

A fény és az igazi véletlen

Kiss Tamás

Magyar Tudományos Akadémia

Wigner Fizikai Kutatóközpont

Kvantummérés Lendület csoport



Fény

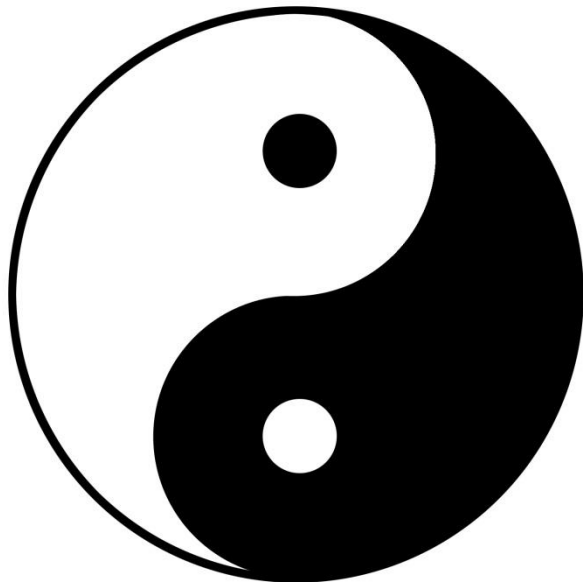
A világ teremtése

1 Kezdetben teremtette Isten a mennyet és a földet.

2 A föld még kietlen és pusztá volt, a mélység fölött sötétség volt, de Isten Lelke lebegett a vizek fölött.

3 Akkor ezt mondta Isten: Legyen világosság! És lett világosság.

4 Láttá Isten, hogy a világosság jó, elválasztotta tehát Isten a világosságot a sötétségtől.



<http://solreina.deviantart.com>

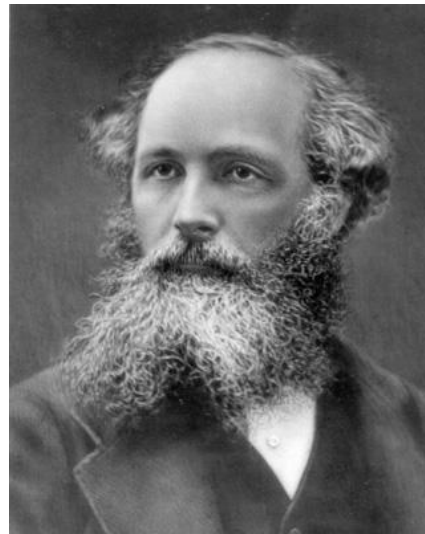
A fizikus és a fény

- (1) Forrás (nap)
- (2) Terjedés – manipulálás (ablak)
- (3) Detektálás (szem)

A XX. század előtt

- (1) Tűz
- (2) Üvegcsiszolás: lencse, prizma, távcső, mikroszkóp
- (3) Fényképezés

Klasszikus fizika



$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi \rho(\mathbf{r}, t)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

1865, James Clerk Maxwell

Nagy egyesített elektromágneses elmélet

- Elektromos és mágneses jelenségek
- Villamosság, telefon, izzólámpa
- Hullámok:
 - Rádió, Mikro, Infra, Fény, Ultra, Röntgen, Gamma

A klasszikus fizika csúcса

A Maxwell-egyenletek

- i. Hely és idő között furcsa szimmetria
- ii. Hullámmegoldások
- iii. Térben-időben lokális mezőelmélet

A modern fizika kiindulópontja

XX. század: elmélet

- i. Tér-idő szimmetria => relativitáselmélet
- ii. Hullámtulajdonságok => kvantummechanika
- iii. Klasszikus mezőelmélet => kvantált mezőelmélet

Kvantumoptika:

Alacsony energiás kvantált mezőelmélet

XX. század: gyakorlat

XX. sz. első fele:

Sok-sok atomban együtt látjuk a kvantummechanikát

Szilárd testek megértése: tranzisztor, elektronika '50

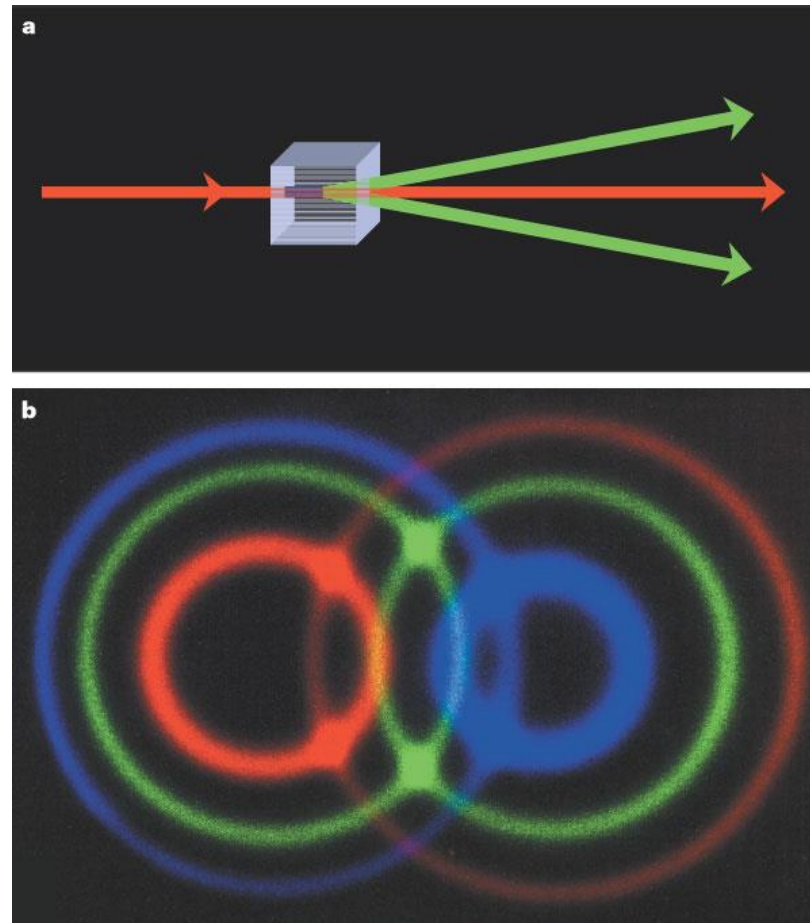
Lézer '60:

atomok szinkronizált fénykibocsátása

Első tiszta fényforrás: 1 szín, 1 irány

Erős fény!

Kvantumos fény: fotonpárok



Anton Zeilinger, Bécsi Egyetem

Miért különleges a kvantummechanika?

Diszkrét \Leftrightarrow folytonos

- Energia \Rightarrow kvantumok (foton)
- Elektron \Rightarrow elektronhullám

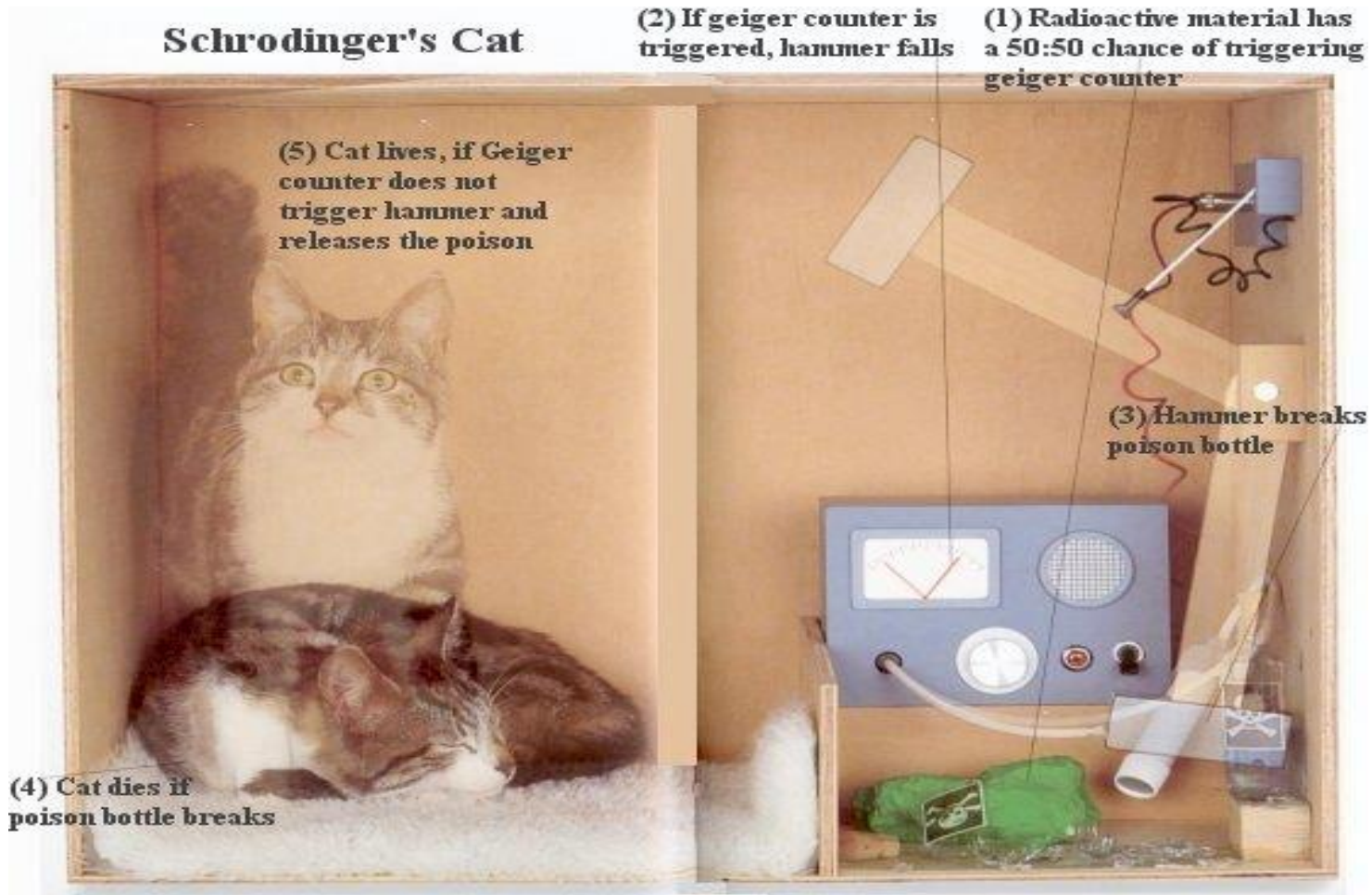
(Meg kell értenünk: az atom kicsi. Az elektron még kisebb!)

