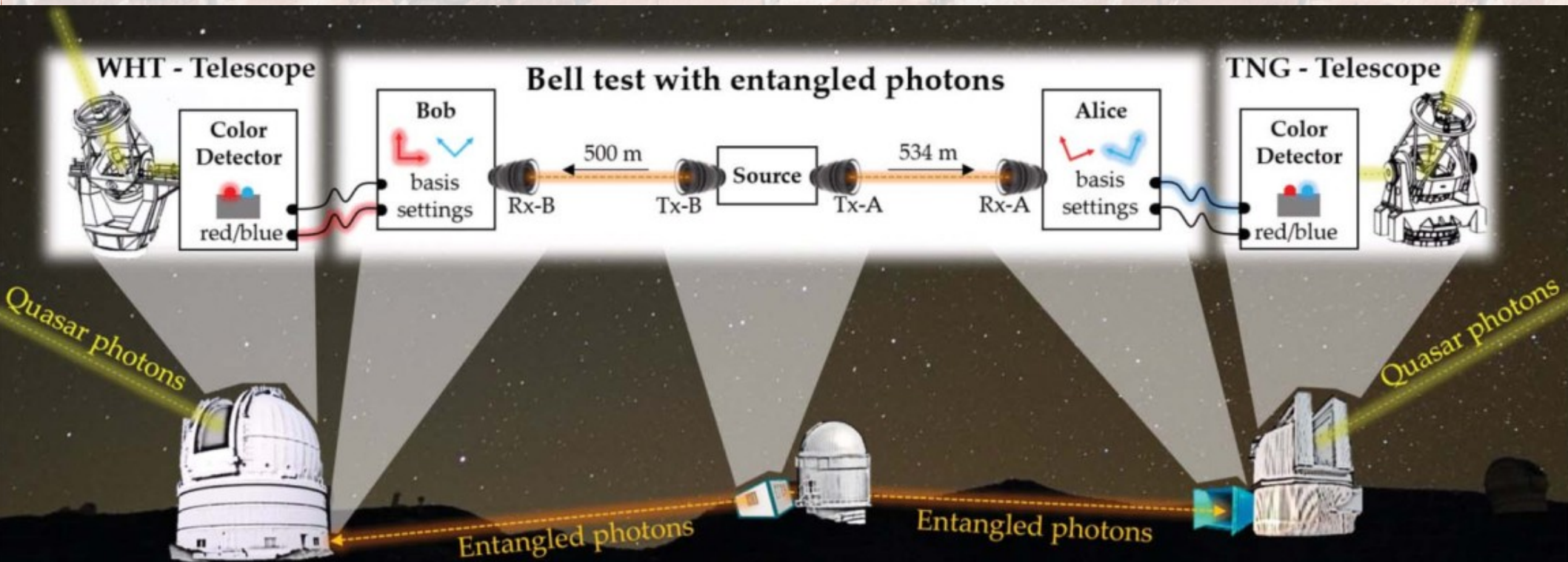
Viewpoint: Closing the Door on Einstein and Bohr's Quantum Debate

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.

