

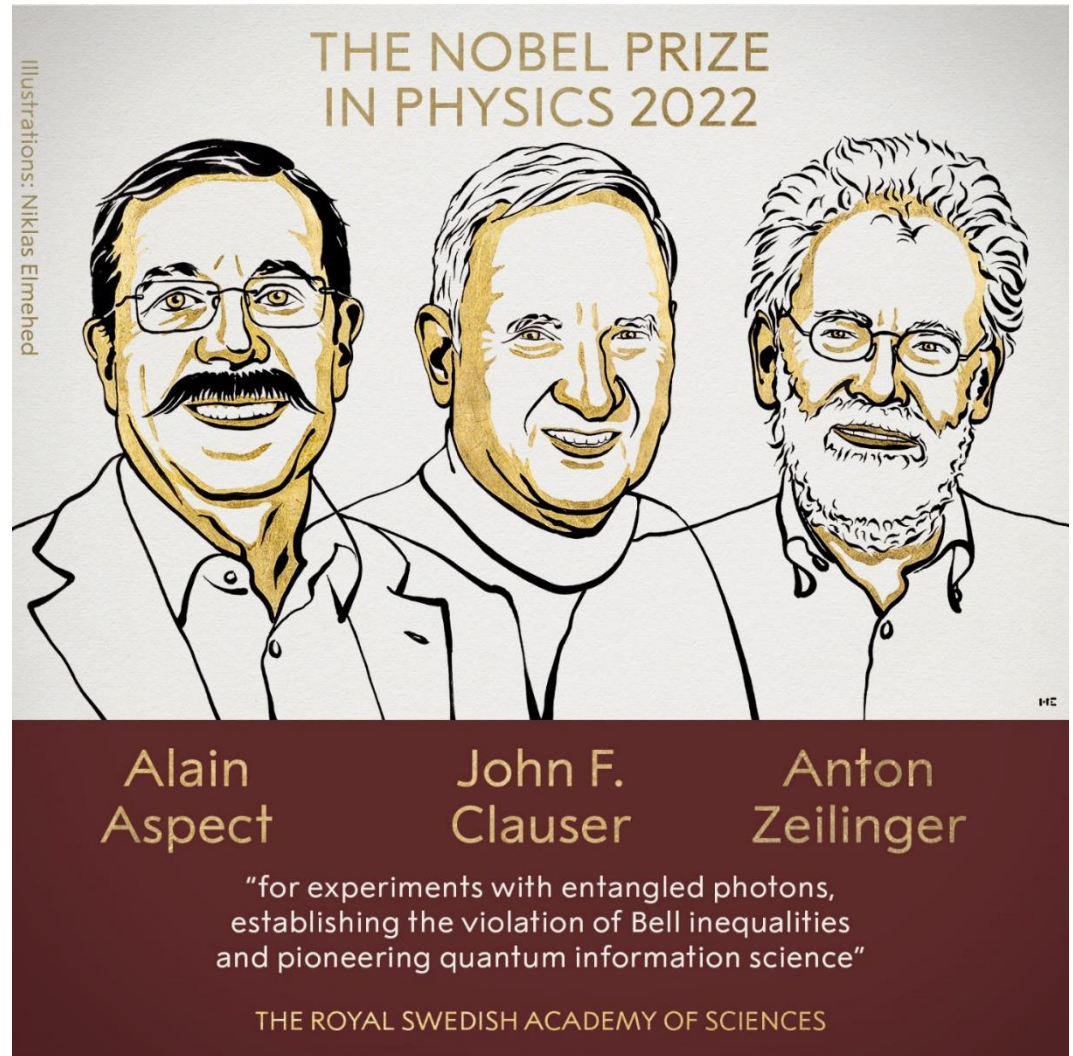
**Jak zlekceważyć
Nagrodę Nobla
Test nierówności Bella
dla splątanych kwantów γ**

Zygmunt Szepliński
Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów
szef@fuw.edu.pl

Seminarium w Zakładzie Fizyki Jądrowej
Wydział Fizyki

Nagrodę Nobla z fizyki 2022

Nagrodę Nobla z fizyki otrzymali: **Alain Aspect** (Uniwersytet Paris-Saclay, École Polytechnique, Francja), **John F. Clauser** (J.F. Clauser & Assoc., USA) oraz **Anton Zeilinger** (Uniwersytet Wiedeński, Austria) "za eksperymenty ze splątanymi fotonami, potwierdzenie naruszenia nierówności Bella oraz pionierską informatykę kwantową".



Nagrodę Nobla z fizyki 2022

Laureaci tegorocznej Nagrody Nobla otrzymali ją za pionierskie badania nad kwantową naturą świata. – Przeprowadzane przez nich eksperymenty potwierdziły, że świat, w którym żyjemy opisywać należy nie w sposób klasyczny, jak chciał tego Albert Einstein, ale kwantowy.