Kvantum \Rightarrow klasszikus

Kvantummérés folyamata

- Nem teljesen megértett – elméletileg sem!
- Érdeemes kísérletileg tanulmányozni

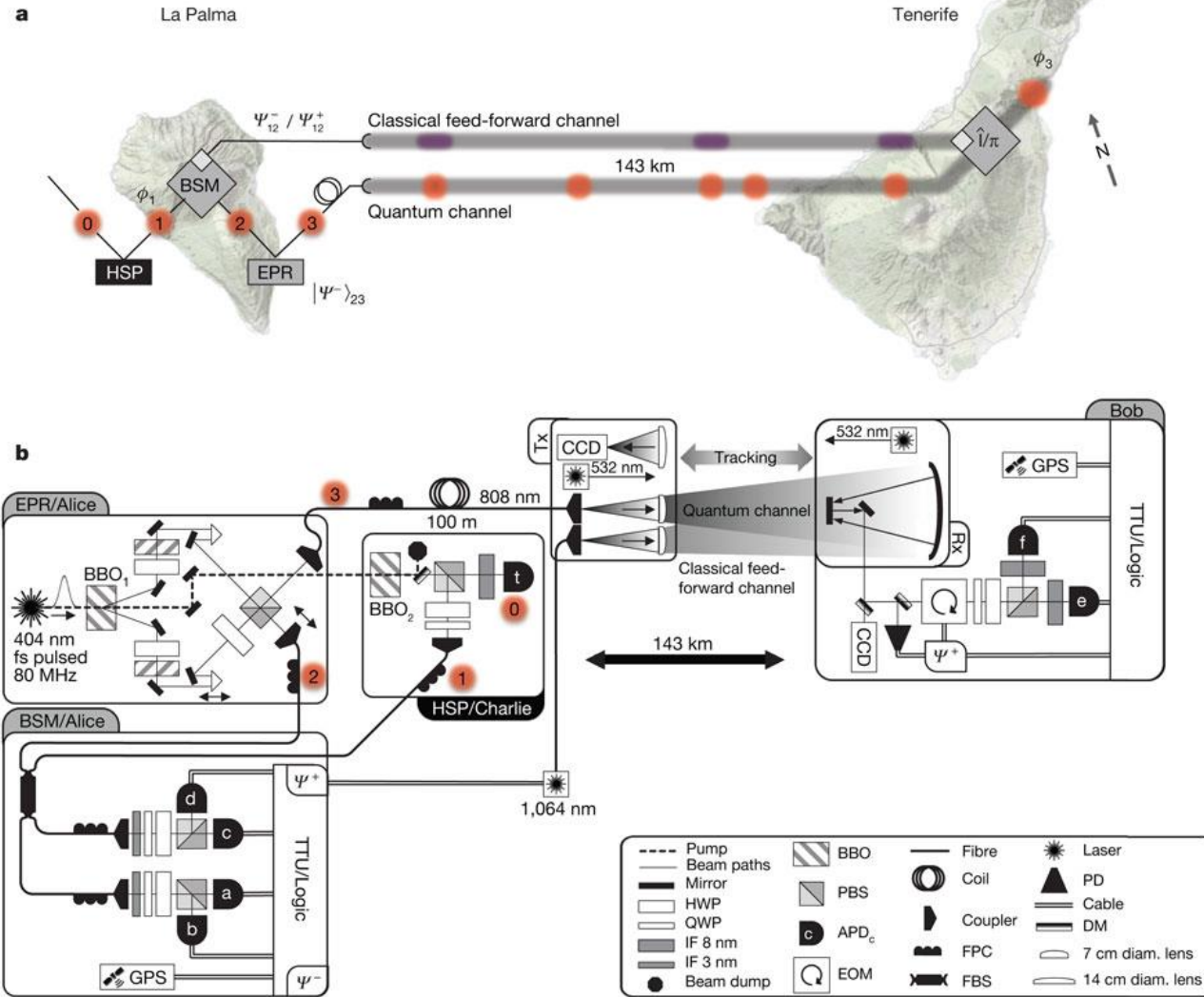
Schrödinger macskája: összefonódás



Mérés: 1 - 1000 atom \Leftrightarrow 10^{23} - 10^{30} atom

???: 10^9 atom \Leftrightarrow 10^{16} atom

No cloning --- kvantumállapot-teleportálás



Anton
Zeilinger

Ötlet: C. H. Bennett, G. Brassard, C. Crépeau, R. Jozsa, A. Peres, W. K. Wootters

Eredeti gondolat: A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen

Bell-egyenlőtlenség

Két azonos érme, 3 tulajdonság:

(A) Arany (0) vagy réz (1)

(B) Fényes (0) vagy matt (1)

(C) Nagy (0) vagy kicsi (1)

$$P(0,0,0)+P(0,0,1)+\dots+P(1,1,1) = 1$$

Külön mérünk egyiken és másikon

egy-egy tulajdonságot:

$$P(A=A)=1, P(B=B)=1, P(C=C)=1$$

$$P(A=B)+P(B=C)+P(A=C) \geq 1$$



John Stewart
Bell



Bell-egyenlőtlenség

Két azonos érme, 3 tulajdonság:

(A) Arany (0) vagy réz (1)

(B) Fényes (0) vagy matt (1)

(C) Nagy (0) vagy kicsi (1)

$$P(0,0,0)+P(0,0,1)+\dots+P(1,1,1) = 1$$

Külön mérünk egyiken és másikon
egy-egy tulajdonságot:

$$P(A=A)=1, P(B=B)=1, P(C=C)=1$$

$$P(A=B)+P(B=C)+P(A=C) \geq 1$$

Bene Gyula (ELTE)

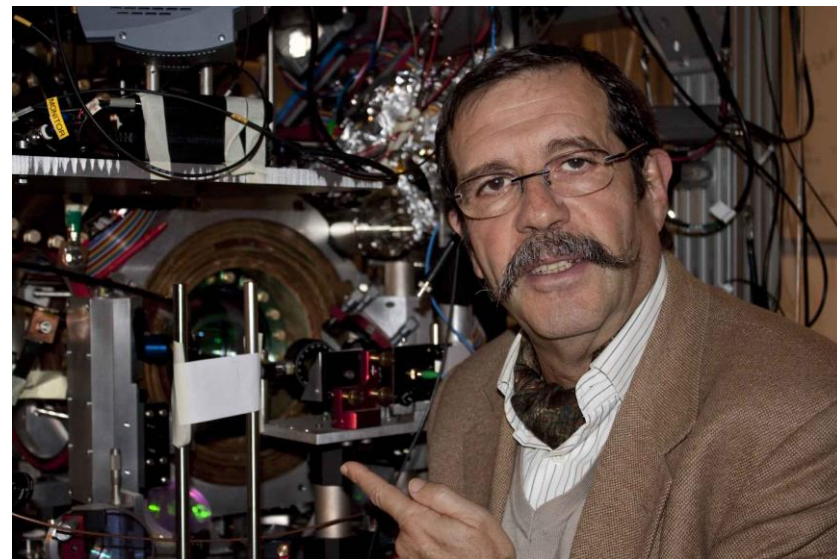
A,B,C:

fotonok polarizációja

Első kísérletek:

Freedman and Clauser,
1972

Alain Aspect, 1981



A strong loophole-free test of local realism

Lynden K. Shalm,¹ Evan Meyer-Scott,² Bradley G. Christensen,³ Peter Bierhorst,¹ Michael A. Wayne,^{3,4} Martin J. Stevens,¹ Thomas Gerrits,¹ Scott Glancy,¹ Deny R. Hamel,⁵ Michael S. Allman,¹ Kevin J. Coakley,¹ Shellee D. Dyer,¹ Carson Hodge,¹ Adriana E. Lita,¹ Varun B. Verma,¹ Camilla Lambrocco,¹ Edward Tortorici,¹ Alan L. Migdall,^{4,6} Yanbao Zhang,² Daniel R. Kumor,³ William H. Farr,⁷ Francesco Marsili,⁷ Matthew D. Shaw,⁷ Jeffrey A. Stern,⁷ Carlos Abellán,⁸ Waldimar Amaya,⁸ Valerio Pruneri,^{8,9} Thomas Jennewein,^{2,10} Morgan W. Mitchell,^{8,9} Paul G. Kwiat,³ Joshua C. Bienfang,^{4,6} Richard P. Mirin,¹ Emanuel Knill,¹ and Sae Woo Nam¹

¹*National Institute of Standards and Technology, 325 Broadway, Boulder, CO 80305, USA*

²*Institute for Quantum Computing and Department of Physics and Astronomy, University of Waterloo, 200 University Ave West, Waterloo, Ontario, Canada, N2L 3G1*

³*Department of Physics, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL 61801, USA*

⁴*National Institute of Standards and Technology, 100 Bureau Drive, Gaithersburg, MD 20899, USA*