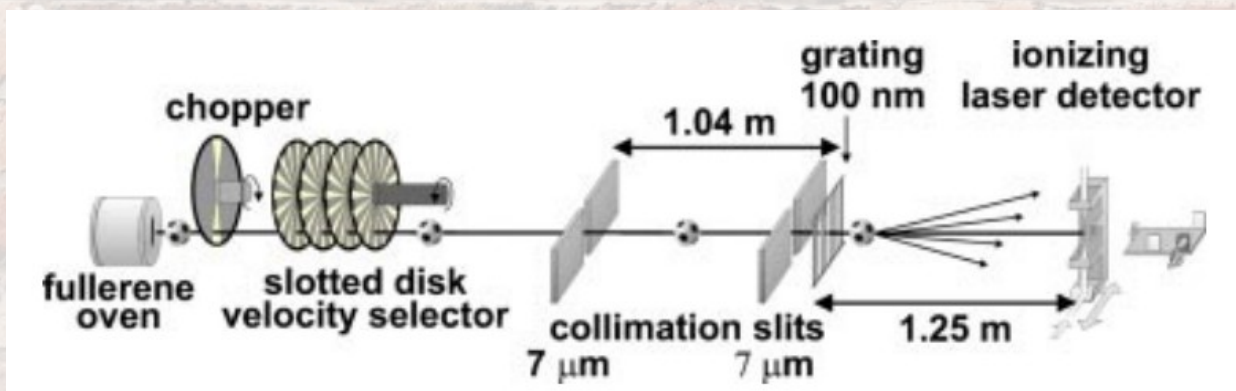
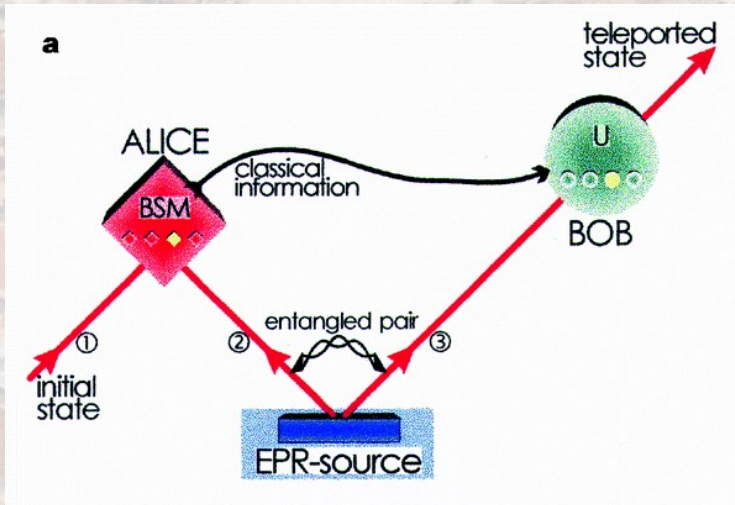
2016, Zeilinger: Bell-mérés kozmikus fotonokkal
2018, Zeilinger: Kanári-szigeteken, kvazárok fényével.
(véletlen számokat 7,8 mrd éve generálták)



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

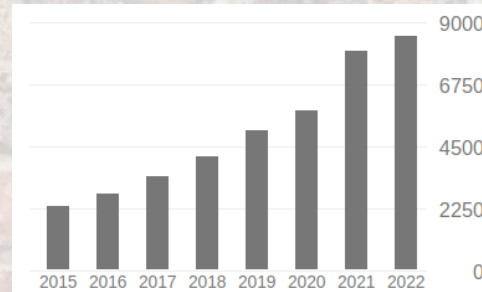
1999: Kétréskísérlet C60 fullerén molekulával