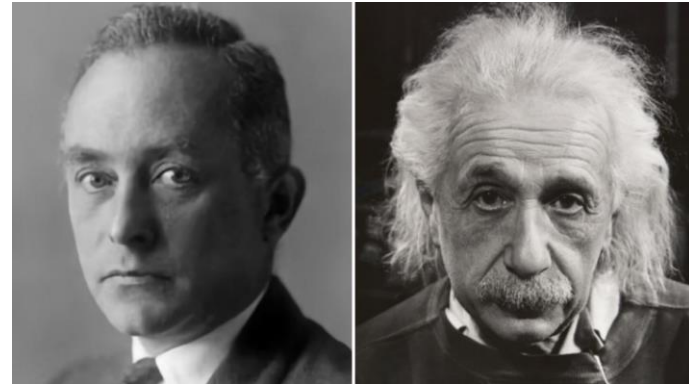
Zdaniem Einsteina w fizyce klasycznej nieokreśloność jest jedynie skutkiem naszej niewiedzy, a parametry np. cząstek, których nie znamy to tzw. **parametry ukryte**.

Tymczasem w mechanice kwantowej wielkości fizyczne są fundamentalnie nieokreślone i dopiero w momencie pomiaru ustalają one swoje wartości.

Mechanika Kwantowa - początki

Albert Einstein do Maxa Borna
4.12 1926

**In any case I am
convinced that the Old
Guy does not play dice
with the Universe.**



Niels Bohr do Alberta Einsteina

**Stop telling God how to
run the Universe**



Mechanika Kwantowa - dziś

Zgodnie z mechaniką kwantową nie można jednoznacznie przewidzieć końcowego stanu układu, można jedynie podać zespół prawdopodobieństw.

Problem Einsteina czy jest to tylko nasza niewiedza, czy też podstawowe prawo przyrody jest rozstrzygnięty.

Czym jest splątanie (entanglement)?

Splątanie jest definiowane dla dwu lub więcej obiektów kwantowych (np. fotony), których funkcje falowe nie są opisywane oddzielnie. Symbolicznie zapisujemy to jako:

$$|\psi_{12}\rangle \neq |\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle$$

Oznacza to, że stanu kwantowego jednej cząstki nie można zmienić nie zaburzając stanu kwantowego drugiej. Zjawisko to ma miejsce niezależnie od tego jak daleko znajdują się od siebie splątane cząstki.

Tutaj będzie mowa o splątaniu polaryzacji, choć może to dotyczyć innych wielkości fizycznych, takich jak energia, pęd

Lokalność i przyczynowość

Lokalność:

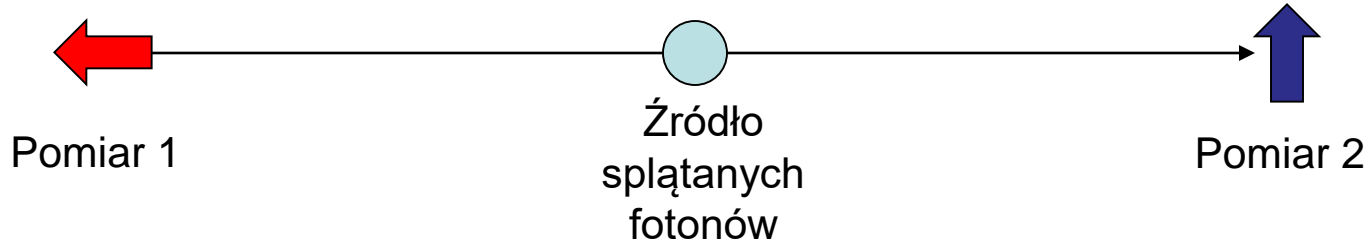
Na rezultat pomiaru (np. polaryzacji, pędu) nie może wpływać fakt pomiaru wykonanego w innym odległym punkcie lub jego uzyskany wynik.

Przyczynowość:

Aby sprawdzić przyczynowość, należy dokonać pomiarów odległych w czasie krótszym niż czas przelotu fotonu między punktami pomiarowymi.

(np. dla pomiarów odległych na 1m wystarczy 3 ns)

