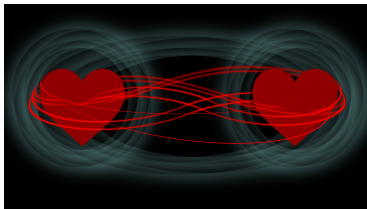


# Bell-kísérlet

*Máté Mihály*, Fizikus MSc I.



Eötvös Loránd Tudományegyetem

*Modern fizikai kísérletek szeminárium, 2016.*

# Tartalom

## 1 Elmélet

- Összefonódás
- EPR
- Bell

## 2 Kísérlet

- Első jelentős kísérlet
- Genfi-tó
- Legújabb

Geszti Tamás: *Új kísérletek a kvantummechanikában* c. speci

# Összefonódás

Gibbs-paradoxon:  $Z = \frac{1}{N!} Z_1^N$  a gáz részecskéi tudnak egymásról

- független részecskék:  $|\psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, s_1, s_2)\rangle = |\varphi_1(\mathbf{r}_1, s_1)\rangle \otimes |\varphi_2(\mathbf{r}_2, s_2)\rangle$

Hamilton-operátor:  $H = H_1 \oplus H_2$

- nem független: nem faktorizálható

- ★ deuteron:  $|\psi_d\rangle = c_0|{}^3S_1\rangle + c_2|{}^3D_1\rangle$

- ★ barion dekulett:  $\Delta^+ = \frac{1}{\sqrt{3}}(uud + udu + duu)$

- ★ He-alapállapota:  $\psi_{(1s)^2}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, s_1, s_2) = \varphi_{1s}(\mathbf{r}_1)\varphi_{1s}(\mathbf{r}_2)^1\chi_0(s_1, s_2)$

$${}^1\chi(s_1, s_2)_0 = \frac{1}{2}(\uparrow_1\downarrow_2 - \uparrow_2\downarrow_1)$$

Összefonódott állapot

# EPR cikk

- Előzmény: (Einstein 1929) egyrészecske-nemlokalitás  
mai válasz: részecske-detektor összefonódás
- Einstein—Podolsky—Rosen, 1935 (EPR)

kétrészecske-állapot a térbeli (kauzális) szétválasztás után is megmarad

EPR ezt nem fogadja el  $\Rightarrow$

valószínűségi ellentmondás („a QM nem lehet teljes”)

- Eredetileg  $[x, p] = i\hbar$  (bele lehet kötni)
- Bohr—Einstein viták

## Bohm példája

spin-szingulett szétrepítése és Stern—Gerlach-mérése

$$|\psi\rangle = \frac{1}{2} \left( |\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\uparrow\rangle_2 |\downarrow\rangle_1 \right)$$

EPR feltevései spinek nyelvén:

- **tökéletes antikorreláció:** ha  $\uparrow_1$ , akkor  $\downarrow_2$ ; valamint ha  $\downarrow_1$ , akkor  $\uparrow_2$
- **lokálitás:** szétrepülés  $\rightarrow$  két rendszer kölcsönhatás nélkül, elsõn való mérés nem befolyásolja a másodikat
- **valóság:**  $s_1$  mérése után biztosan tudjuk  $s_2$ -t, tehát ez eleme a fizikai valóságnak, de ezt QM nem tudja
- **teljesség:** QM nem teljes elmélet, mert a fizikai valóság egy elemét nem tartalmazza

# Bohm példája

spin-szingulett szétrepítése és Stern—Gerlach-mérése

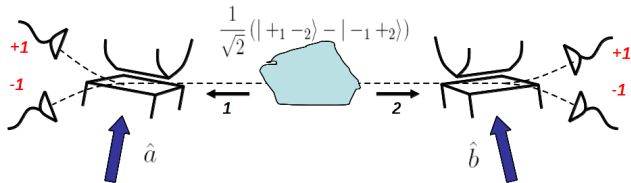
$$|\psi\rangle = \frac{1}{2} \left( |\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\uparrow\rangle_2 |\downarrow\rangle_1 \right)$$

EPR feltevései spinek nyelvén:

- **tökéletes antikorreláció:** ha  $\uparrow_1$ , akkor  $\downarrow_2$ ; valamint ha  $\downarrow_1$ , akkor  $\uparrow_2$
- **lokálitás:** szétrepülés  $\rightarrow$  két rendszer kölcsönhatás nélkül, elsőn való mérés nem befolyásolja a másodikat
- **valóság:**  $s_1$  mérése után biztosan tudjuk  $s_2$ -t, tehát ez eleme a fizikai valóságnak, de ezt QM nem tudja
- **teljesség:** QM nem teljes elmélet, mert a fizikai valóság egy elemét nem tartalmazza

# Bell javaslat (1964)

QM korai évei nyomán: rejtett paraméterek ( $\lambda$ )



- Az antikorrelációt a forrás helyén, szétrepülés előtt egy lokális rejtett paraméter idézi elő.
- $\hat{a}$  és  $\hat{b}$  tetszőleges. A két mérési eredmény szorzatát ( $\pm 1$ ) átlagoljuk a mérési sorozatra ( $E(\hat{a}, \hat{b})$ ).
- 1-es analizátor:  $\hat{a}, \hat{a}'$  ( $x_1, x_1'$ )  
 2-es analizátor:  $\hat{b}, \hat{b}'$  ( $x_2, x_2'$ )

$$S = E(\hat{a}, \hat{b}) - E(\hat{a}, \hat{b}') + E(\hat{a}', \hat{b}) + E(\hat{a}', \hat{b}')$$

•  $\lambda$ :

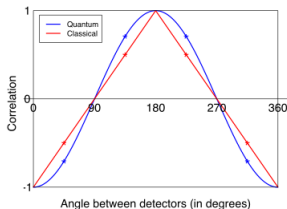
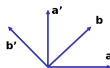
$$E(\hat{a}, \hat{b}) = \frac{N_{+++} + N_{---} - N_{+-} - N_{-+}}{N_{+++} + N_{---} + N_{+-} + N_{-+}} \Big|_{\hat{a}, \hat{b}} \quad (\text{detektorhiba kiesik})$$

$$S = \langle x_1 x_2 - x_1 x_2' + x_1' x_2 + x_1' x_2' \rangle = \langle x_1 \underbrace{(x_2 - x_2')}_{0 \vee \pm 2} + x_1' \underbrace{(x_2 + x_2')}_{\pm 2 \vee 0} \rangle$$

$$|S| \leq 2 \quad (\text{Clauser-Horne-Shimony-Holt-egyenlőtlenség})$$

• QM:

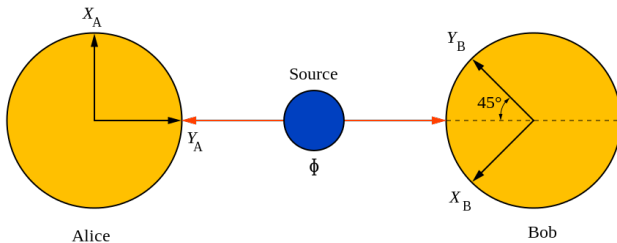
$$E(\hat{a}, \hat{b}) = \langle \psi | (\hat{a}\sigma)_1 (\hat{b}\sigma)_2 | \psi \rangle = -\hat{a}\hat{b} \propto -\cos \vartheta$$



$$S = 2\sqrt{2}$$



$$S = 2\sqrt{2} > 2$$



lokális rejtett paraméter cáfolata

# Értelmezés

## Probléma a lokalitással van

- QM teljes
- nem 2 db részecske, hanem 1 db kétrészecskés állapot, ami eleme a fizikai valóságnak
- mérés: beugrás egy sajátállapotba (egész konfigurációs térben), a másik mérés csak ellenőrzi: „*spukhafte Fernwirkung*” (Einstein)
- jeladásra nem használható: „*Békés egymás mellett élés a QM és a specrel között*” (Shimony 1984)

# Hogyan mérjük?

- bármely kétállapotú belső szabadsági fokra jó: legtöbbször foton polarizációja
- atomi kaszkádbomlás helyett paraméteres lekonvertálás
- fotondetektorok rossz hatásfokúak
- detektorpár nagy távolságban egymástól (kauzális függetlenség), de ekkor a polarizáció elmosódik
- *loophole*-ok (detektálási, kommunikációs, ...)