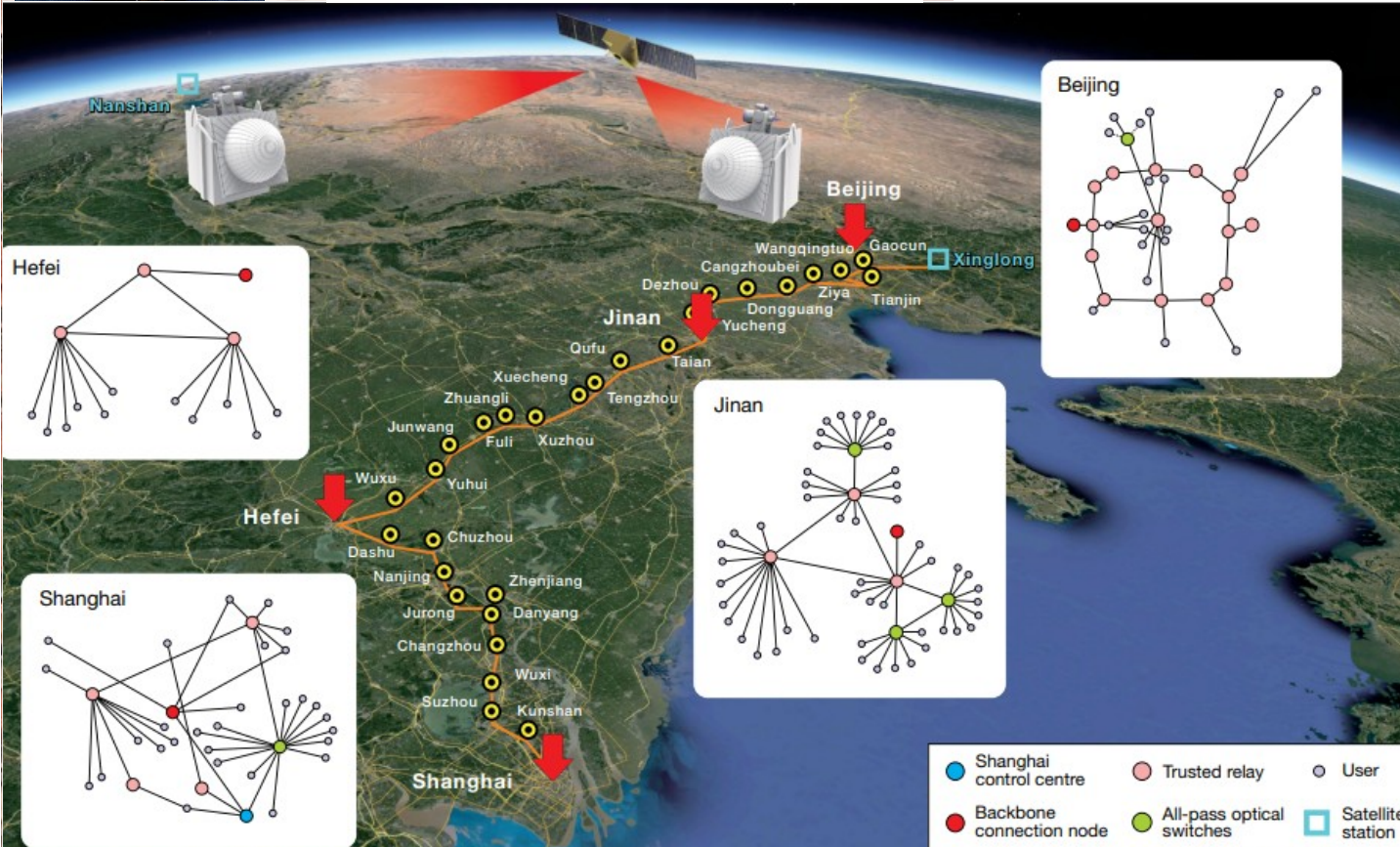
Zeilinger diákjai a kvantumtechnológia úttörői. Pl. Kínában.



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

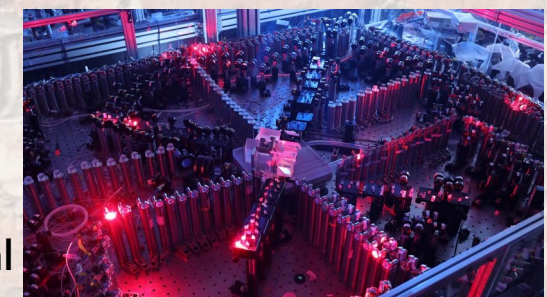
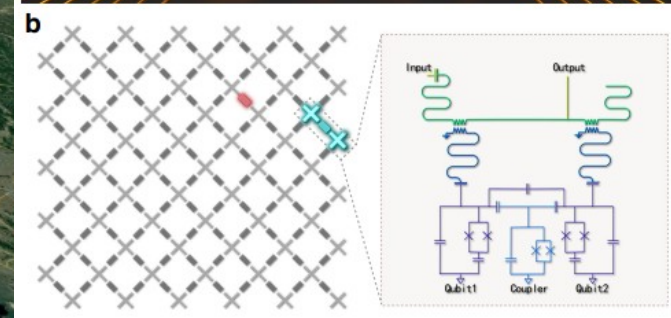
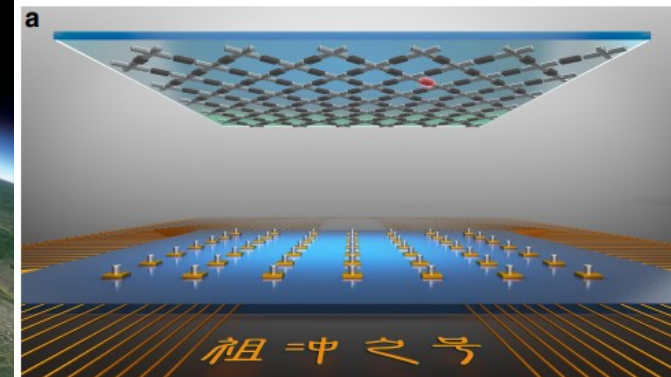


