Kvantumparadoxonoktól a kvantumtechnikáig

A munkára fogott kísérteties hatás

I. Mi egy részecske?
Mérhető tulajdonságok halmaza

- 1 foton: [k=hullámszám, $\vec{e}$= haladási irány, $\vec{\varepsilon}$=polarizáció]

$\vec{e}\vec{\varepsilon} = 0$ polarizáció merőleges a haladásra,
jobbra/balra cirkulárisan polarizált foton: -/+ħ perdület vetület a haladás irányára

Állapot matematikai megjelenítése:

$$\vec{\varepsilon}e^{i(\vec{k}\vec{x}-\omega(k)t)}, \qquad \vec{k} = k\vec{\varepsilon}, \qquad \omega(k) = ck$$

- 1 elektron [k=hullámszám, $\vec{e}$ = haladási irány, h=haladás irányú perdület=helicitás]

h=+1/2,-1/2 x (elemi perdület-egység= ħ)

Állapot matematikai megjelenítése:

$$\binom{\alpha}{\beta} e^{i(\vec{k}\vec{x}-\omega(k)t)}, \qquad \omega(k) = (\frac{m_0^2 c^4}{\hbar^2} + c^2 k^2)^{1/2}$$

I. Mi egy részecske? Mérhető tulajdonságok halmaza

- 1 hidrogén atom

[n = főkvantumszám, l=mellék-kvantumszám,

m= mágneses kvantumszám,

s_e=elektron spinvetület, s_p=proton spinvetület

k= TKP-hullámszám, $\vec{e}$ = TKP-haladási irány]

Állapot matematikai megjelenítése:

$$\frac{1}{r}R_n(r)Y_l^m(\theta,\varphi)\begin{pmatrix}\alpha\\ \beta\end{pmatrix}_e\begin{pmatrix}\gamma\\ \delta\end{pmatrix}_p e^{i(\vec{k}\vec{X}-\omega(k)t)}$$

- **1 helium-atom ?**

Mi 2 két részecske?

- 2 foton Ψ $\{[1: k_1, \vec{e}_1, \vec{s}_1],[2: k_2, \vec{e}_2, \vec{s}_2]\}$

2 foton megkülönböztethetetlen:

Ψ $\{ [2: k_1, \vec{e}_1, \vec{s}_1],[1: k_2, \vec{e}_2, \vec{s}_2]\}$ is ugyanolyan jó

Kvantumvilág: egyetlen rendszeren belül létrejövő,

pl. egy atom által kisugárzott két foton felcserélésére változatlan állapot valósul meg! (A.Aspect, 1981, Ca-atom kétfotonos legerjesztése)

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\left[\Psi\{[1: \boldsymbol{k_1}, \vec{\boldsymbol{e}}_1, \boldsymbol{H}],[2: \boldsymbol{k_2}, -\vec{\boldsymbol{e}}_1, \boldsymbol{V}]\}+ \Psi\{[2: \boldsymbol{k_1}, \vec{\boldsymbol{e}}_1, \boldsymbol{H}],[1: \boldsymbol{k_2},-\vec{\boldsymbol{e}}_1, \boldsymbol{V}]\}\right]$$

Mi két részecske?

- 2 elektron $\Psi\{\,[1\!:k_1,\vec{e}_1,h_1],[2\!:k_2,\vec{e}_2,h_2]\}$

2 elektron megkülönböztethetetlen:

$\Psi\{\,[2\!:k_1,\vec{e}_1,h_1],[1\!:k_2,\vec{e}_2,h_2]\,\}$ is ugyanolyan jó!

Kvantumvilág: két elektron felcserélésére előjelet váltó állapot valósul meg!

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\left[\Psi\{[1\!:\boldsymbol{n_1},\boldsymbol{l_1},\boldsymbol{m_1},\uparrow],[2\!:\boldsymbol{n_1},\boldsymbol{l_1},\boldsymbol{m_1},\downarrow]\} - \Psi\{[2\!:\boldsymbol{n_1},\boldsymbol{l_1},\boldsymbol{m_1},\uparrow],[1\!:\boldsymbol{n_1},\boldsymbol{l_1},\boldsymbol{m_1},\downarrow]\}\right]$$