⁵*Département de Physique et d'Astronomie, Université de Moncton, Moncton, New Brunswick E1A 3E9, Canada*

⁶*Joint Quantum Institute, National Institute of Standards and Technology and University of Maryland, 100 Bureau Drive, Gaithersburg, Maryland 20899, USA*

⁷*Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 4800 Oak Grove Drive, Pasadena, CA 91109*

⁸*ICFO – Institut de Ciències Fotoniques, The Barcelona Institute of Science and Technology, 08860 Castelldefels (Barcelona), Spain*

⁹*ICREA – Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats, 08015 Barcelona, Spain*

¹⁰*Quantum Information Science Program, Canadian Institute for Advanced Research, Toronto, ON, Canada*

(Dated: November 11, 2015)

We present a loophole-free all relevant events in our Bell by using fast random number polarization-entangled source detectors, allows us to make a hypothesis test, we compute the spacelike separation of our predict our measurement choice is 2.3×10^{-7} . We therefore

But if [a hidden variable theory] is compatible with quantum mechanics and

A significant-loophole-free test of Bell's theorem with entangled photons

Marissa Giustina,^{1,2,*} Marijn A. M. Versteegh,^{1,2} Sören Wengerowsky,^{1,2} Johannes Handsteiner,^{1,2} Armin Hochrainer,^{1,2} Kevin Phelan,¹ Fabian Steinlechner,¹ Johannes Kofler,³ Jan-Åke Larsson,⁴ Carlos Abellán,⁵ Waldimar Amaya,⁵ Valerio Pruneri,^{5,6} Morgan W. Mitchell,^{5,6} Jörn Beyer,⁷ Thomas Gerrits,⁸ Adriana E. Lita,⁸ Lynden K. Shalm,⁸ Sae Woo Nam,⁸ Thomas Scheidl,^{1,2} Rupert Ursin,¹ Bernhard Wittmann,^{1,2} and Anton Zeilinger^{1,2,†}

¹*Institute for Quantum Optics and Quantum Information (IQOQI), Austrian Academy of Sciences, Boltzmannngasse 3, Vienna 1090, Austria.*

²*Quantum Optics, Quantum Nanophysics and Quantum Information, Faculty of Physics, University of Vienna, Boltzmannngasse 5, Vienna 1090, Austria*

³*Max-Planck-Institute of Quantum Optics, Hans-Kopfermann Str. 1, 85748 Garching, Germany*

⁴*Institutionen för Systemteknik, Linköpings Universitet, 581 83 Linköping, Sweden*

⁵*ICFO - Institut de Ciències Fotoniques, The Barcelona Institute of Science and Technology, 08860 Castelldefels, Barcelona, Spain*

⁶*ICREA-Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats, 08015 Barcelona, Spain*

⁷*Physikalisch- Technische Bundesanstalt, Abbestraße 1, 10587 Berlin, Germany*

⁸*National Institute of Standards and Technology (NIST), 325 Broadway, Boulder, Colorado 80305, USA*
(Dated: November 11, 2015)

Local realism is the worldview in which physical properties of objects exist independently of measurement and where physical influences cannot travel faster than the speed of light. Bell's theorem states that this worldview is incompatible with the predictions of quantum mechanics, as is expressed in Bell's inequalities. Previous experiments convincingly supported the quantum predictions. Yet, every experiment performed to date required assumptions that provide loopholes for a local realist explanation. Here we report a Bell test that closes the most significant of these loopholes simultaneously. Using a well-optimized source of entangled photons, rapid setting generation, and highly efficient superconducting detectors, we observe a violation of a Bell inequality with high statistical significance.

Submission history

From: Lynden Shalm Dr. [view email]

[v1] Tue, 10 Nov 2015 17:13:55 GMT (2536kb,AD)

Submission history

From: Marissa Giustina [view email]

[v1] Tue, 10 Nov 2015 17:14:01 GMT (2314kb,AD)

19v1 [quant-ph] 10 Nov 2015

nt-ph] 10 Nov 2015

A második cikk (Zeilinger) elrendezése:

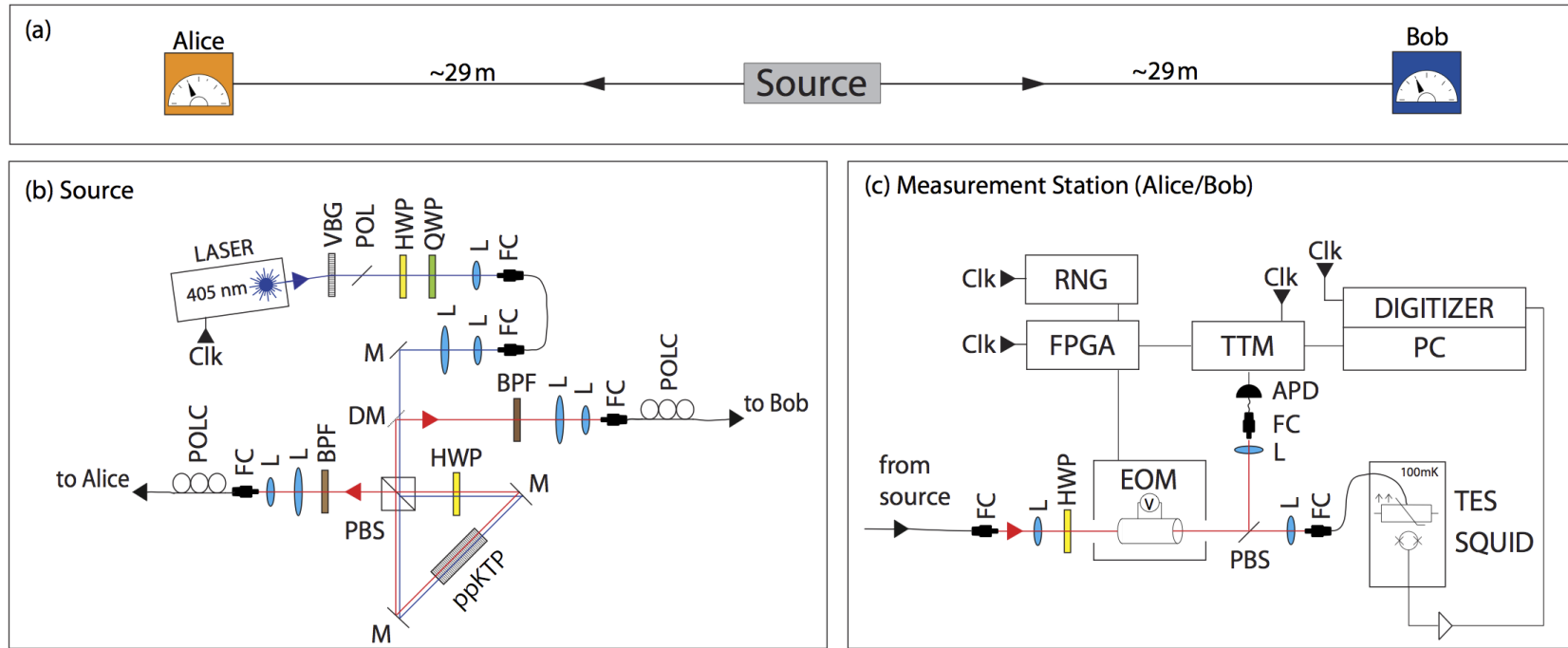
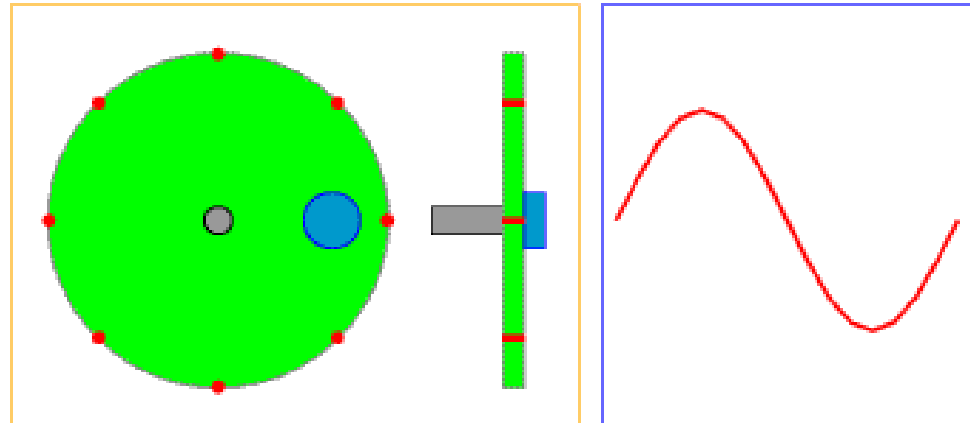
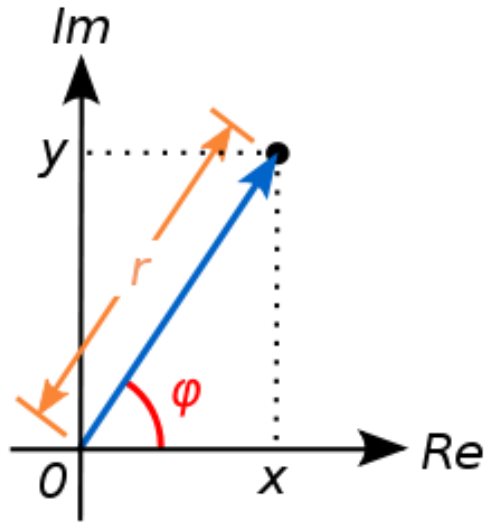


Figure 1. (a) Schematic of the setup. (b) Source: The source distributed two polarization-entangled photons between the two identically constructed and spatially separated measurement stations *Alice* and *Bob* (distance ≈ 58 m), where the polarization was analyzed. It employed type-II spontaneous parametric 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.