“Zhuchongzhi”
szupravezető tranzmonos
kvantumszámítógép,
60 kvantumbit, hasonlóan
jó, mint a Google gépe

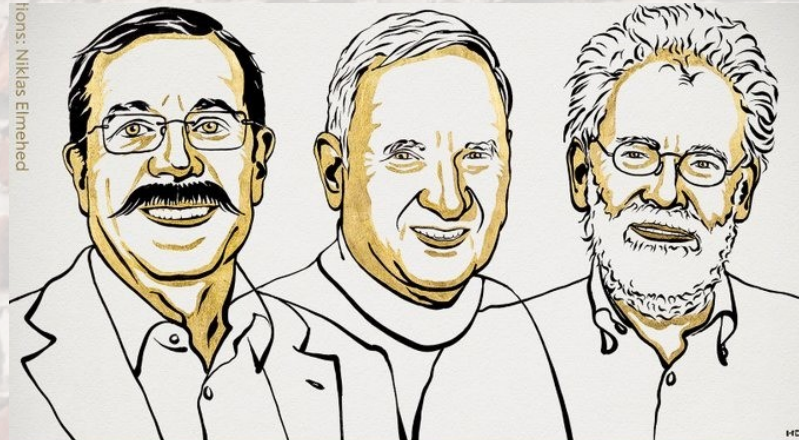


Kvantumkommunikációs hálózat:
2000 km gerinc (Shanghai-Beijing)
+ 4 városi hálózat sok csomóponttal
+ műhold (Micius)

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.
Lokális realizmus nem teljesül.
A világ végső építőkövei nem lokálisak, vagy nem “vannak”.

Na de akkor mi van?

Na de akkor mi van?