→Pauli-elv: az atomban két elektron nem lehet ugyanolyan tulajdonságú

→Független részecske közelítés

He-atom alapállapotában mindkét elektronra n=1, l=m=0, de $s_{z1} = -s_{z2}$

Kétfotonos rendszer létrehozása fotonhasítással

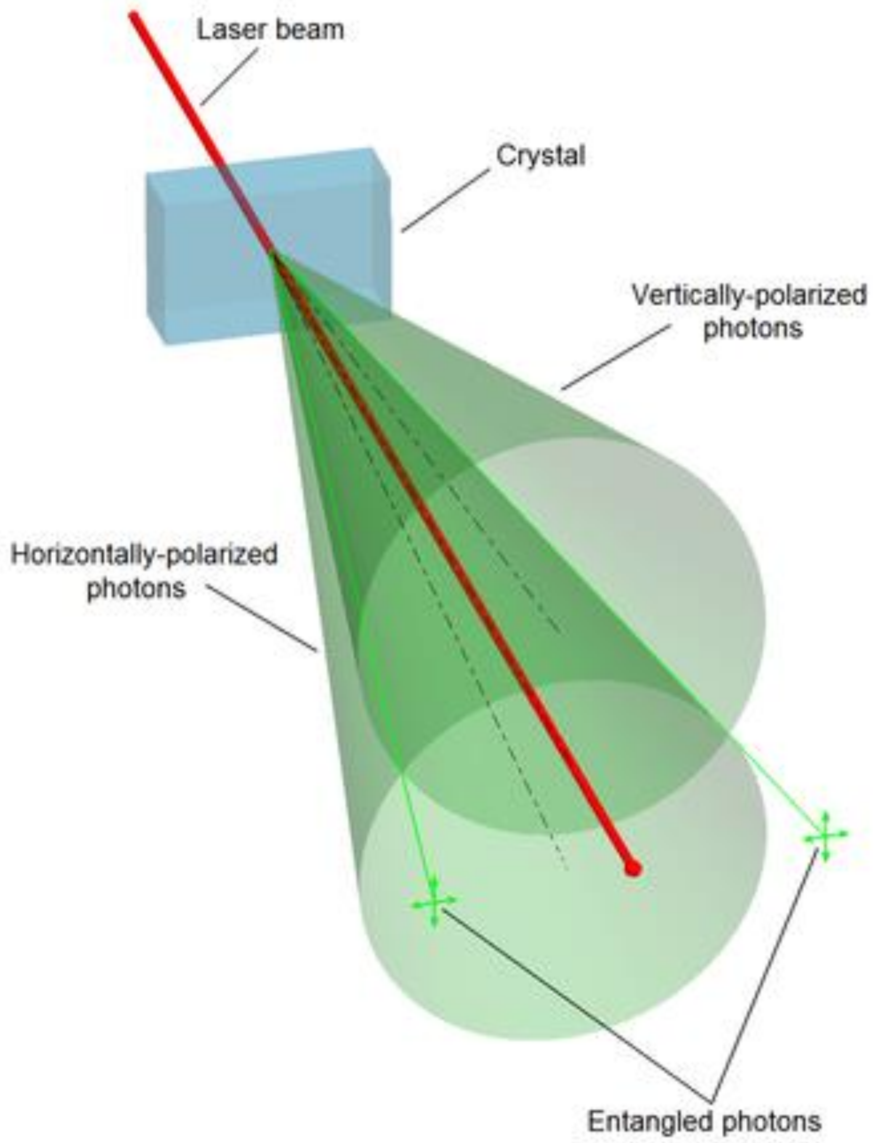
- Beta-bárium-borát: kettőstörő kristály

A beérkező lézer-fotont felhasítja
két, fele akkora hullámszámú,
különböző tengelyű kúp mentén terjedő,
egymást kiegészítő polarizációjú fotonra