Komplex szám



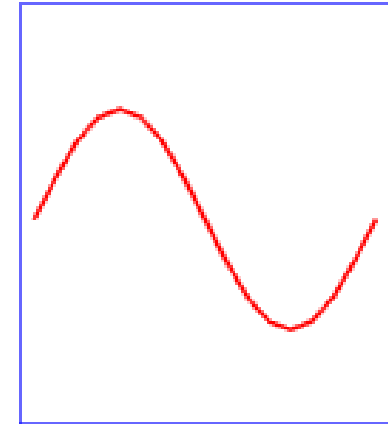
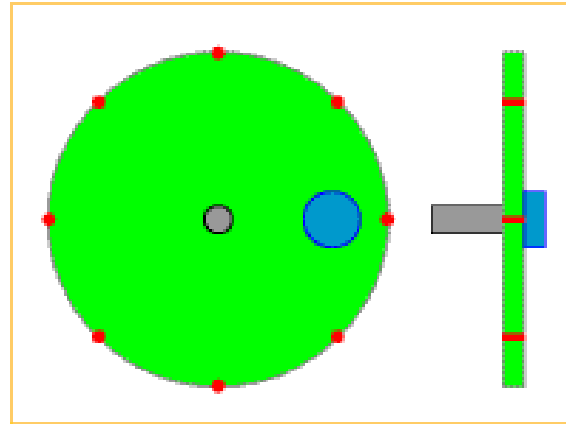
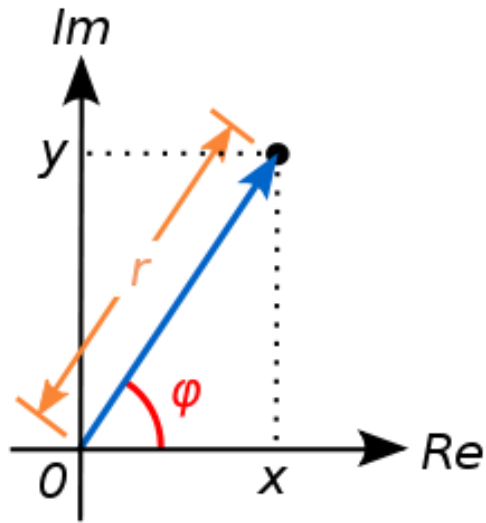
Hullámok leírására alkalmas

Klasszikus mező hulláma:

- Amplitúdó: r , fázis ϕ ; Intenzitás: $\sim r^2$
- Két hullám előjeles összeadása: koherens szuperpozíció
- Interferencia: eltolt hullámok – kioltás, erősítés

Véletlen kezdőfázisok: kiátlagolódás!

Komplex szám



Kvantummechanika:

- Valószínűségi amplitúdó: r , fázis ϕ ;
- Kvantummérés:
a szuperpozícióból egyet választ
- Véletlenszerűen:
valószínűség: $\sim r^2$ (Born szabály)



Max Born

Dekoherencia, nyílt rendszer

- A méregetett rendszer véletlenszerűen fejlődik
- A szuperpozíciók eltűnnek: dekoherencia
- Nyílt rendszer: a környezet okoz dekoherenciát

Esetleg a Schrödinger egyenletet kell módosítani?

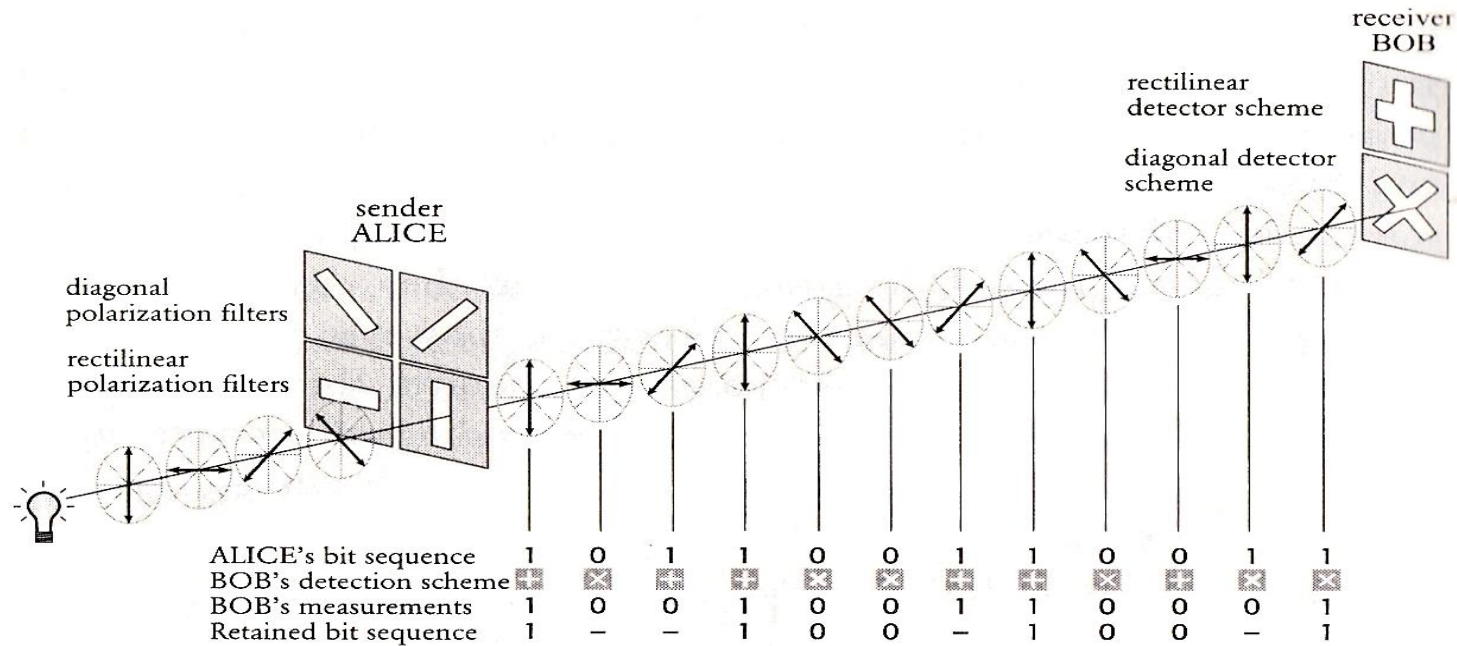
Spontán kollapszus beépítése:

L. Diósi, R. Penrose, G. Ghirardi, A. Rimini, T. Weber

Mesterséges koherens kvantumrendszerek

- A macska összefonódott a bomló atommal
- Összefonódottság --- erőforrás
- Ötlet:
 - Kvantumtitkosítás
 - Kvantumszámítógép
 - A foton polarizációja: *qubit*

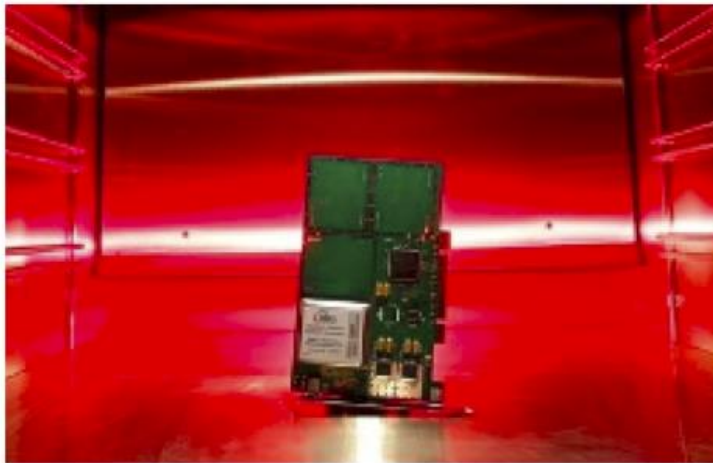
Kvantumtitkosítás



- Működik
- Fényvel
- 10-100 km

Kvantum-véletlenszámgenerátor

HOME ([HTTP://WWW.IDQUANTIQUE.COM](http://www.idquantique.com)) > RANDOM NUMBER GENERATION