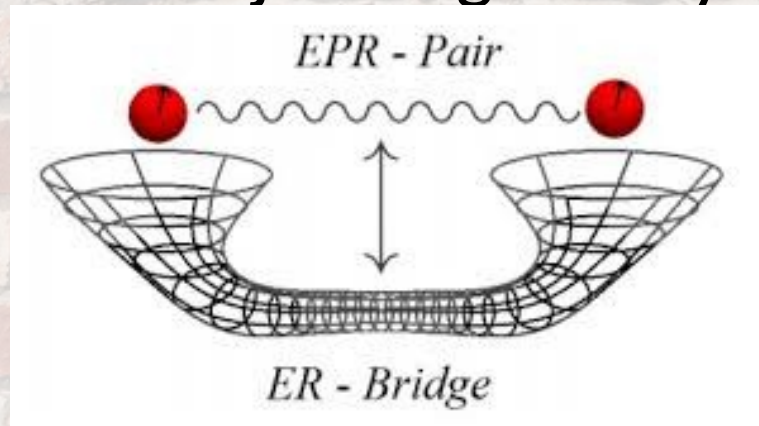
lokális realizmus

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

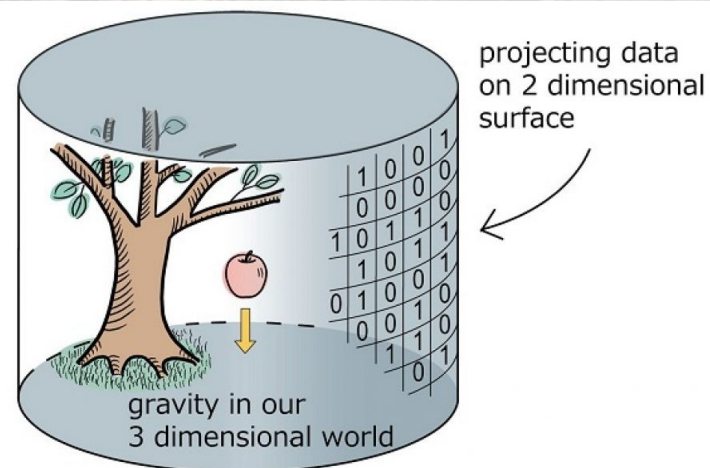
ER=EPR ?

Einstein-Rosen-bridge
= Entangled qubits?

[Susskind, Sean Carroll]