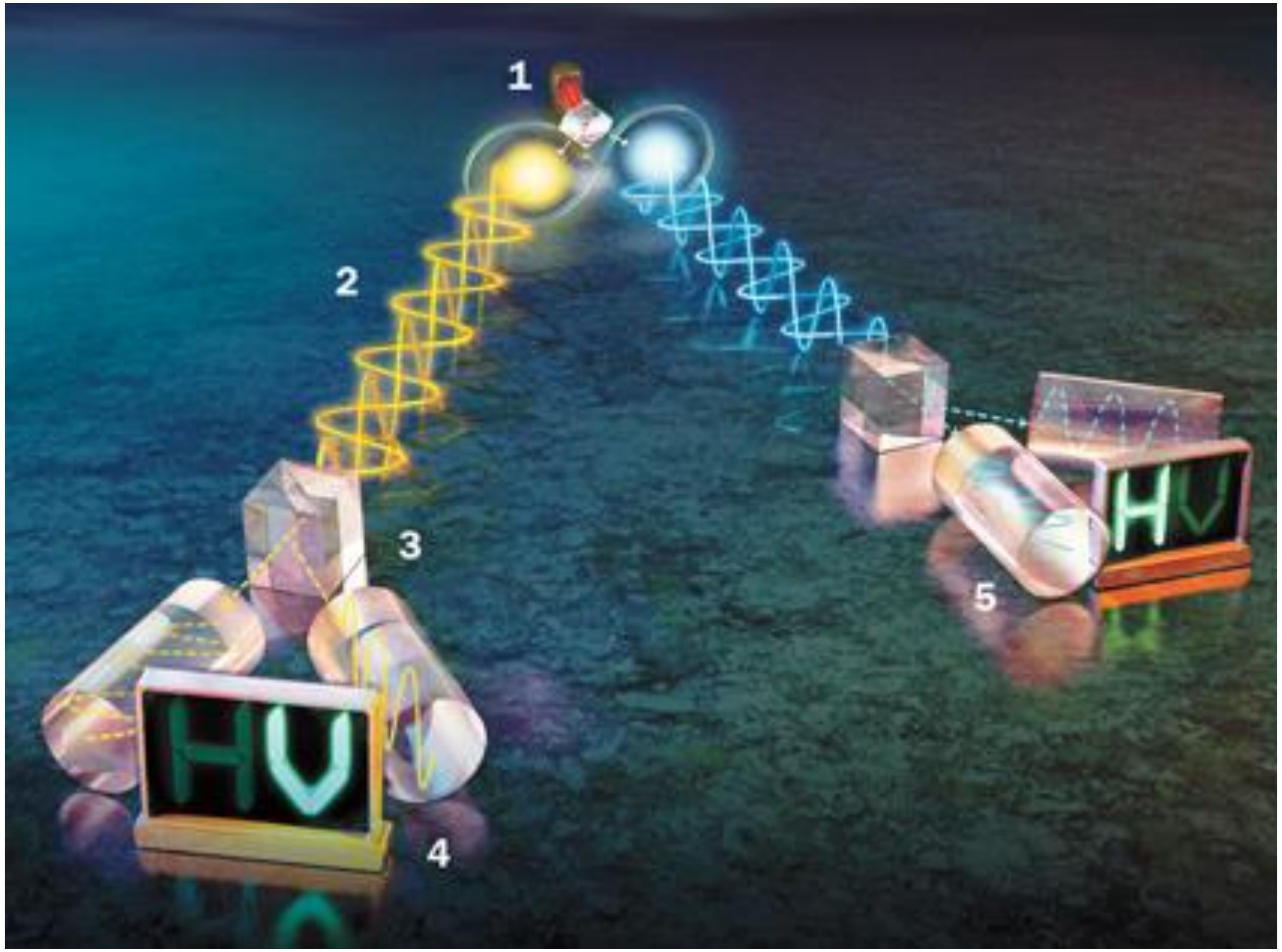
A két kúppalást metszésvonalai mentén

$$\frac{1}{\sqrt{2}}[\Psi\{[1:\boldsymbol{k_1}, \vec{\boldsymbol{e}}_1,\mathrm{H}],[2:\boldsymbol{k_2}, \vec{\boldsymbol{e}}_2,\mathrm{V}]\}$$
$$+\Psi\{[1:\boldsymbol{k_1}, \vec{\boldsymbol{e}}_1,\mathrm{V}],[1:\boldsymbol{k_2}, \vec{\boldsymbol{e}}_2,\mathrm{H}]\}]$$

H – horizontális
V – vertikális polarizációs irány



Összefonódási paradoxon (Einstein, Schrödinger)



B(OB):
V H H H V V H V V H H V

A(LICE):
H V V V H H V H H V V H

Egyenlő eséllyel mérhető H vagy V mindkét nyalábra önmagában,
korreláltság csak az adatsor összehasonlításakor derül ki!

Feltevés: A mérés egyértelmű eredményét rejtett **tulajdonság** (paraméter) határozza meg

- Rejtett tulajdonság lehetséges értékei: $\sigma_n \quad n = 1,2,\ldots$

- A polarizáció mérés eredménye A-ban és B-ben egyértelmű, ha a rejtett paraméter értéke ismert: $s_A(\sigma_n)s_B(\sigma_n)$

- A valószínűségi jellemzés klasszikus „oka”: nem tudjuk σ_n értékét

- P$(s_A, s_B \mid T_A, T_B)$: az A pontban T_A irányra, a B pontban T_B irányra mért polarizáció (s_A, s_B) eredményének valószínűsége

Valószínűségi egyenlőtlenség (J.Bell, 1964)

J.F. Clauser, M.A. Horne, A. Shimony, R.A. Holt változatában (1969)

A-ban és B-ben egymástól függetlenül 2-2 irányra vonatkozó polarizáció vetületet mérnek

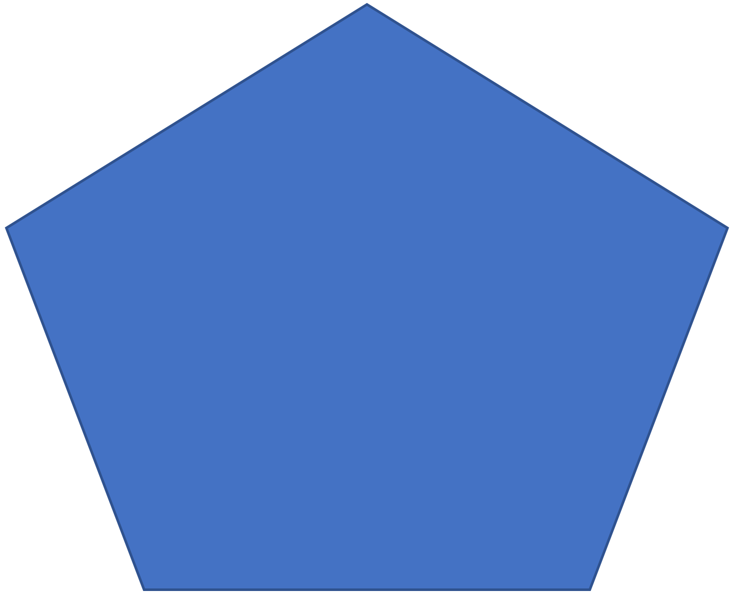
Keresik a következő valószínűségi kombináció maximumát

P(H H| $\boldsymbol{T_A}, \boldsymbol{T_B}$)+ P(V V| $\boldsymbol{T_A}, \boldsymbol{T'_B}$) + P(V H| $\boldsymbol{T'_A}, \boldsymbol{T'_B}$)+P(H H| $\boldsymbol{T'_A}, \boldsymbol{T_B}$)+ P(_ , V|_ , $\boldsymbol{T_B}$)

(Az utolsó eseménynél nem vizsgálják mi történik A-ban)

Kizárási görbe

Függetlenségi fok: 2



Egymást kizáró eseményeket tartalmazó halmaz valószínűségi összegeinek maximuma:
A nem-kizáróak maximalizálása (=1), az általuk kizártak minimalizálása (=0)

CHSH-egyenlőtlenség

P(H H| $\boldsymbol{T_A}, \boldsymbol{T_B}$)+ P(V V| $\boldsymbol{T_A}, \boldsymbol{T'_B}$) + P(V H| $\boldsymbol{T'_A}, \boldsymbol{T'_B}$)+P(H H| $\boldsymbol{T'_A}, \boldsymbol{T_B}$)+ P(_ , V|_ ,$\boldsymbol{T_B}$) ≤ 2

DE **P(_ , V|_ ,$\boldsymbol{T_B}$)=1/2**

EZÉRT

P(H H| $\boldsymbol{T_A}, \boldsymbol{T_B}$)+ P(V V| $\boldsymbol{T_A}, \boldsymbol{T'_B}$) + P(V H| $\boldsymbol{T'_A}, \boldsymbol{T'_B}$)+P(H H| $\boldsymbol{T'_A}, \boldsymbol{T_B}$) $\leq 3/2$