Random Number Generation

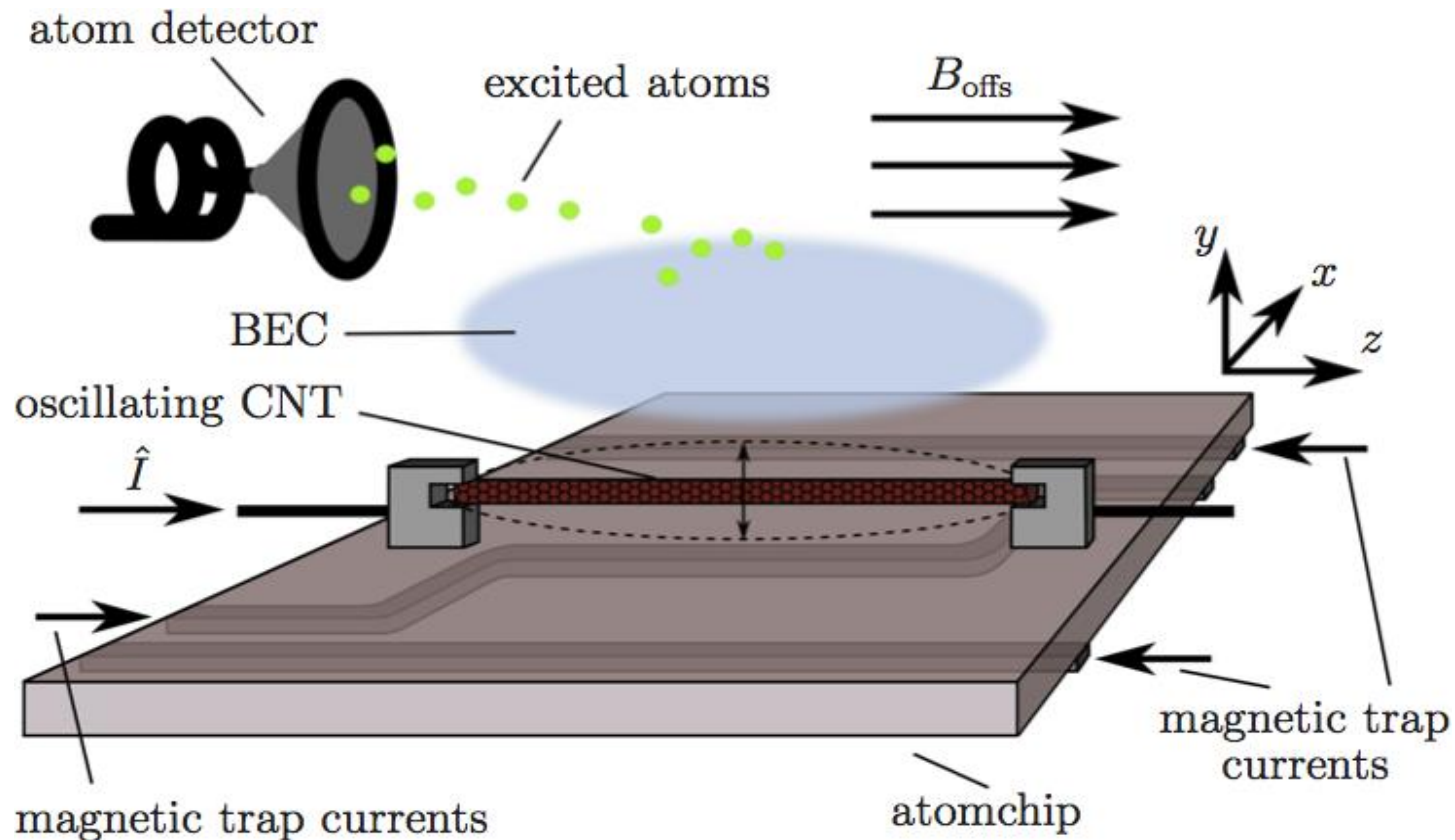
ID Quantique was the first company to develop a quantum random number generator (RNG) in 2001 and it remains the market leader in terms of reliability, certifications and Swiss engineering, with its successive versions of hardware RNGs.

Kvantumszámítógép



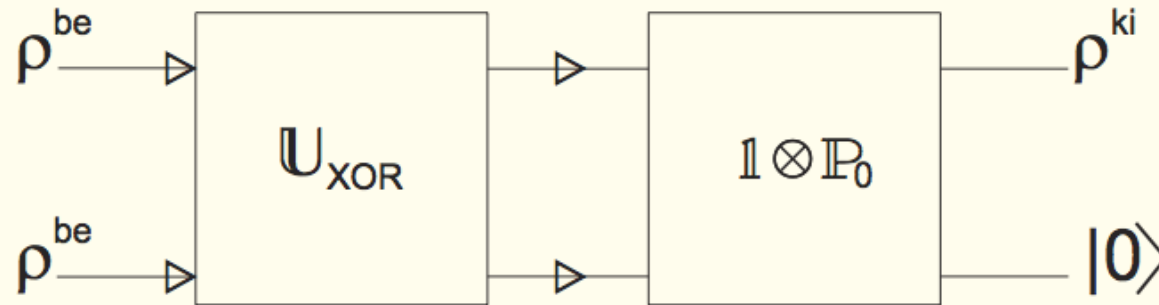
- Működik kicsiben
- Sokféle rendszer
- Nagyban?

Mit csinálunk mi?



- „Kvantummérés” Lendület csoport
- Kvantumos bolyongás, rezonátor + atom, ...
- Kísérlet: Fortágh József (Tübingen), ...

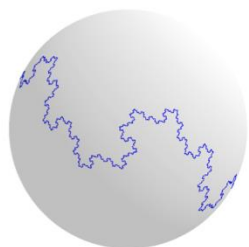
Komplex káosz



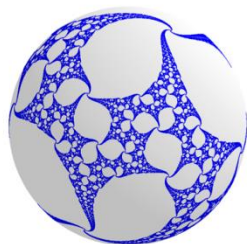
$$\rho_{ij} \xrightarrow{S} N\rho_{ij}^2$$

- Két ugyanolyan állapotú qubit bemegy
- Egy kijövőt megmérünk
- Ha 0 az eredmény, megtartjuk a párját

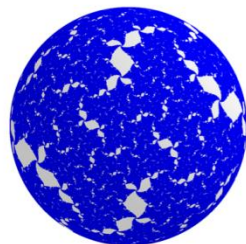
Komplex káosz



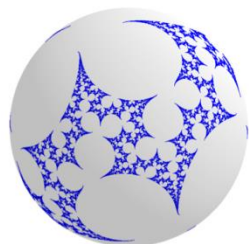
(a) $\theta = 0.4, \varphi = \frac{\pi}{2}$



(b) $\theta = 0.55, \varphi = \frac{\pi}{2}$



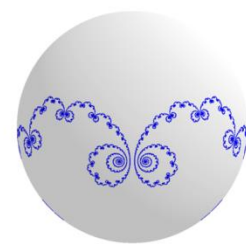
(c) $\theta = 0.633, \varphi = \frac{\pi}{2}$



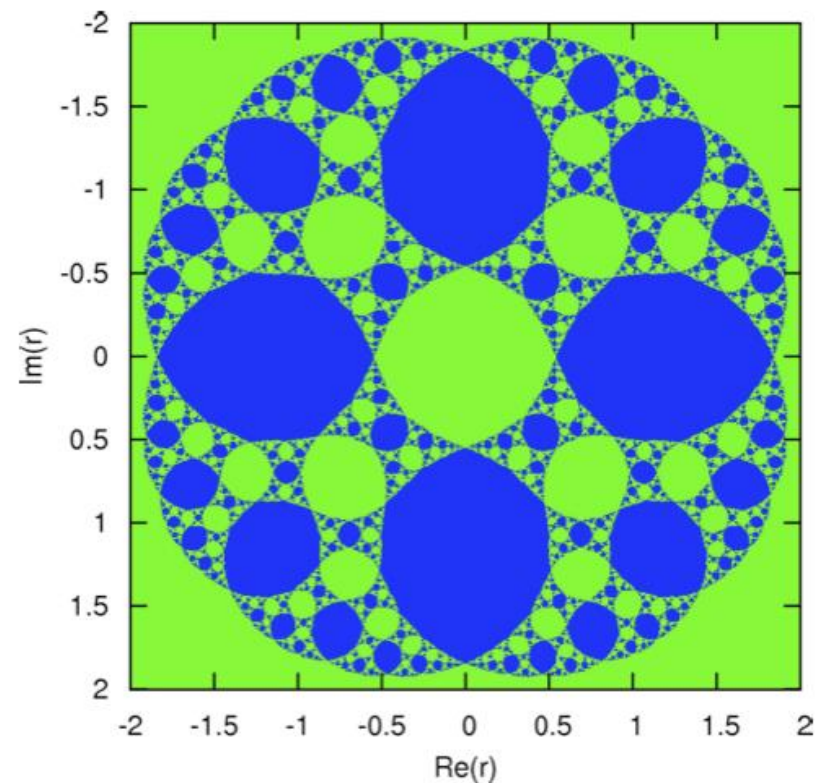
(d) $\theta = 1.05, \varphi = \frac{\pi}{2}$



(e) $\theta = 0.5, \varphi = 0.5$



(f) $\theta = 0.232, \varphi = 0$

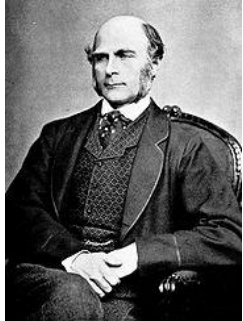


Egy qubit

Két qubit

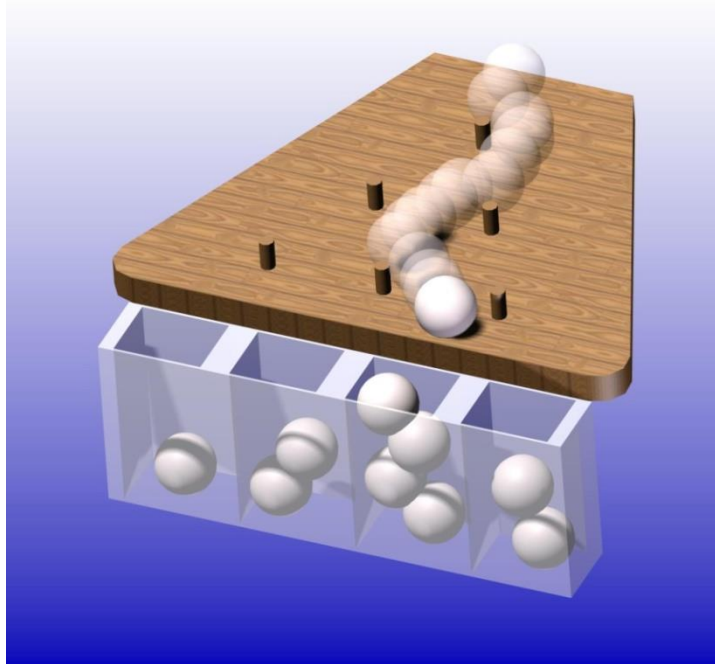
A. Gilyén, T. Kiss, I. Jex, arXiv:1508.03191