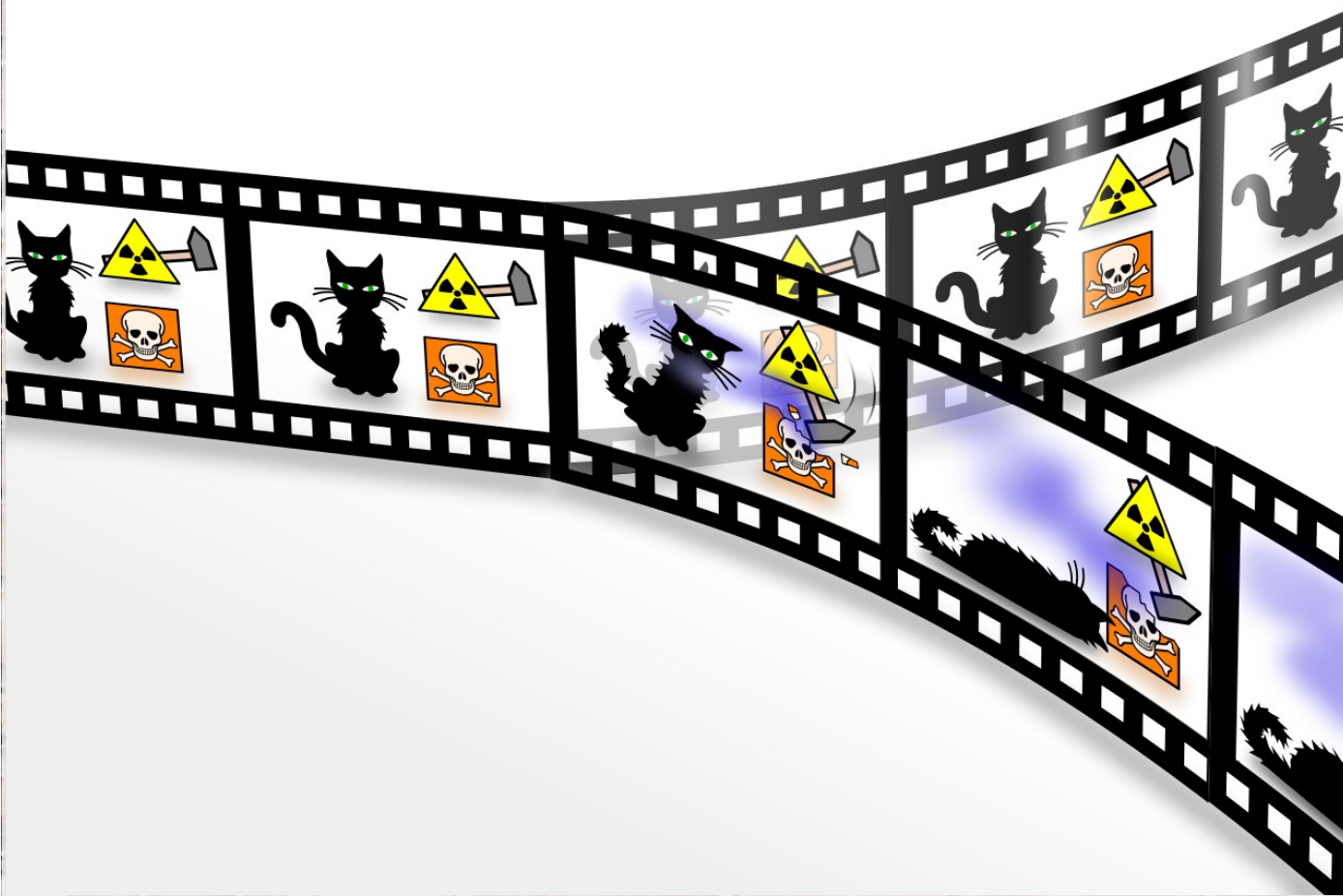


Space from Hilbert Space:
Recovering Geometry from Bulk Entanglement



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,
kölcsonhatások révén
egymáshoz képest
kialakulnak “klasszikus
világok”.

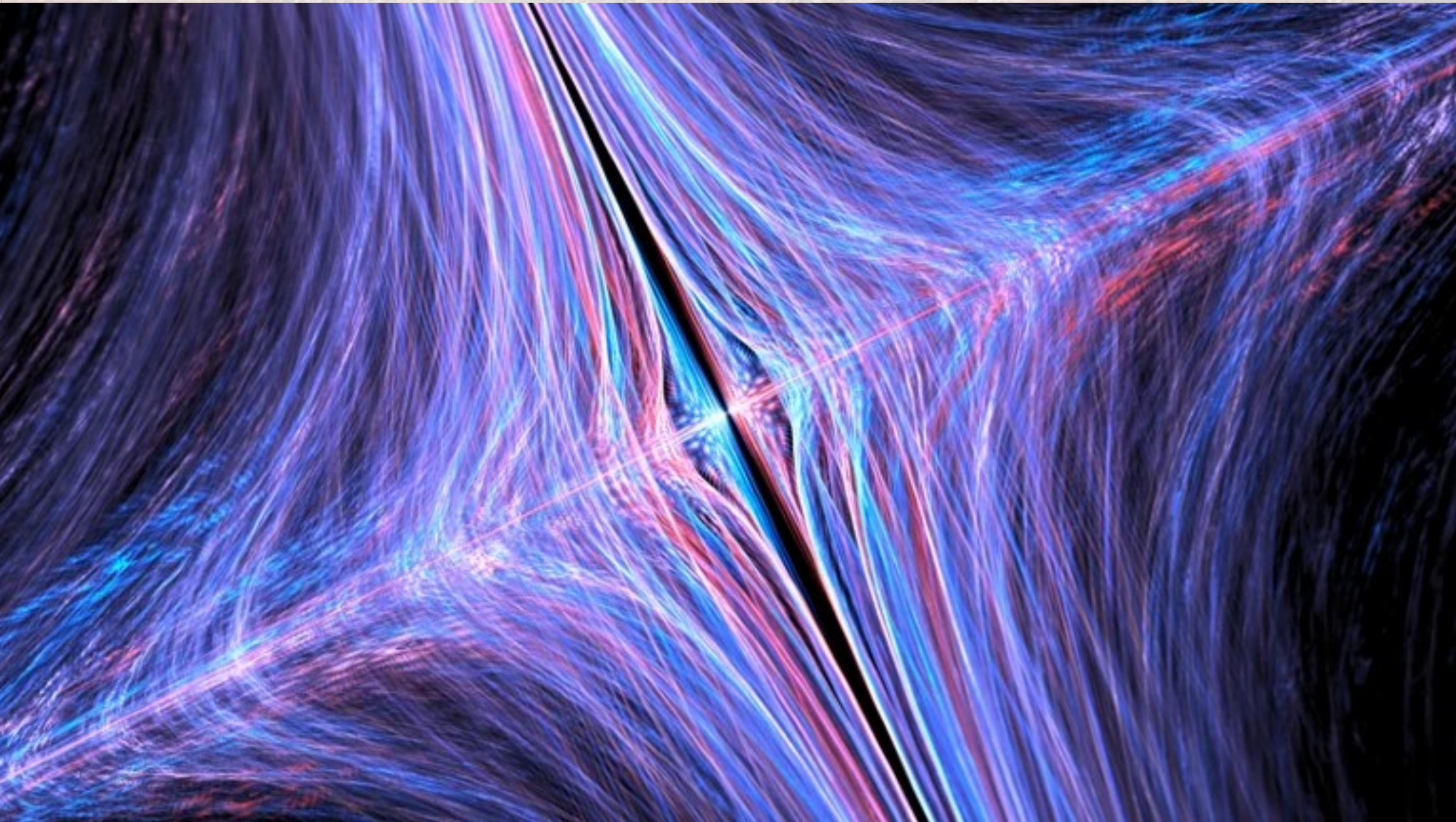
Ezek mindig újabb és újabb
ágakra bomlanak.