CHSH-egyenlőtlenség

$P(ab|t_A,t_B) = \langle[1+(-1)^a A][1+(-1)^b B]\rangle/4$

a,b = 0, ha H, =1, ha V

$P(HH|t_A, t_B) = \frac{1}{4}(1 + \langle A\rangle + \langle B\rangle + \langle AB\rangle)$

$P(VV|t_A, t'_B) = \frac{1}{4}(1- \langle A\rangle - \langle B\rangle + \langle AB'\rangle)$

$P(HV|t'_A, t'_B) = \frac{1}{4}(1+ \langle A'\rangle - \langle B'\rangle - \langle A'B'\rangle)$

$P(VV|t'_A, t_B) = \frac{1}{4}(1- \langle A'\rangle - \langle B\rangle + \langle A'B'\rangle)$

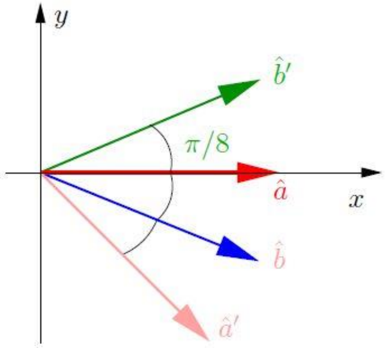
$$\langle AB\rangle+\langle A'B\rangle+\langle AB'\rangle-\langle A'B'\rangle \le 2$$

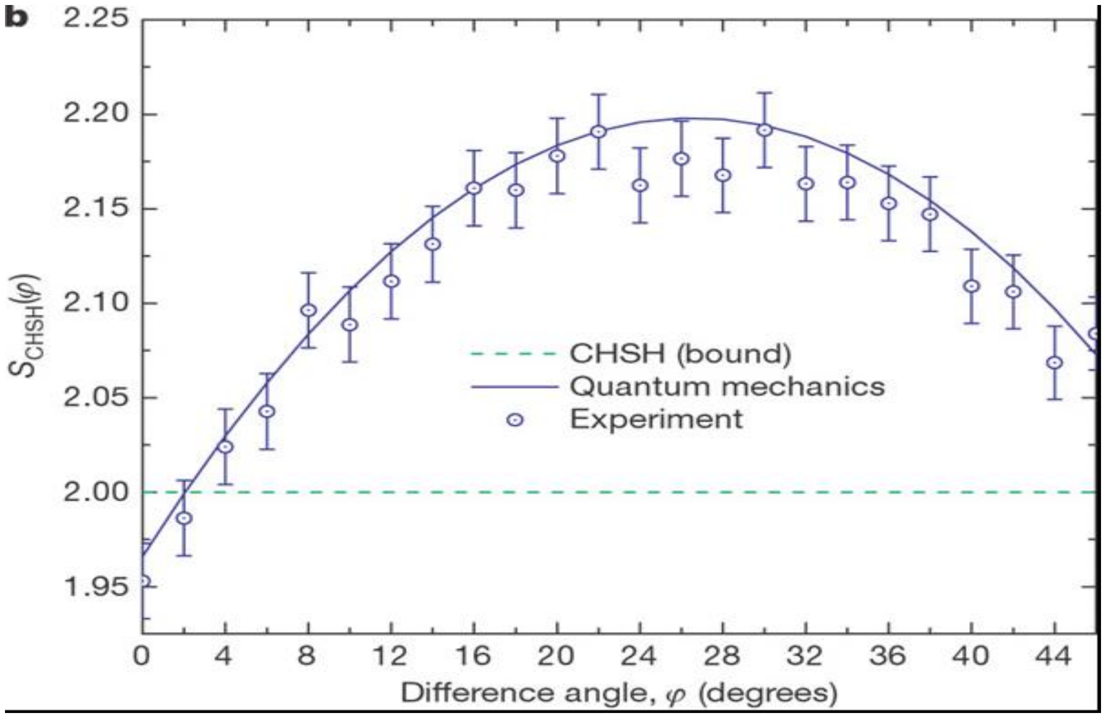
A kísérlet („Bell-teszt”)

A polarizációt analizáló berendezés tengelyének a függőlegessel bezárt iránya

$$T_A: \frac{\pi}{2}, \quad T'_A: \frac{3\pi}{4} \qquad T_B: -\varphi, \quad T'_B: \varphi$$

Optimális irányválasztás





Shimony 1979, Aspect 1982, ….
Az egyenlőtlenség sérül a kvantummechanikai jóslattal összhangban

Zeilinger és mktsai, 2007

Az első kvantumkommunikációs műhold (Kína, vezető tudós: Jian-Wei Pan)

- 2016 augusztus:

Micius – műhold
Névadó: V. századi kínai tudós

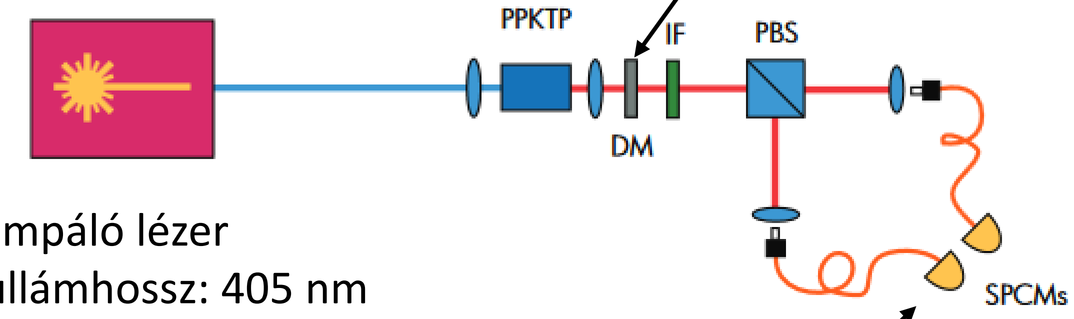
Pályamagasság: 500km

Fotonhasítás:

Periodikus polarizáltságú kálium-titanil-foszfát (PPKTP) kettőstörő meta-anyaggal

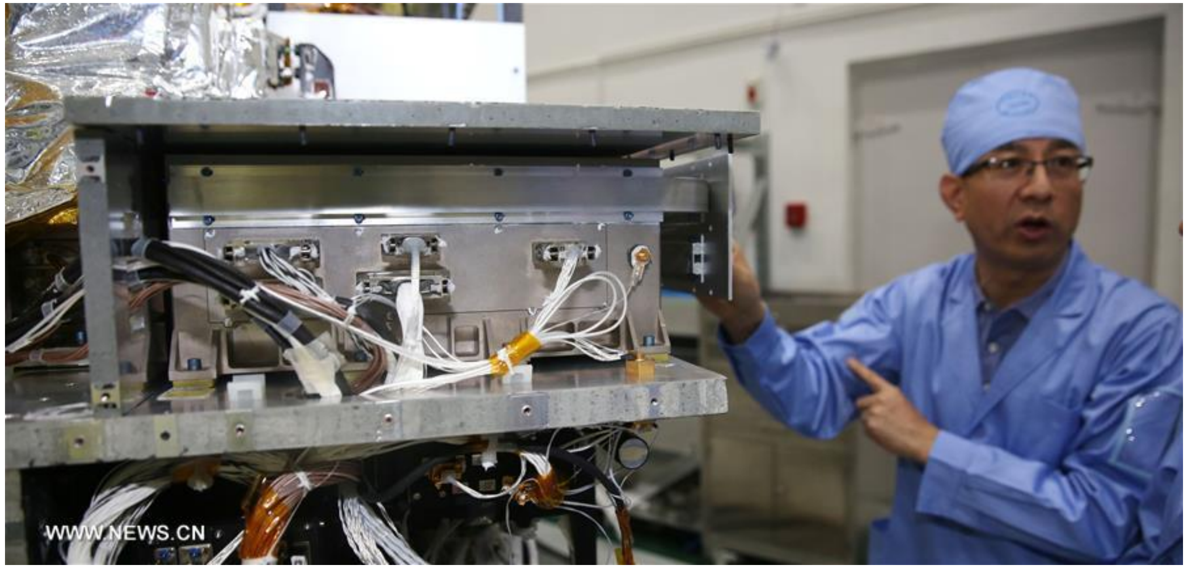
Összefont két-fotonos állapot keltése a műholdon

H-V szimmetrikus
állapotú fotonpár
Hullámhossz: 810 nm



Pumpáló lézer
Hullámhossz: 405 nm
Teljesítmény: 30 mW

Egyfoton-detektorok
két foton koincidens
észlelésére



Teljesítmény: **5,9 millió polarizációsan összefont fotonpár / s**

Minőség: **91%-os hűséggel tökéletes összefonódású párok**

Földi vevőállomások Tibetben

Tengerszint felett

Delingha 3153 m

Lijiang 3233 m

Földi távolság: 1203km

Az összefonódottság ellenőrzése:

Bell-teszt koincidens párokon

Légkörben terjedő fotonok szóródása, elnyelése
a koincidens összefont jelet lerontja, ha
a távolság cca. 100km-t meghaladja

1203km kiterjedésű kvantumállapot észlelése

Technikai kihívások:

Két állomás egyidejű láthatósági ideje: 275 s

Észlelő és küldő teleszkópok irányának összehangolása (1/2 mrad szögpontosság)

Mozgó forrásról érkező jelek egyidejűsége

Polarizáció síkjának elfordulása a Föld mágneses terében

Eredmény: 11/s koincidens fotonpár észlelése,
CHSH-kombináció mért értéke: 2,37 +/- 0,09

Science, 2017.augusztus

Kvantum kísérletek műhold-Föld távolságon

2017. szeptember 9. (cikk a Nature folyóiratban)

Fotonállapot teleportálása földi állomásról műholdra

Kvantumteleportáció

- Két foton lehetséges polarizációs állapotai

$$\uparrow\uparrow \qquad \rightarrow\rightarrow \qquad \uparrow\rightarrow \qquad \rightarrow\uparrow$$

- „Bell-bázis”:

$$\boldsymbol{K1}: \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\mathbf{2}}}(\uparrow\uparrow + \rightarrow\rightarrow), \boldsymbol{K2}: \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\mathbf{2}}}(\uparrow\uparrow - \rightarrow\rightarrow)$$