Splątanie i nielokalność

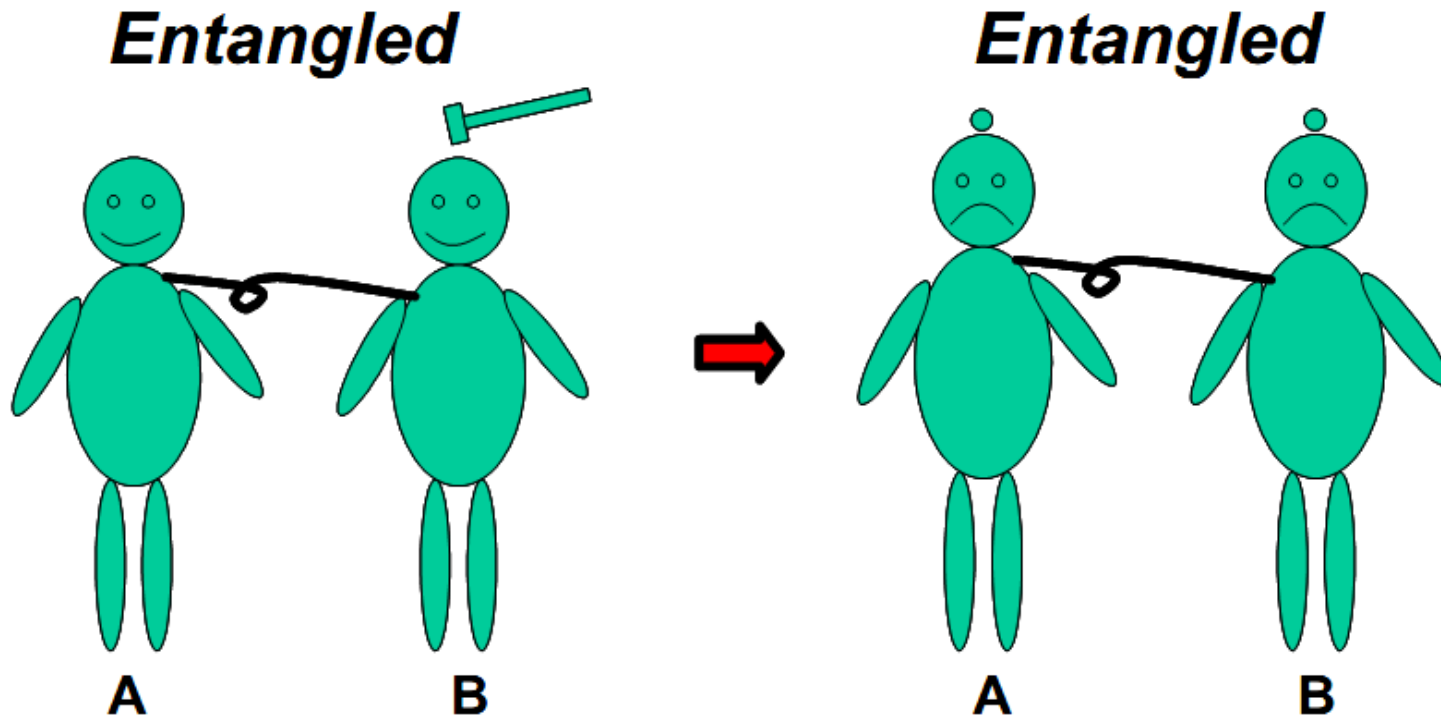


Splątanie: Rozseparowana, ale splątana część kwantowego systemu jest zdefiniowana stanem drugiej części.

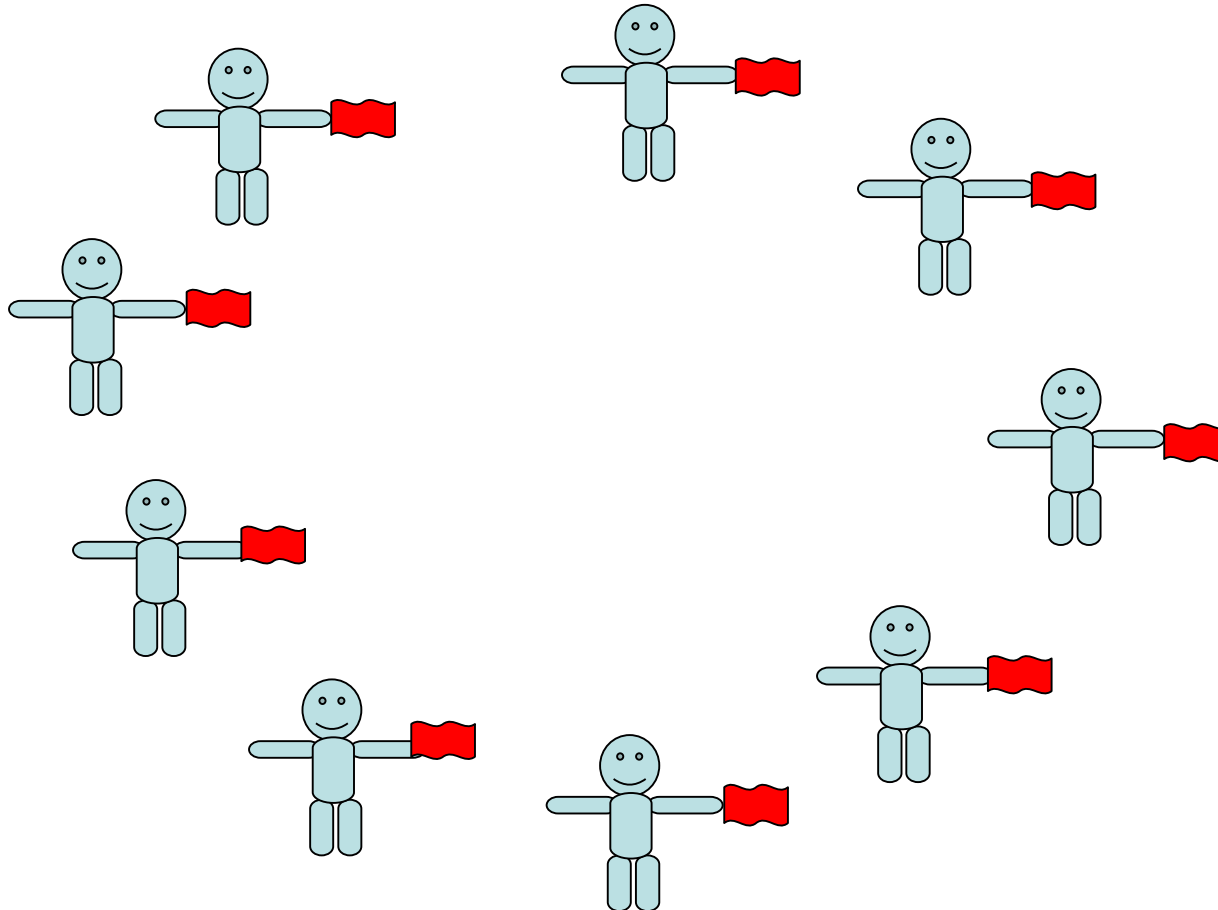
Możliwy wynik „**pomiaru 1**” zależy od wyniku „**pomiaru 2**” i vice versa.