Klasszikus/kvantumos bolyongás

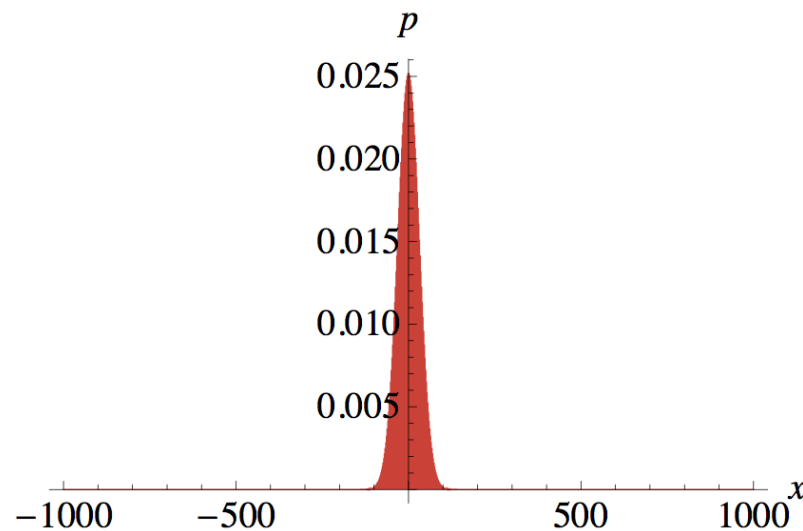
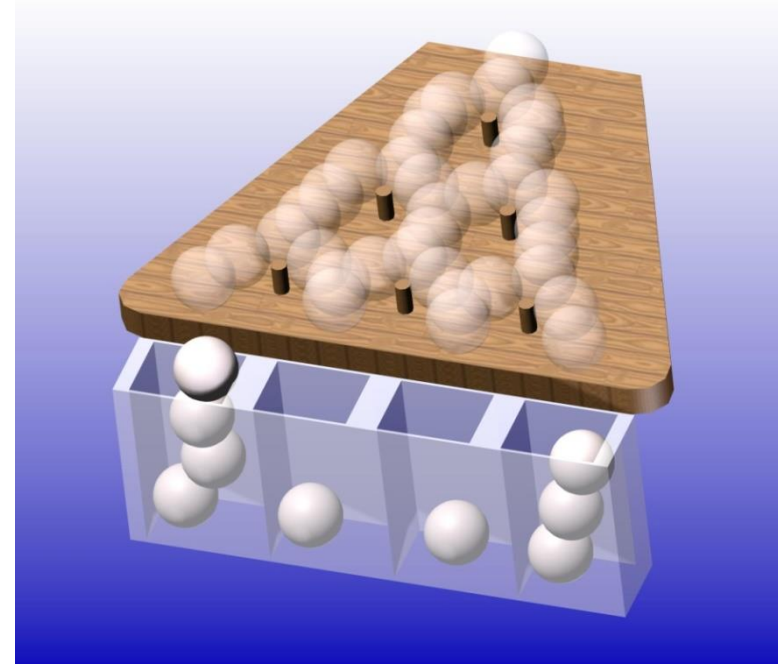


Sir
Francis
Galton

Galton-deszka

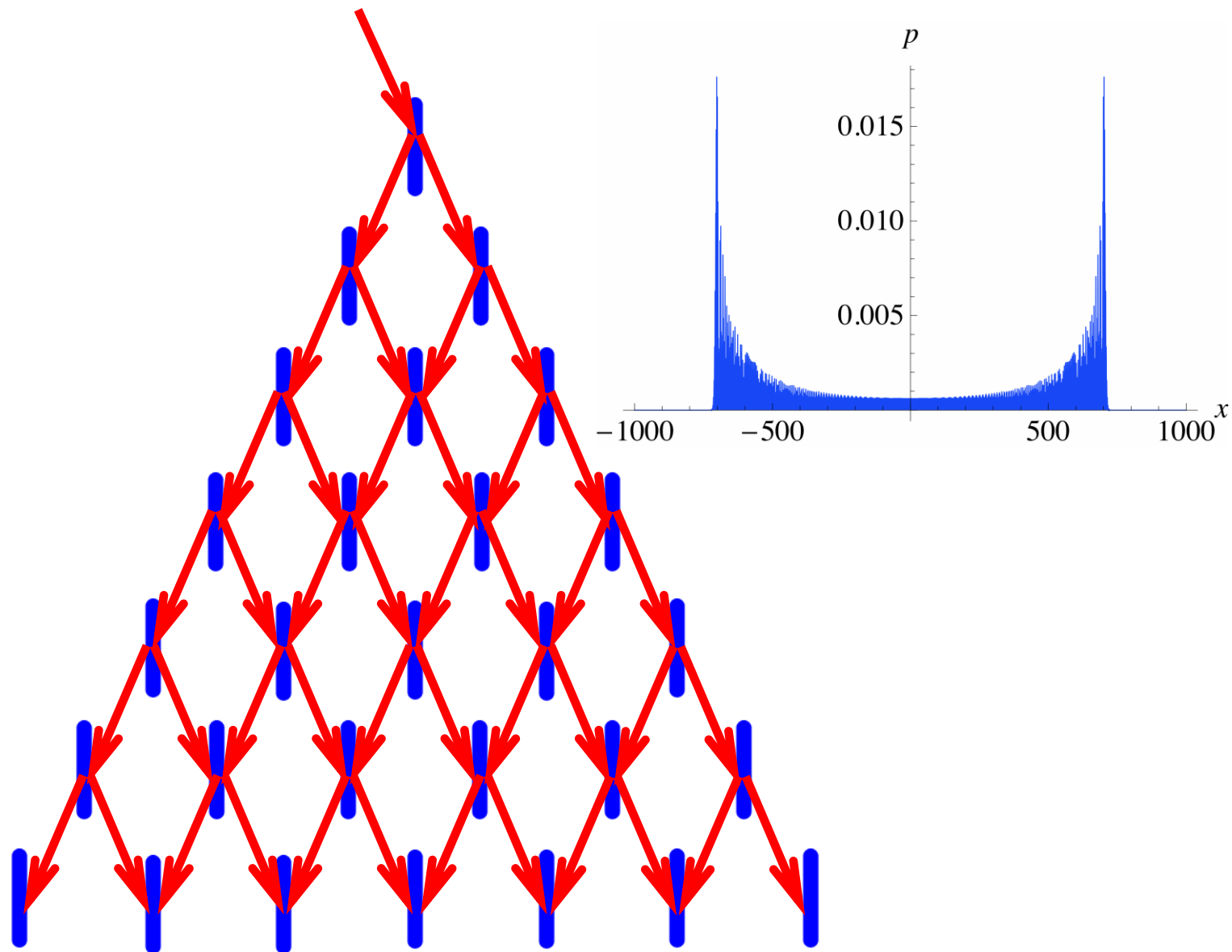


Kvantumos Galton-deszka



D. Bouwmeester, I. Marzoli, G.P. Karman, W. Schleich, and J. P. Woerdman, PRA 61, 013410 (2000).

Optikai Galton-deszka



Kvantuminformatika & bolyongás

- **Hatékony kvantum algoritmusok:**
 - keresés N. Shenvi, J. Kempe, K. B. Whaley, PRA 67, 052307 (2003)
 - univerzális primitív A. M. Childs, PRL 102, 180501 (2009)
- **Elemi fizikai modell:**
 - transzportjelenségek
 - topológikus fázisok (Asbóth János)
 - mérés, véletlen, koherencia-dekoherencia
- **Megvalósítás:** csapdázott ionok, atomok optikai rácson, fotonok, ...
- **Javaslat: gyűrűk 2D elektrongázban**