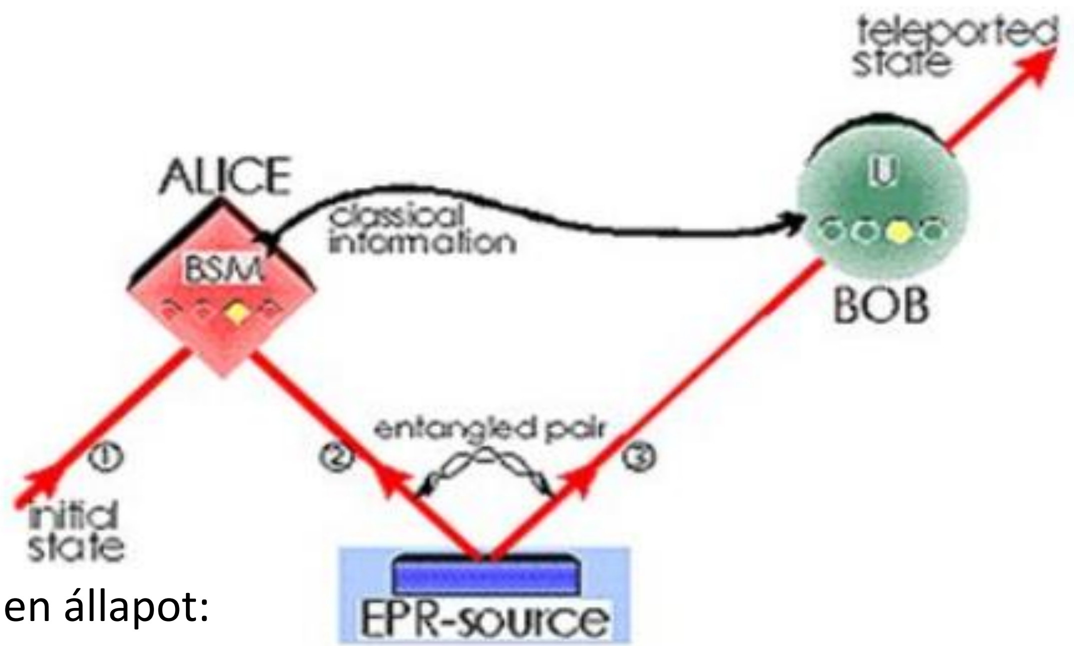
$$\boldsymbol{K3}: \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\mathbf{2}}}(\uparrow\rightarrow + \rightarrow\uparrow), \boldsymbol{K4}: \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\mathbf{2}}}(\uparrow\rightarrow - \rightarrow\uparrow)$$

Fordított kifejezés

$$\uparrow\uparrow = \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\mathbf{2}}}(\boldsymbol{K1} + \boldsymbol{K2}), \ \rightarrow\rightarrow = \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\mathbf{2}}}(\boldsymbol{K1} - \boldsymbol{K2})$$

$$\uparrow\rightarrow = \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\mathbf{2}}}(\boldsymbol{K3} + \boldsymbol{K4}), \ \rightarrow\uparrow = \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\mathbf{2}}}(\boldsymbol{K3} - \boldsymbol{K4})$$

Kvantumteleportáció



Ismeretlen állapot:
$c_V \uparrow + c_H \rightarrow$

Összefont polarizációs állapot előállítása: **K4(2,3)**

„3" elküldése BOB-nak, aki fényvezető gyűrűben őrzi az egymás utáni fotonokat

Kezdő állapot:

$(c_V \uparrow + c_H \rightarrow)_1$ **x K4(2,3)** =

$$= \frac{1}{2}[K1(1,2) \text{ x } (c_V \rightarrow - c_H \uparrow)_3$$

$$+K2(1,2) \text{ x } (c_V \rightarrow + c_H \uparrow)_3$$

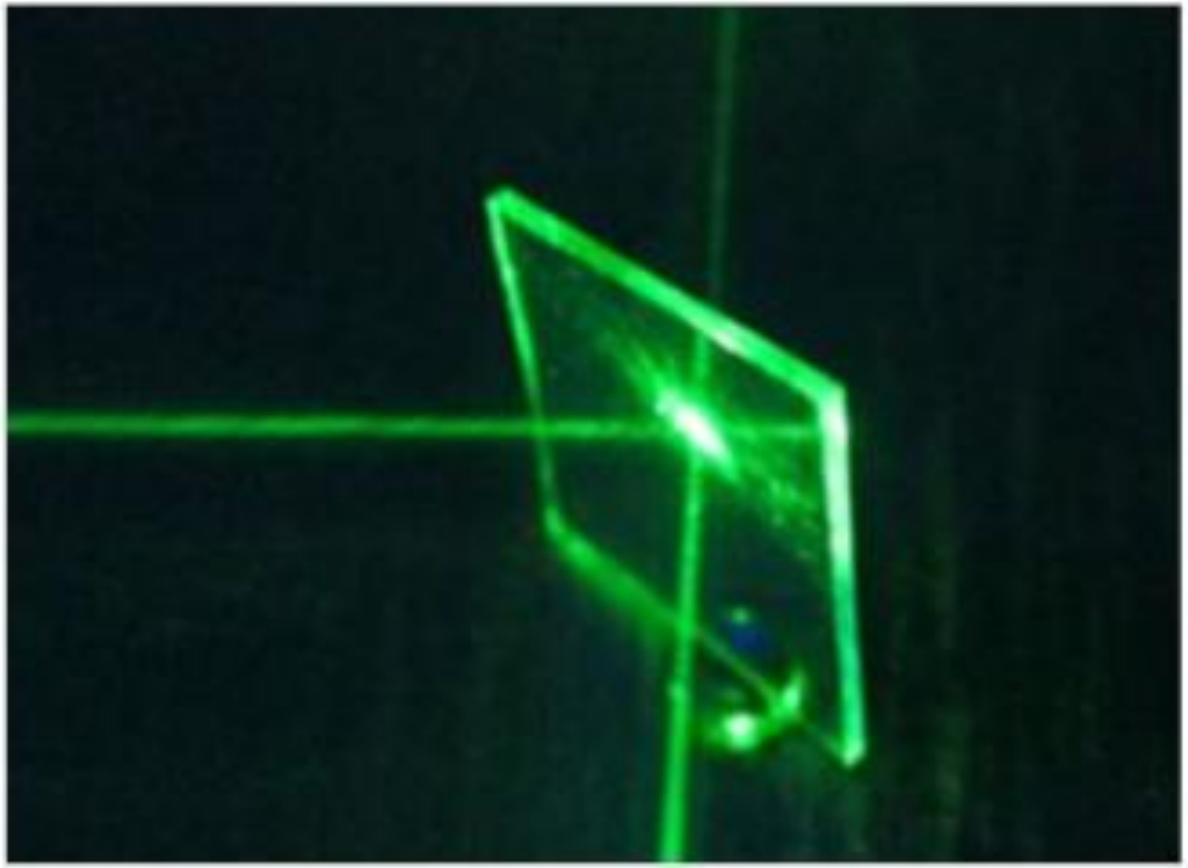
$$+ K3(1,2) \text{ x } (-c_V \uparrow + c_H \rightarrow)_3$$

$$-\boldsymbol{K4(1,2)} \textbf{ x } (c_V \uparrow + c_H \rightarrow)_3]$$

Kvantumteleportáció

ALICE-nál egyszerű optikai eszköz az ún. **„Bell-mérés”** elvégzésére:

azonosítani tudja a K4(1,2) állapotot



A félig áteresztő – félig tükröző tükör

Kvantumteleportáció

ALICE: Feljegyzi azon mérések időpontjait, amikor **K4(1,2)-t észlel** (átlagosan minden negyedik ilyen)