Nielokalność: Związki między rozseparowanymi częściami systemu to „**kwantowa nielokalność**”. Te związki występują nawet jeśli elementy systemu są rozseparowane o lata świetlne. Einstein nazywał to upiornymi działaniami na odległość (***spooky actions at a distance***).

Splątanie kwantowe



Splątanie klasyczne - korelacja



Korelacja vs splątanie

Klasycznie prawdopodobieństwo iloczynu zdarzeń nie musi być iloczynem prawdopodobieństw każdego zdarzenia z osobna. Jeśli coś takiego obserwujemy to mamy do czynienia z

układem skorelowanym

Korelacja występująca na poziomie amplitud (pierwiastków z prawdopodobieństw) to

kwantowe splątanie

EPR

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)

W 1935 roku Einstein Podolsky i Rosen przedstawili swój eksperyment myślowy, który stwierdzał, że mechanika kwantowa (QM) powinna być niekompletna i uzupełniona dodatkowymi parametrami. QM stwierdza, że dla par skorelowanych cząstek (jak elektrony) lub fotonów pomiar spinu lub polaryzacji jednej z cząstek definiuje spin lub polaryzację drugiej. Definiuje to współczynnik korelacji:

$$E(\vec{a}, \vec{b}) = P_{++}(\vec{a}, \vec{b}) + P_{--}(\vec{a}, \vec{b}) - P_{\pm}(\vec{a}, \vec{b}) - P_{\mp}(\vec{a}, \vec{b})$$

$$E(\vec{a}, \vec{b}) = \frac{R_{++}(\vec{a}, \vec{b}) + R_{--}(\vec{a}, \vec{b}) - R_{\pm}(\vec{a}, \vec{b}) - R_{\mp}(\vec{a}, \vec{b})}{R_{++}(\vec{a}, \vec{b}) + R_{--}(\vec{a}, \vec{b}) + R_{\pm}(\vec{a}, \vec{b}) + R_{\mp}(\vec{a}, \vec{b})}$$

Gdzie R_{\pm} to częstości koincydencji

Nierówność Bella

Physics Vol. 1, No. 3, pp. 195–200, 1964 Physics Publishing Co. Printed in the United States

ON THE EINSTEIN PODOLSKY ROSEN PARADOX*

J. S. BELL[†]

Department of Physics, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin

(Received 4 November 1964)

Zakładając istnienie ukrytych parametrów Bell wskazał, że kombinacja czterech współczynników korelacji:

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

jest ograniczona nierównością:

$$-2 \leq S \leq +2$$

Testowanie nierówności Bella - Clauser

Rep. Prog. Phys., Vol. 41, 1978. Printed in Great Britain



Bell's theorem: experimental tests and implications

JOHN F CLAUSER† and ABNER SHIMONY‡§

† Lawrence Livermore Laboratory—L-437, Magnetic Fusion Energy Division, Livermore, California 94550, USA

‡ Departments of Physics and Philosophy, Boston University, Boston, Massachusetts 02215, USA

Wcześniejsze prace:

Propozycja: Clauser J.F., Horne M.A., Shimony A. and Holt R.A. PRL **23**(1969)880.

Eksperyment: Freedman S.J and Clauser J.F. PRL **28**(1972)938

Clauser i inni pierwsi wykazali, że nie ma parametrów ukrytych !!

Mechanika Kwantowa - dziś

Zgodnie z mechaniką kwantową nie można jednoznacznie przewidzieć końcowego stanu układu, można jedynie podać zespół prawdopodobieństw.

Problem Einsteina czy jest to tylko nasza niewiedza, czy też podstawowe prawo przyrody jest rozstrzygnięty.

Eksperymenty A. Aspecta

VOLUME 49, NUMBER 2

PHYSICAL REVIEW LETTERS

12 JULY 1982

Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm *Gedankenexperiment*: A New Violation of Bell's Inequalities

Alain Aspect, Philippe Grangier, and Gérard Roger

*Institut d'Optique Théorique et Appliquée, Laboratoire associé au Centre National de la Recherche Scientifique,
Université Paris-Sud, F-91406 Orsay, France*

(Received 30 December 1981)