O. Kálmán, T. Kiss, P. Földi, PRB 80, 035327 (2009)

Diszkrét idejű bolyongás

Homogén + unitér: csak triviális megoldás

⇒ **belső szabadsági fok („érme”)**

Pozíció: gráf

$$\mathcal{H} = \mathcal{H}_C \otimes \mathcal{H}_P$$

Érme: gráf foka

$$U = S \cdot (C \otimes I)$$

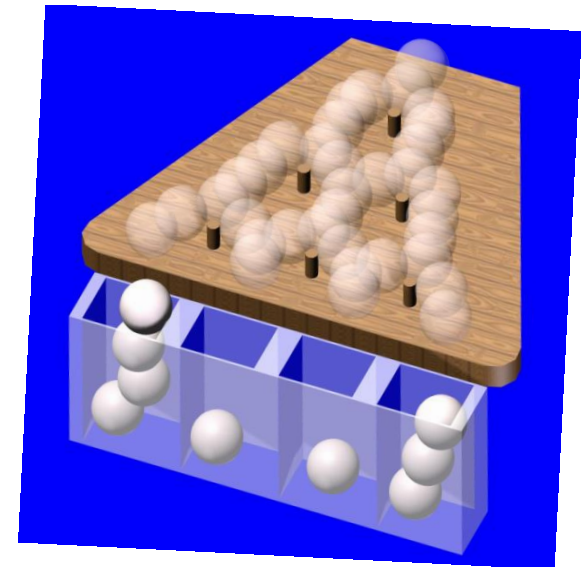
Érmefüggő eltolás

Érme operátor

Példa: 1D bolyongás - 1/2 spin

$$|x, \downarrow\rangle \rightarrow |x - 1, \downarrow\rangle$$

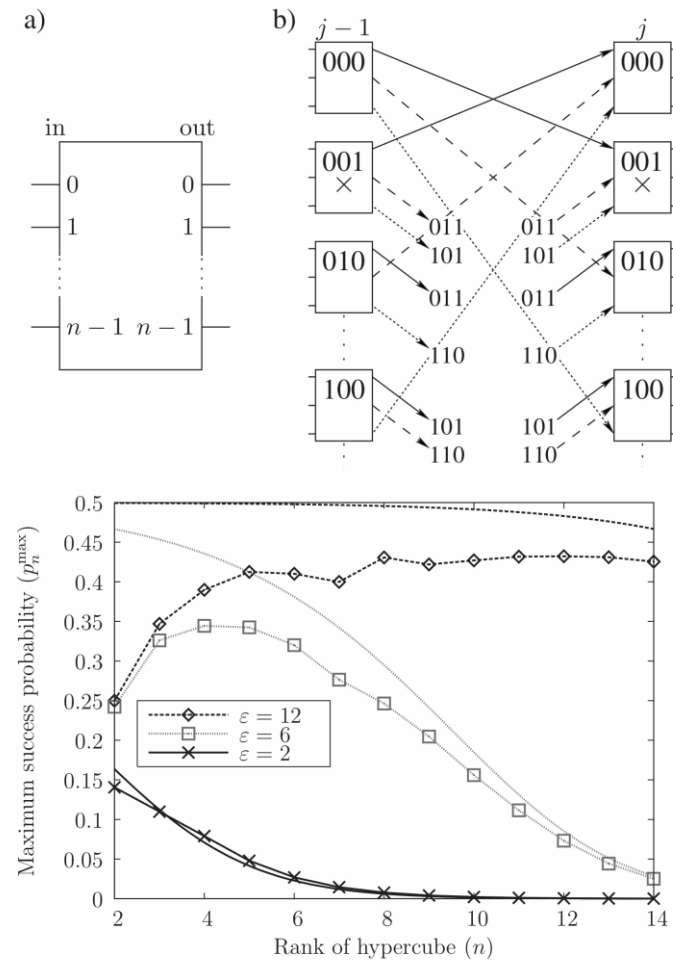
$$|x, \uparrow\rangle \rightarrow |x + 1, \uparrow\rangle$$



Általában: absztrakt téren

Keresés hiperkockán - hibákkal

- **Optikai elrendezés**
- **Hibák:**
foton-veszteség és fázis-zaj
- **Eredmény:** a kvadratikusan gyorsabb keresés megmaradhat



A. Gábris, T. Kiss, I. Jex, PRA 76, 062315
(2007)

Pólya-féle szám



Pólya
György

- **Dimenzió** klasszikusan meghatározza: csak 1D, 2D tér vissza
- **Kvantumosan: mérés szerepe**

$$G = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \end{pmatrix}$$

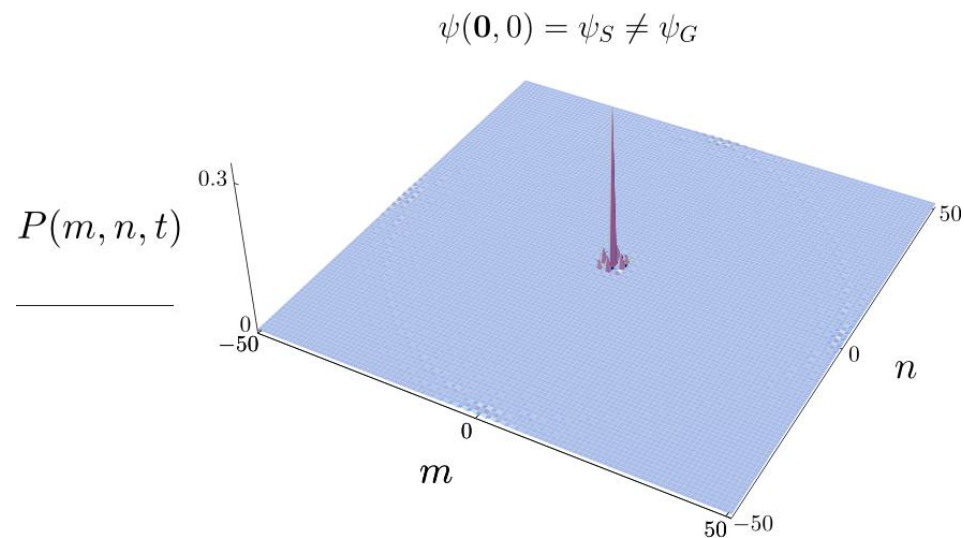
- definíció

[M. Stefanak, I. Jex, T. Kiss,
PRL 100, 020501 (2008)]

- érme és kezdőállapotfüggő

[M. Stefanak, T. Kiss, I. Jex,

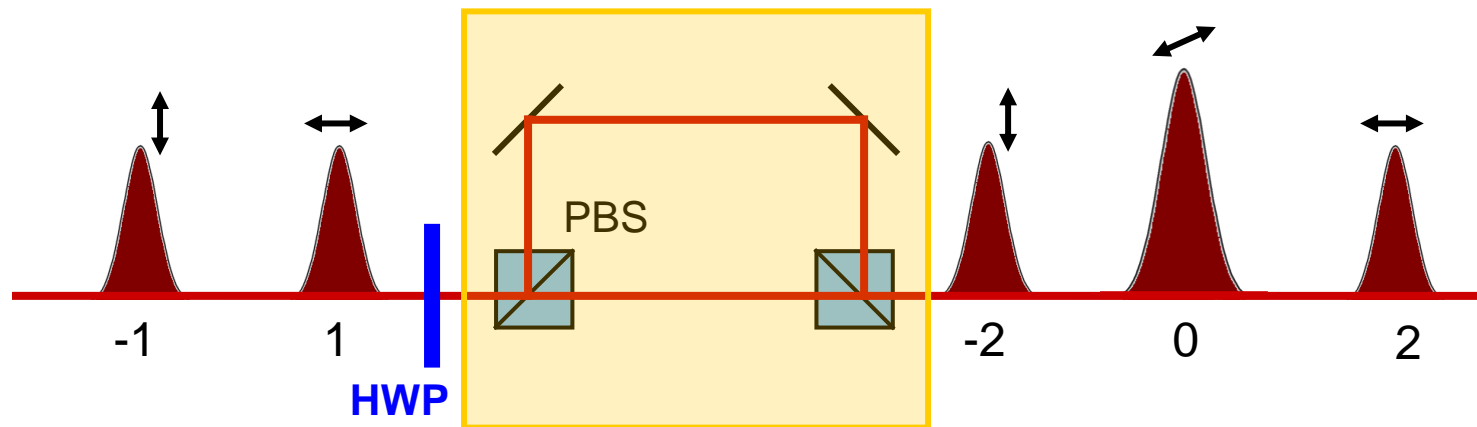
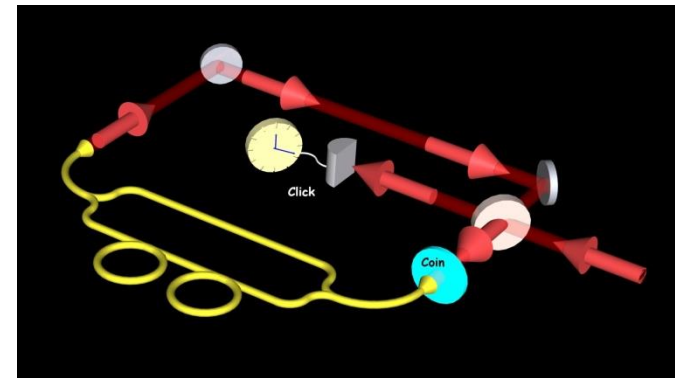
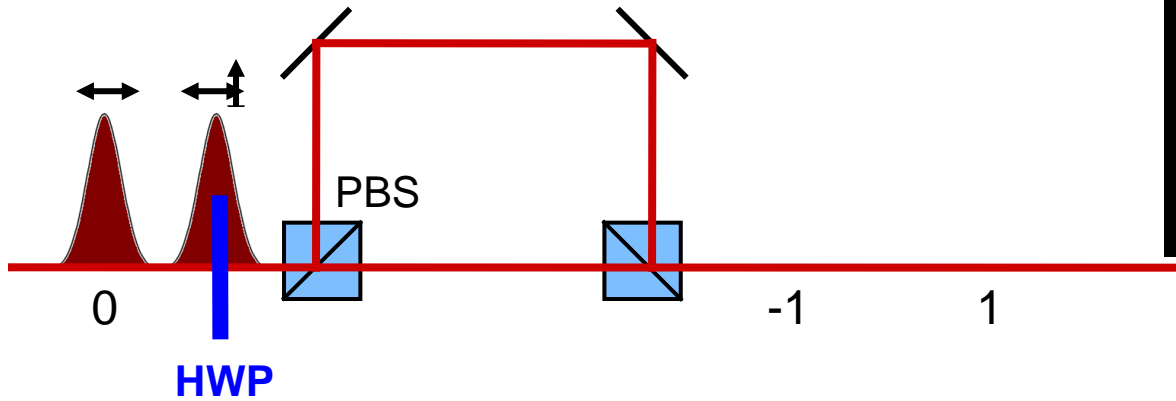
PRA 78, 032306 (2008)]