Telefonvonalon megadja az időpontok sorozatát BOB-nak

BOB: kiválogatja az adott időpontokban hozzá érkezett fotonokat

E fotonok állapota hibamentesen egyezik a kiinduló állapottal!

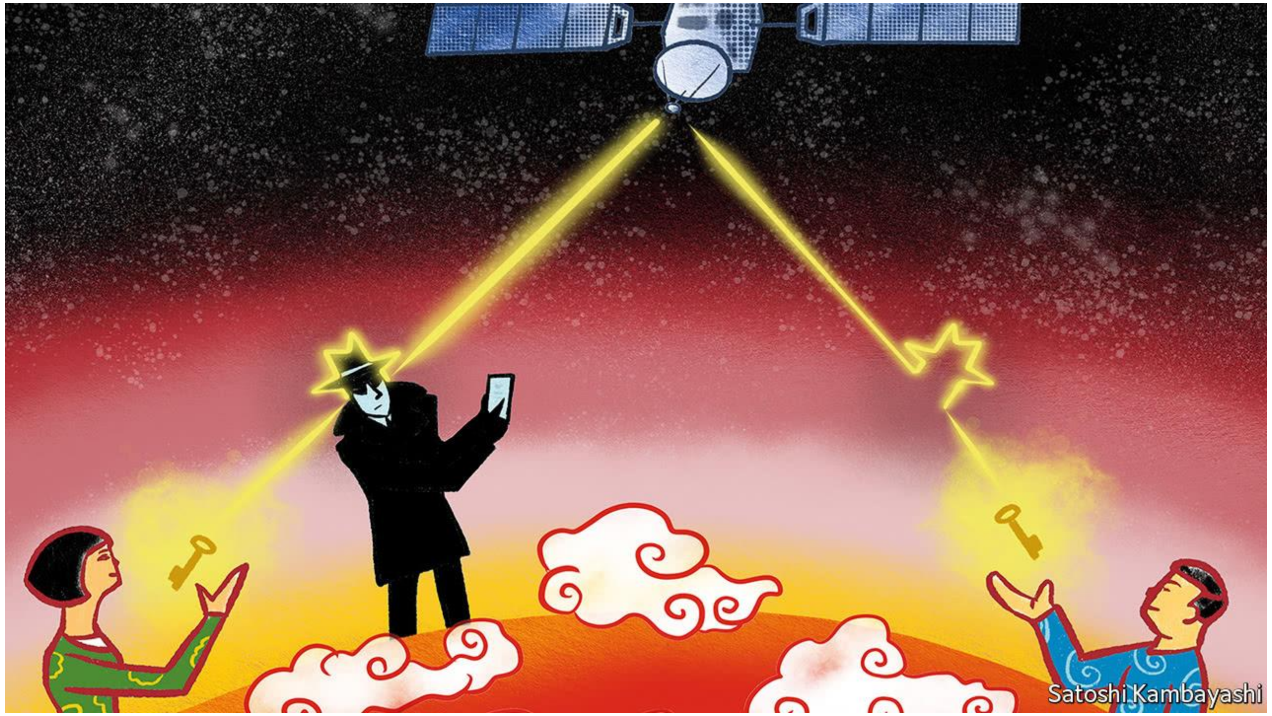
Az állapotot és nem anyagot teleportáltak!

Nincs klónozás, a kiinduló állapotú foton megsemmisült!

Kvantumkriptográfia

2017. szeptember 9. (cikk a Nature folyóiratban)

Kvantum kódkulcs-szétosztás műholdról földi állomások között
(az abszolút biztonságos kommunikáció lehetősége)



Kvantumkriptográfia

- Üzenet bit-sorozat: 11110000
- **Titkosító bitsorozat**: **10001101** Kódolás: különbség
- Kódolt üzenet: **01100011** Visszaállítás: összeg

Feladat: titkosító bitsorozat ellophatatlan megosztása ALICE és BOB között

Bennett-Brassard kvantum-algoritmus (1984):

csak szuperpozícióra épül (nem használja az összefonódást!)

1. lépés: A → B fotonsorozat küldés, egymástól függetlenül véletlenszerűen választott polarizációs bázisban

+: [↑ →] ×:[↗ , ↘]

Bit↔polarizáció egymáshoz rendelés: (0 ↔ ↑, ↗) (1 ↔ →, ↘)

Kvantumkriptográfia

- ALICE bitsorozata és bázis-választása

Bitsorozat 0 1 1 1 0 0 1 0

Bázis + + × × × + + × **NYILVÁNOS!**

Átküldött foton → ↑ ↗ ↗ ↘ → ↑ ↘

- BOB észlelt foton-polarizációi

Analizáló bázisa + × + × × × + + **NYILVÁNOS!**

Észlelt foton → ↗ ↑ ↗ ↘ ↘ ↑ →

Közös bázis,

azonos polarizáció **0 - - 1 0 - 1 - Közös bitsorozat a titkos kód,**
az azonos tengelyű analizátorokhoz tartozó bit-sorozatot csak A é B tudja

Kvantumkriptográfia

2. lépés: meg kell győződni arról, hogy nem mérték a fotonsorozat polarizációit a kód ellopásának szándékával

Statisztikai vizsgálat: Kiemelnek egy ***n* hosszúságú részsorozat**ot az ***N* hosszúságú kód**ból

($N \gg n \gg 1$)

Ha a mért polarizációkból csak egy is eltér, akkor „belenyúltak”: új kiosztást kell kezdeni.