## Első jelentős kísérlet

(Aspect et al. 1982)

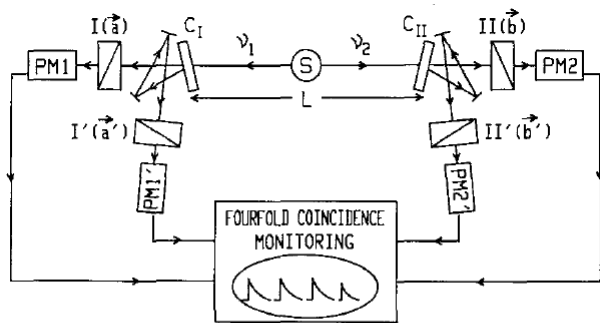
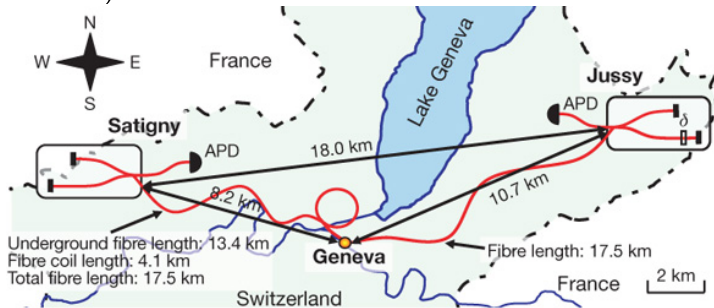
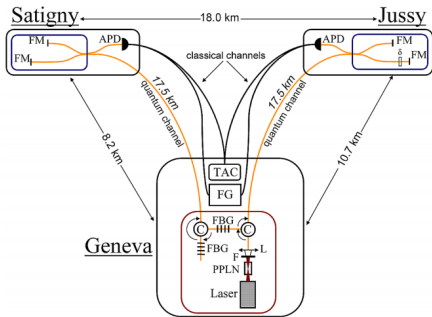


FIG. 2. Timing experiment with optical switches. Each switching device ( $C_I, C_{II}$ ) is followed by two polarizers in two different orientations. Each combination is equivalent to a polarizer switched fast between two orientations.

## Genfi-tó

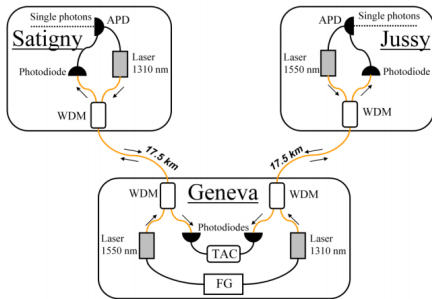
(Salart et al. 2008)



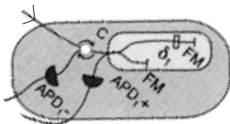


**Supplementary Figure 1 | Experimental setup.** A cw laser pumps a nonlinear waveguide creating pairs of entangled photons. Each photon is sent to a receiving station located several km away through installed optical fibers. After travelling through a Michelson interferometer with arms of different length, each photon is detected by an avalanche photodiode. Detection events are continuously monitored in search for coincidences in their arrival times.

<sup>1</sup>Group of Applied Physics, University of Geneva, 20, Rue de l'École de Médecine, CH-1211 Geneva 4, Switzerland



**Supplementary Figure 2 | Experimental setup. Classical channels.** A function generator (FG) sends a trigger signal of 1 MHz to two lasers. The optical signals are sent through 17.5 km of optical fibers to their respective receiving stations where they are detected by p-n photodiodes. The single-photon detectors are triggered by these signals and detection events are sent back to Geneva using the same fibers. WDMs and different laser wavelengths ensure the separation of the signals.



## Legújabb

(Giustina et al. 2015. december 22. !!!)