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

Az objektív valóság: a világegyetem hullámfüggvénye

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

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



Egy a fizika iránt is érzékeny költőóriásunk ezt így fogalmazta:

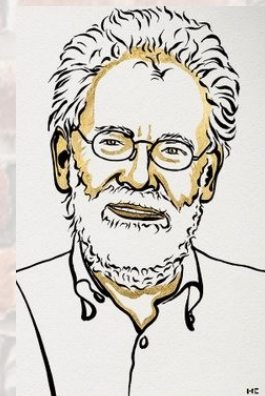
Én fölnéztem az est alól
az egek fogaskerekére -
csilló véletlen szálaiból
törvényt szőtt a mult szövőszéke
és megint fölnéztem az égre
álmaim gőzei alól
s láttam, a törvény szövedéke
mindíg fölfeslik valahol.

Egy a fizika iránt is érzékeny költőóriásunk ezt így fogalmazta:

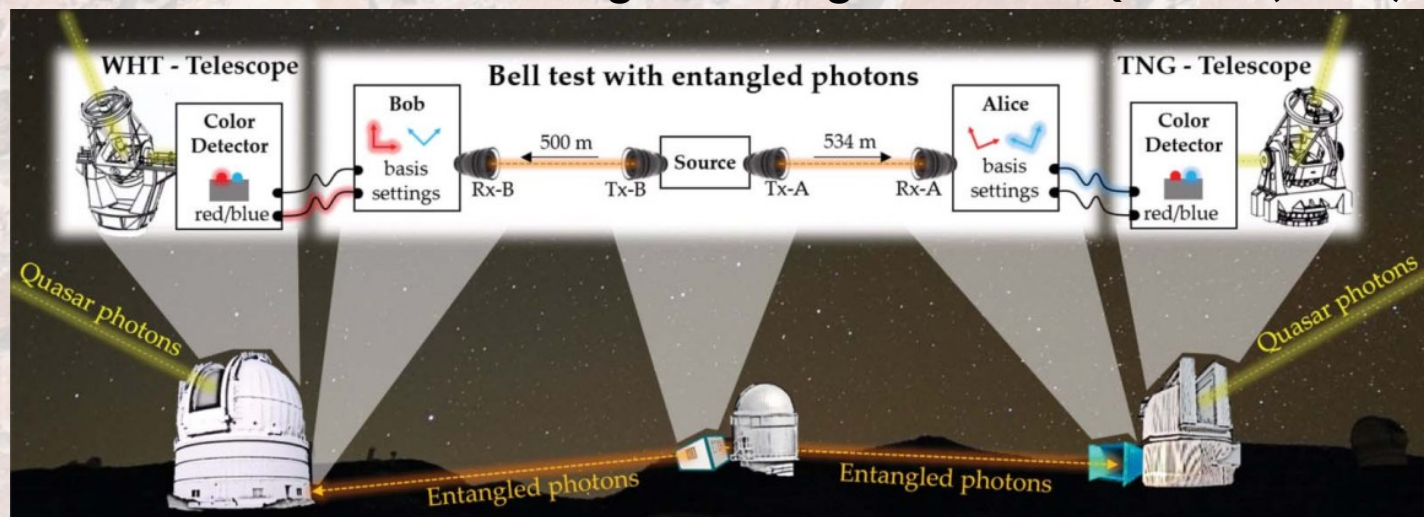
József Attila:
Eszmélet
(1934)



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 szövedéke
mindíg fölfeslik valahol.