Mi az esélye, hogy nem veszik észre, bár „belenyúltak”:

A tolvaj ½ valószínűséggel „jó” analizátorral mér, így „jó” fotont ad tovább.

Ha a tolvaj „rossz” tengellyel mér, „rossz” polarizációt ad tovább, de

BOB még ½ valószínűséggel „jó” polarizációs állapotot mér.

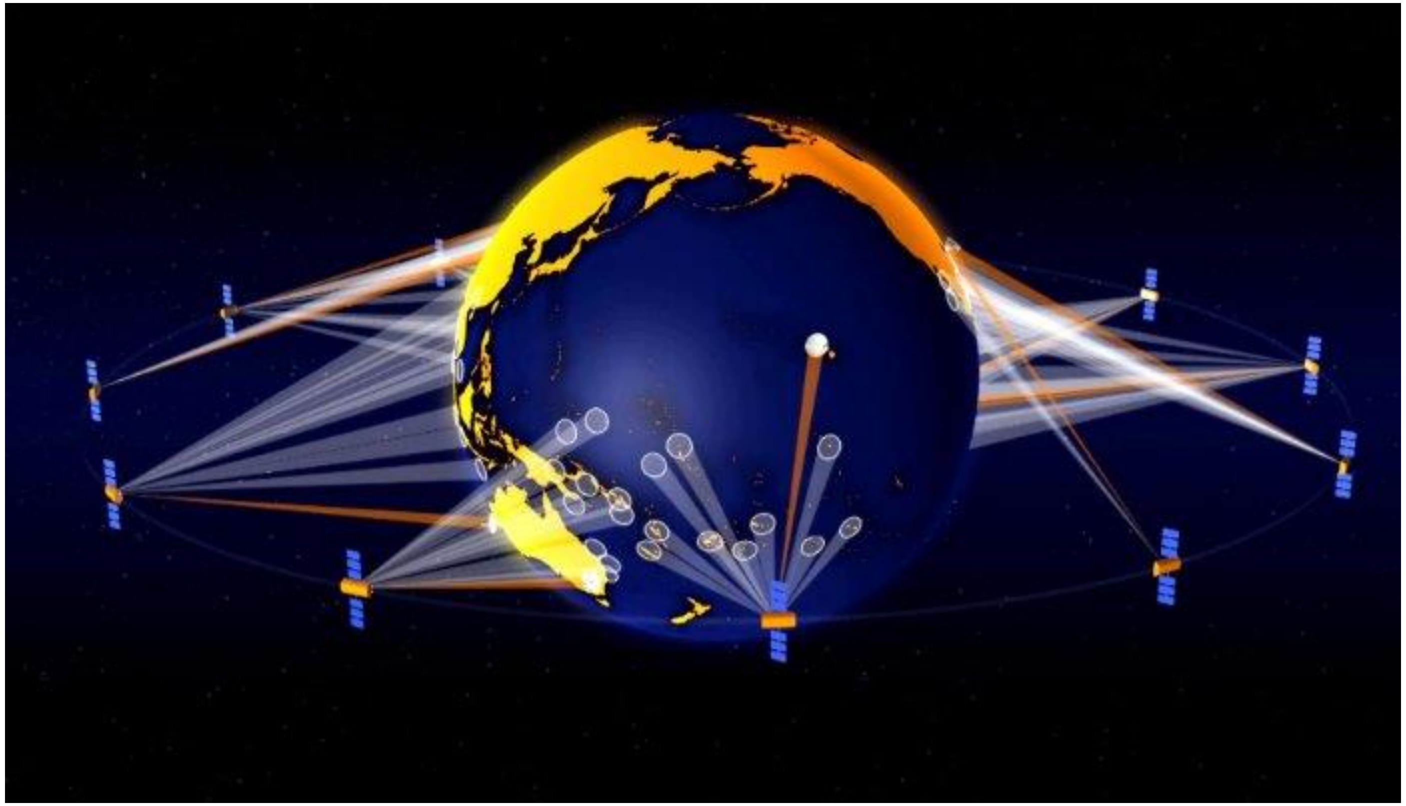
A „jó” polarizáció mérésének valószínűsége 1 bitre, a belenyúlás ellenére: ½ + ¼ = ¾

n bitre a belenyúlás észrevételének esélye: $1 - \left(\frac{3}{4}\right)^n$

Számpélda:

n=33-ra a lopási kísérlet felfedezésének (legalább egy eltérés megjelenésének) esélye: 0,9999

2017. szeptember 29.
Kvantum-kódolt biztonsági kontroll
Mellett zajló video-kommunikáció
Bécs-Peking (7400 km) között



A jövő:
1000km magasságban
kvantumkommunikációs biztonsági
műholdhálózat
veszi körül a Földet

Aktuális olvasmányajánlat

- Domokos Péter: A kvantummechanikától a kvantumtechnológiáig

  Természet Világa, 2017. november, 500.-504.oldal
- Patkós András: A Lovász-szám kvantumkarrierje

  Fizikai Szemle, 2017. november, 367.-371. oldal

Általános olvasmányajánlat

Patkós András: Bevezetés a kvantumfizikába (Typotex, 2012)