2D Grover bolyongás: csapdázódás

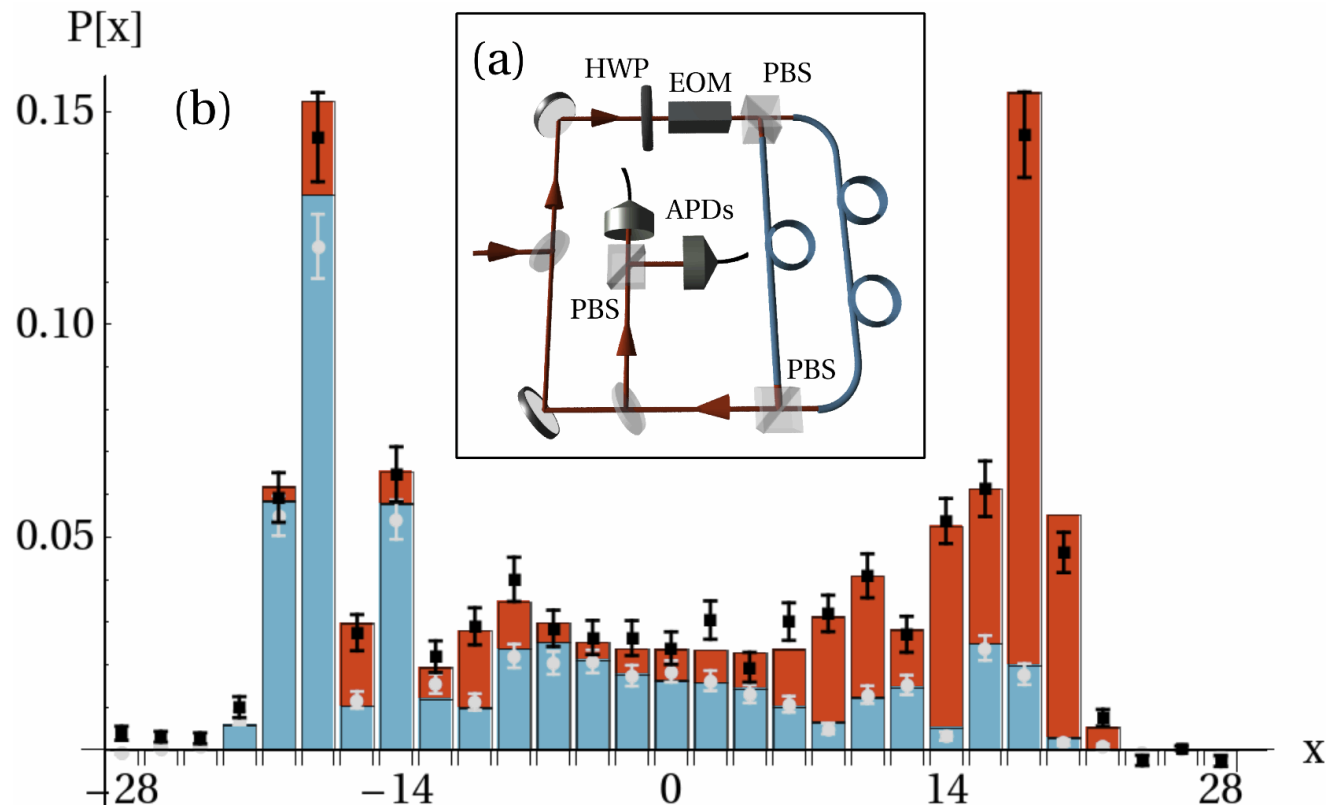
Optikai megvalósítás

Érme: **polarizáció**



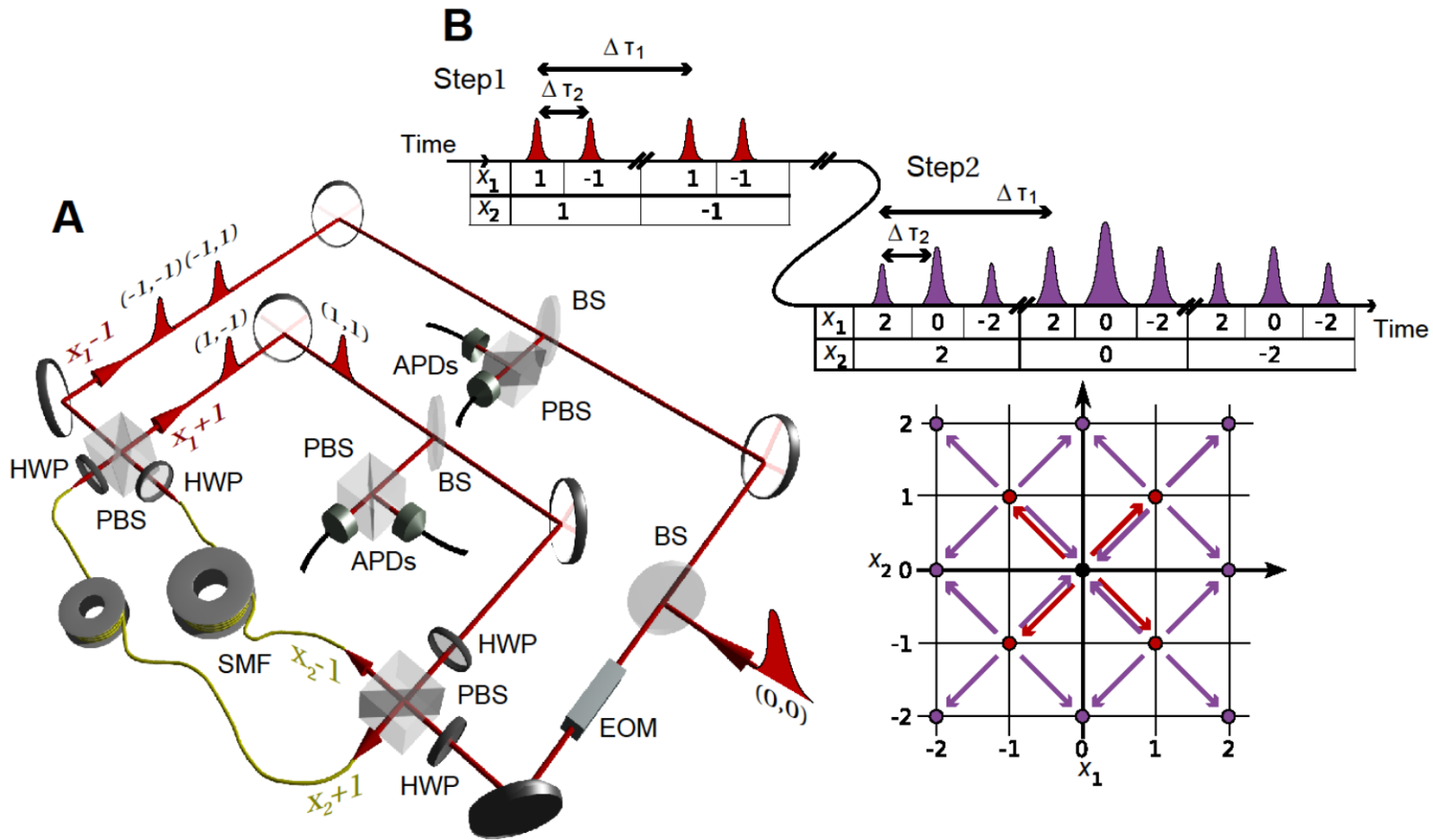
A. Schreiber, K. N. Cassemiro, V. Potoček, A. Gábris, P. J. Mosley,
E. Andersson, I. Jex, Ch. Silberhorn, PRL 104, 050502 (2010)

1D kísérleti eredmények



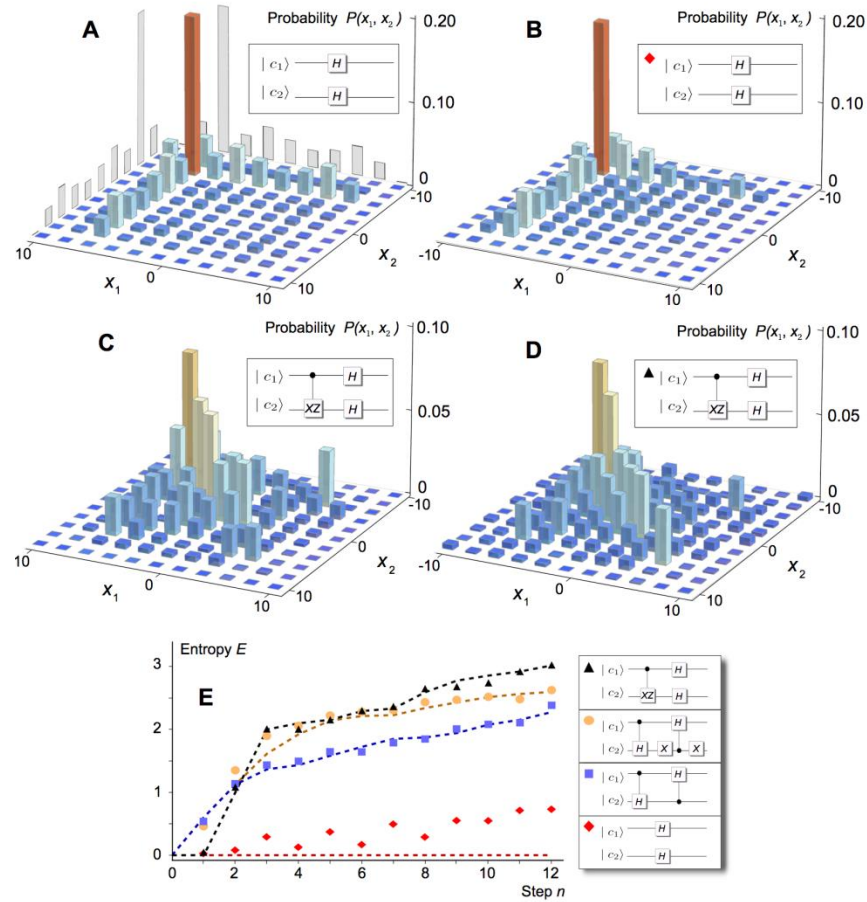
A. Schreiber, K. N. Cassemiro, V. Potoček, A. Gábris, I. Jex and Ch. Silberhorn, PRL 106, 180403 (2011)

2D kísérlet



A. Schreiber, A. Gábris, P. P. Rohde, K. Laiho, M. Štefaňák, V. Potoček, C. Hamilton, I. Jex, Ch. Silberhorn, Science 336, 55 (2012)

2D kísérlet



A. Schreiber, A. Gábris, P. P. Rohde, K. Laiho, M. Štefaňák, V. Potoček, C. Hamilton, I. Jex, Ch. Silberhorn, Science 336, 55 (2012)

Köszönöm a figyelmet!