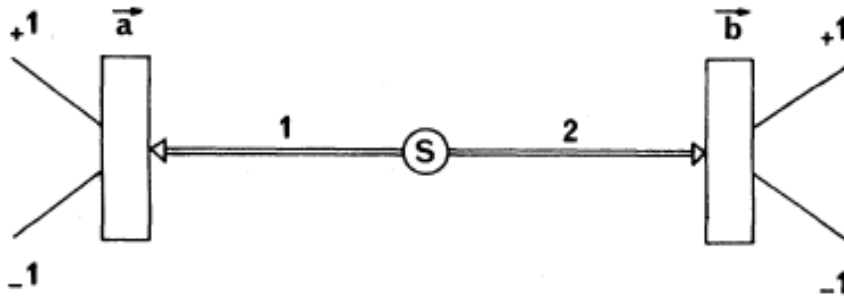
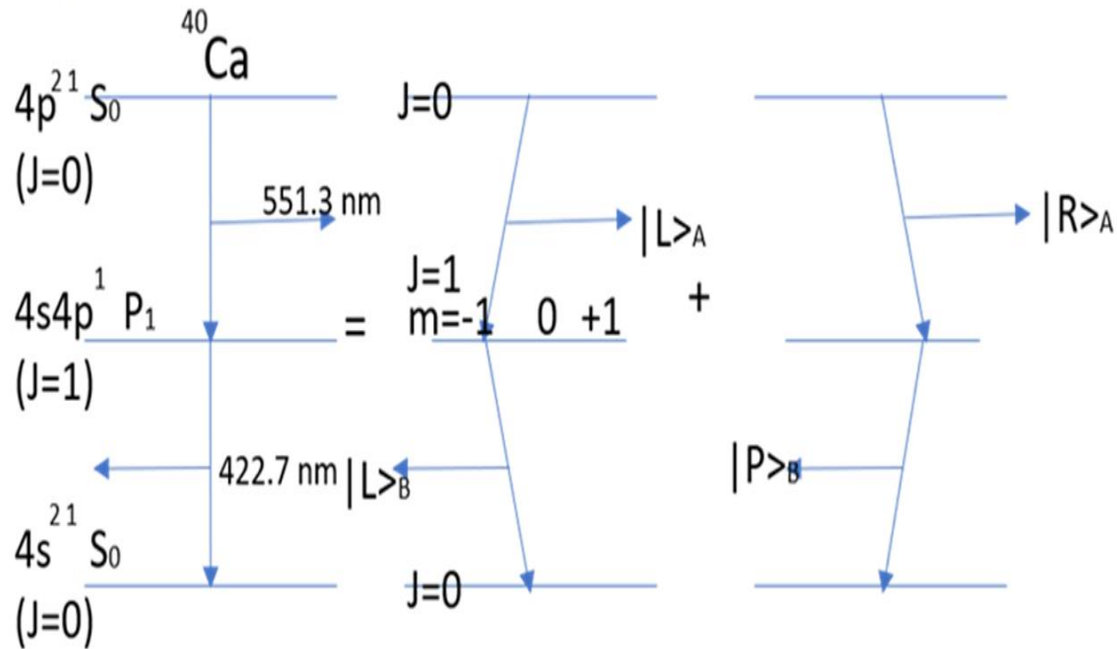


FIG. 1. Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm *gedankenexperiment*. Two-spin- $\frac{1}{2}$ particles (or photons) in a singlet state (or similar) separate. The spin components (or linear polarizations) of 1 and 2 are measured along \vec{a} and \vec{b} . Quantum mechanics predicts strong correlations between these measurements.

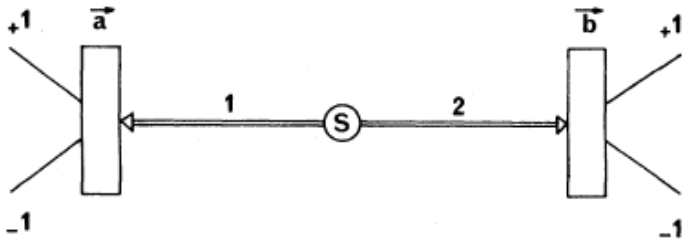
W pomiarze J.F Clausera
zwykłe polarymetry
Z odpowiedzią +1 lub brakiem
odpowiedzi.

W pomiarze A. Aspecta
Polarymetry z dychotomiczną
odpowiedzią ± 1

Splątane fotony Aspecta



Idea testu nierówności Bella



Zdolność polaryzacyjna 0.95 i 0.93

$$S_{\text{exp}} = 2,697 \pm 0.015$$

$$S_{\text{max}} = 2\sqrt{2} = 2.82$$

FIG. 1. Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm *gedankenexperiment*. Two-spin- $\frac{1}{2}$ particles (or photons) in a singlet state (or similar) separate. The spin components (or linear polarizations) of 1 and 2 are measured along \vec{a} and \vec{b} . Quantum mechanics predicts strong correlations between these measurements.