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



Adobe Stock | #376981026

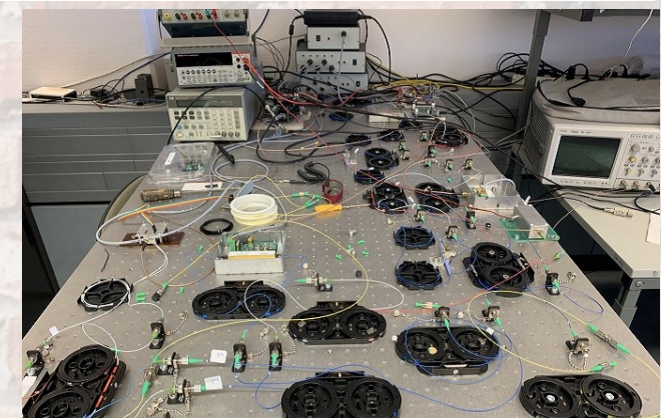
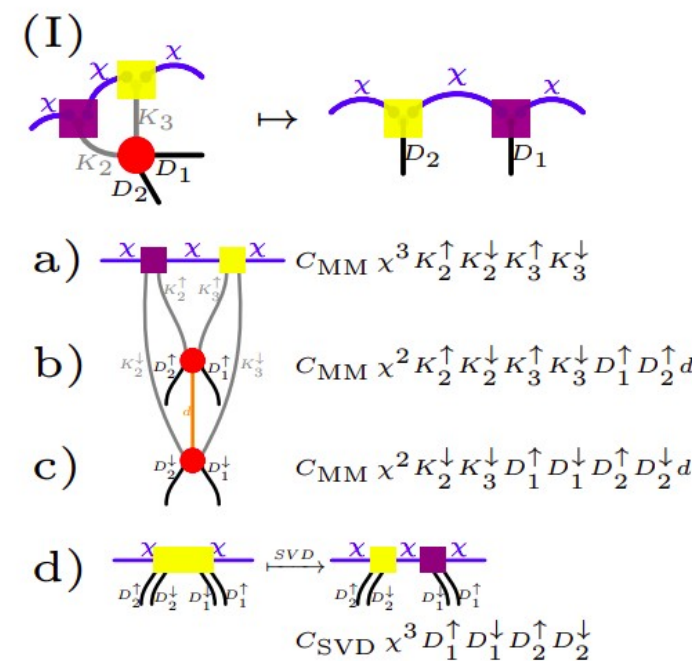
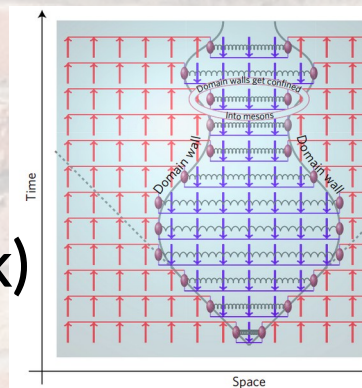
Érdekel a kvantumtechnológia? Gyere a BME-re fizikusnak vagy fizikus-mérnöknek!

- Országosan egyedülálló kísérletek
(BME Fizikai Intézet + MFA)

- Kvantuminformatika matematikai háttere
(BME Matematikai Intézet)

- Kvantumelmélet
(BME Elméleti Fizika Tanszék)

- Úttörő kvantumkommunikációs fejlesztések
(BME Villamosmérnöki Kar)



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

Adobe Stock | #376981026

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 tér-idő nem alapvető, csak kialakul?

Gyere a BME-re kvantumozni!