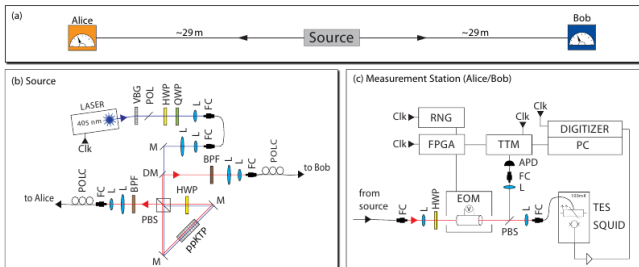
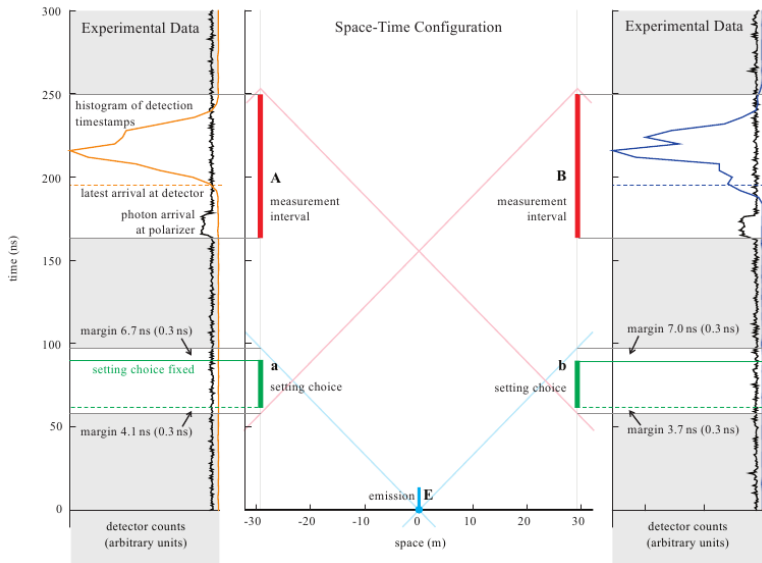
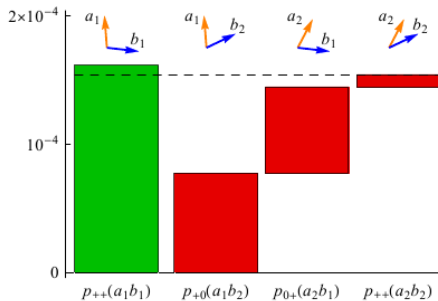


Figure 1. (a) Schematic of the setup. (b) Source: The source distributed two polarization-entangled photons between the two identically constructed and spatially separated measurement stations *Alice* and *Bob* (distance  $\approx 58$  m), where the polarization was analyzed. It employed type-II spontaneous parametric down-conversion in a periodically poled crystal (ppKTP), pumped with a 405 nm pulsed diode laser (pulse length: 12 ns FWHM) at 1 MHz repetition rate. The laser light was filtered spectrally by a volume Bragg grating (VBG) (FWHM: 0.3 nm) and spatially by a single-mode fiber. The ppKTP crystal was pumped from both sides in a Sagnac configuration to create polarization entanglement. Each pair was split at the polarizing beam splitter (PBS) and collected into two different single-mode fibers leading to the measurement stations. (c) Measurement stations: In each measurement station, one of two linear polarization directions was selected for measurement, as controlled by an electro-optical modulator (EOM), which acted as a switchable polarization rotator in front of a plate PBS. Customized electronics (FPGA) sampled the output of a random number generator (RNG) to trigger the switching of the EOM. The transmitted output of the plate PBS was coupled into a fiber and delivered to the TES. The signal of the TES was amplified by a SQUID and additional electronics, digitized, and recorded together with the setting choices on a local hard drive. The laser and all electronics related to switching/recording were synchronized with clock inputs (Clk). Abbreviations: APD: avalanche photodiode (see Fig. 2); BPF: band-pass filter; DM: dichroic mirror; FC: fiber connector; HWP: half-wave plate; L: lens; POL: polarizer; M: mirror; POLC: manual polarization controller; QWP: quarter-wave plate; SQUID: superconducting quantum interference device; TES: transition-edge sensor; TTM: time-tagging module.







- loophole-free
- (Bell) CHSH sértés:  $11.5\sigma$