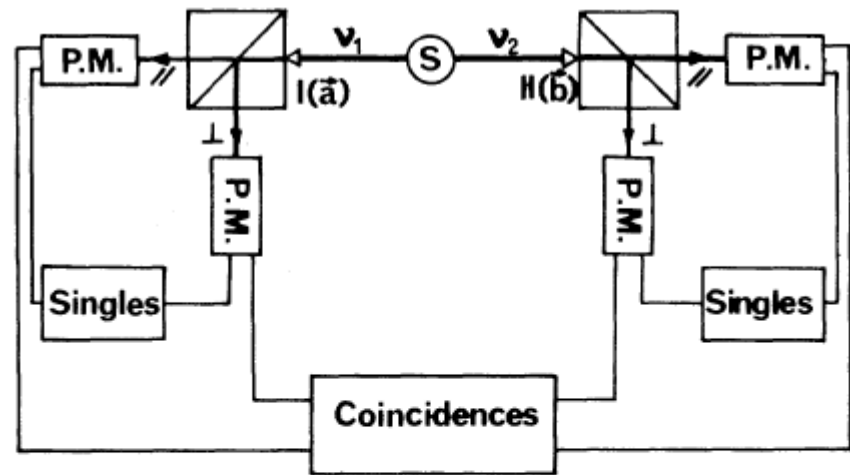
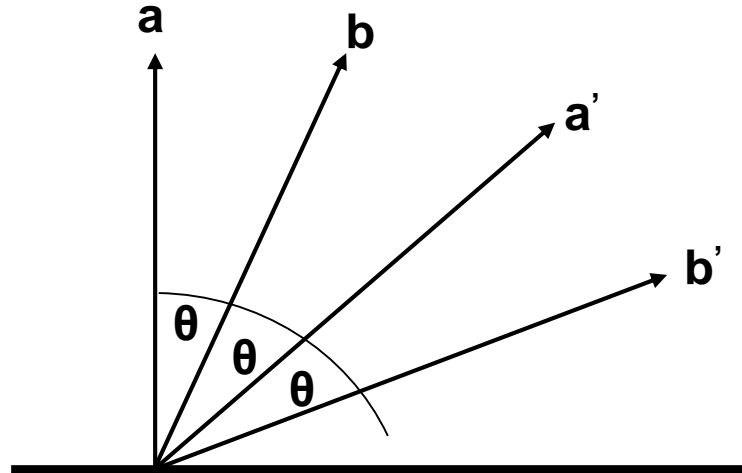


FIG. 2. Experimental setup. Two polarimeters I and II, in orientations \vec{a} and \vec{b} , perform true dichotomic measurements of linear polarization on photons ν_1 and ν_2 . Each polarimeter is rotatable around the axis of the incident beam. The counting electronics monitors the singles and the coincidences.



Pomiar współczynników korelacji



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

Mechanika kwantowa przewiduje maksymalną wartość bezwzględną S dla $\theta=22,5^\circ$ i $67,5^\circ$.

Wtedy $|S| = 2\sqrt{2}$ co narusza nierówność Bella.

Policzmy krok po kroku wartość S

$$\cos(22.5^\circ) = 0.924 \rightarrow \cos^2(22.5^\circ) = 0.854$$

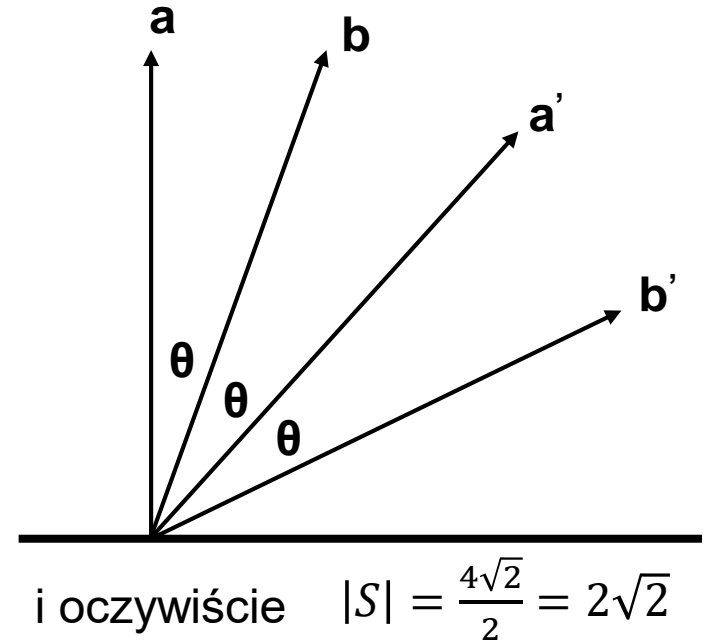
$$\cos(67.5^\circ) = 0.382 \rightarrow \cos^2(67.5^\circ) = 0.146$$

$$\text{Wtedy: } E_{ab} = \frac{2 \cdot 0,854 - 2 \cdot 0,146}{2} = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$E_{ab'} = \frac{2 \cdot 0,146 - 2 \cdot 0,854}{2} = -\frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$E_{a'b} = \frac{2 \cdot 0,854 - 2 \cdot 0,146}{2} = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$E_{a'b'} = \frac{2 \cdot 0,854 - 2 \cdot 0,146}{2} = \frac{\sqrt{2}}{2}$$



$$E(\vec{a}, \vec{b}) = P_{++}(\vec{a}, \vec{b}) + P_{--}(\vec{a}, \vec{b}) - P_{\pm}(\vec{a}, \vec{b}) - P_{\mp}(\vec{a}, \vec{b})$$

W pomiarze polaryzacji pod kątem θ względem kierunku spolaryzowanych liniowo fotonów o natężeniu I_0 uzyskujemy:

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad \text{Prawo Malusa}$$

Nasz eksperyment

Vol. 27(1996)

ACTA PHYSICA POLONICA B

No 1-2

EXPERIMENTAL TEST OF BELL'S INEQUALITY USING ANNIHILATION PHOTONS^{*,**}

S. OSUCH, M. POPKIEWICZ, Z. SZEFLIŃSKI AND Z. WILHELMI

The Institute of Experimental Physics, Warsaw University
Hoża 69, PL 00-681 Warsaw, Poland

(Received December 18, 1995)

Polarymetr dla kwantów γ

Związki energetyczne w rozpraszaniu Comptona:

$$\hbar\omega' = \frac{\hbar\omega}{1 + \frac{\hbar\omega}{m_0 c^2}(1 - \cos \theta)}, \quad \text{dla } \hbar\omega = 511 \text{ keV}, \cos \theta = 0, \hbar\omega' = \frac{\hbar\omega}{2}$$

Rozpraszanie Comptona spolaryzowanego kwantu γ :

$$d\sigma = \frac{1}{2} \left(\frac{e^2}{m_0 c^2} \right)^2 \left(\frac{\omega'}{\omega} \right)^2 \left[\frac{\omega}{\omega'} + \frac{\omega'}{\omega} - 2 \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \phi \right] d\Omega$$

$$\text{Asymetria: } R = \frac{\frac{d\sigma}{d\Omega}(\phi=90^\circ)}{\frac{d\sigma}{d\Omega}(\phi=0^\circ)} \frac{2,5}{0,5} = 5$$

W idealnym polarymetrze, dla $\hbar\omega = 511 \text{ keV}$, mamy zdolność polaryzacyjną 83,3%. Maksymalny współczynnik korelacji $E=0,666$. Nasz $E_{\text{exp}}=0,401$

Pomiar

Experimental Test of Bell's Inequality Using...

569

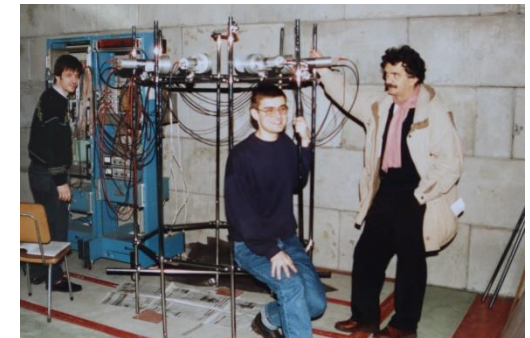
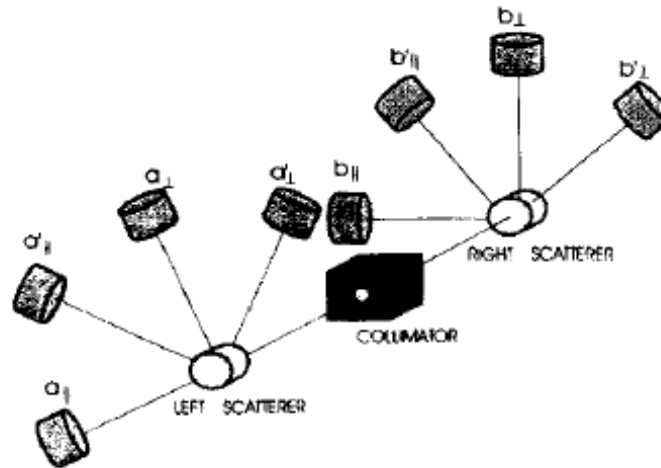


Fig. 1. Schematic diagram of scattering geometry for the experiment of the test of Bell's inequality violation.

Rozpraszacz scyntylator plastikowy $\phi=3\times 5$ cm, 38 cm od źródła
Detektory rozproszonych fotonów BaF_2 $\phi=2''$, 36 cm od osi rozproszeń
Źródło: ^{22}Na , $A=170$ MBq

Wyniki eksperymentu

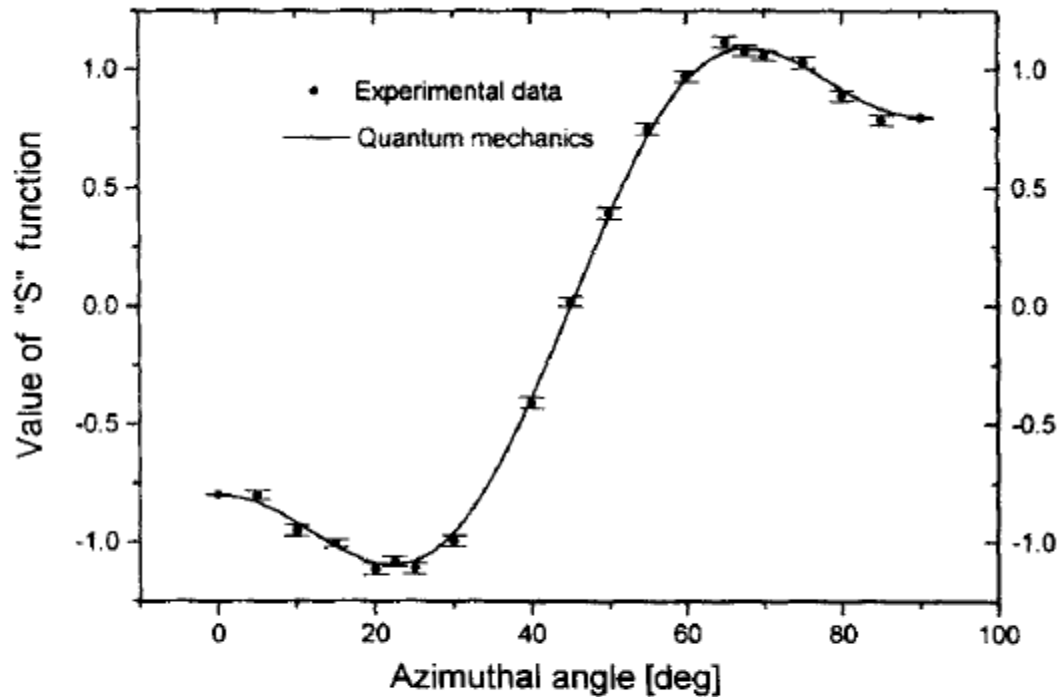


Fig. 2. Plot of experimental values "S" vs. relative azimuthal angle ϕ . The solid line represents the function "S" calculated according to quantum mechanics with corrections for the analysing power of the polarimeter.

Nasz wynik / Wynik A. Aspecta

Nasz Współczynnik korelacji $E(90^0) = 0,401$

Dla takiego polarymetru nierówność Bella $S \leq 2 \cdot E(90^0) \rightarrow S \leq 0,802$

Wynik przewidywany przez mechanikę kwantową $S(22,5^0) = 1,129$

Nasz wynik $S(22,5^0) = 1,121 \pm 0,018$

Współczynnik korelacji A. Aspecta $E(90^0) = 0,945$

Dla takiego polarymetru nierówność Bella $S \leq 2 \cdot E(90^0) \rightarrow S \leq 1,89$

Wynik przewidywany przez mechanikę kwantową $S(22,5^0) = 2,67$

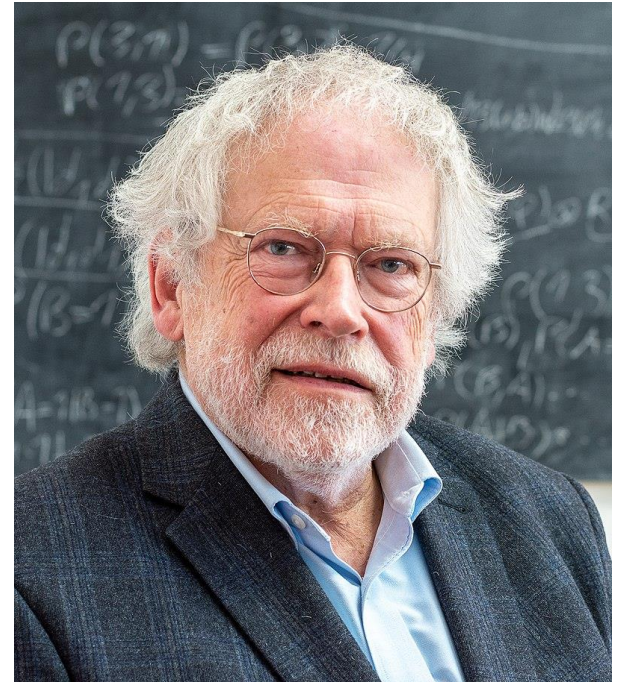
Wynik A. Aspecta $S(22,5^0) = 2,697 \pm 0,015$

Wynik przewidywany przez mechanikę kwantową dla idealnego polarymetru:

$$|S| = 2 \cdot \sqrt{2} = 2,82$$

Kwantowa kryptografia

Zeilinger prowadzi badania nad stanami splątanymi. W 1989 przewidział wraz z Danielem Greenbergerem i Michaeliem Hornem, że splątanie trzech lub więcej cząstek daje korelacje kwantowe absolutnie niezgodne z jakimkolwiek obrazem opartym na pojęciach fizyki klasycznej (tzw. korelacje GHZ). W 1999 roku jego zespół jako pierwszy zrealizował korelacje GHZ i interferencję fulerenów czyli molekuł węgla C_{60} w laboratorium.



Zeilinger zrealizował kwantową generację kluczy szyfrowych (kwantowa kryptografia) na odległość do ponad stu kilometrów. Najśłynniejszym eksperymentem Zeilingera jest pierwsza kwantowa teleportacja pomiędzy dwoma fotonami, które powstały w dwóch odrębnych aktach emisji. Od 1990 roku współpracuje z prof. Markiem Żukowskim z Uniwersytetu Gdańskiego nad kwantową komunikacją i kwantową informacją.

Teleportacja kwantowa

Teleportacja kwantowa (QT z ang. *quantum teleportation*) – w kwantowej teorii informacji technika pozwalająca na przeniesienie stanu kwantowego na dowolną odległość z wykorzystaniem stanu splątanego.

Informacja nie może być w ten sposób transmitowana z prędkością nadświetlną. Teleportacja kwantowa jest użyteczna w komunikacji kwantowej. Teleportacja kwantowa jest całkowicie bezpieczna, tzn. podsłuchanie teleportowanej wiadomości pogwałciłoby prawa mechaniki kwantowej.

Pierwszej kwantowej teleportacji dokonano w 1997 roku. 7 lat później teleportowano stan kwantowy jednego atomu do drugiego. W 2012 roku dokonano teleportacji kwantowej na odległość 143 kilometrów między wyspami Kanaryjskimi La Palma i Teneryfą.

Dziękuję

24 listopada 2022

Seminarium Zakład Fizyki
Jądrowej WF