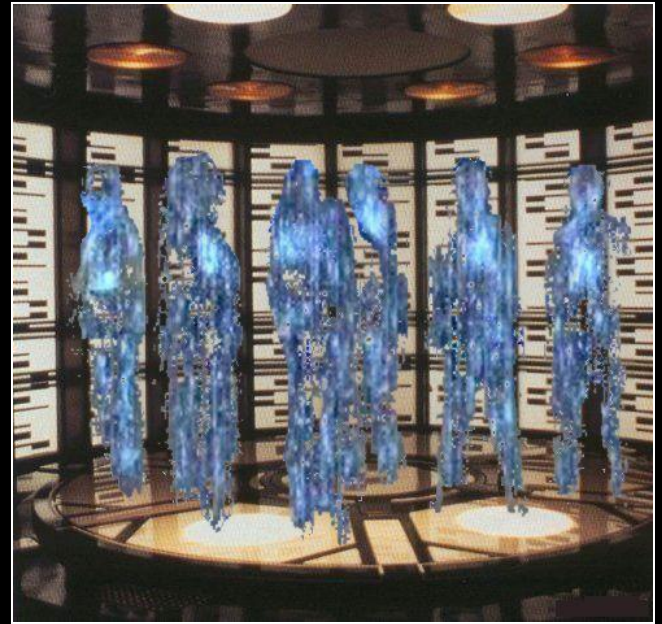
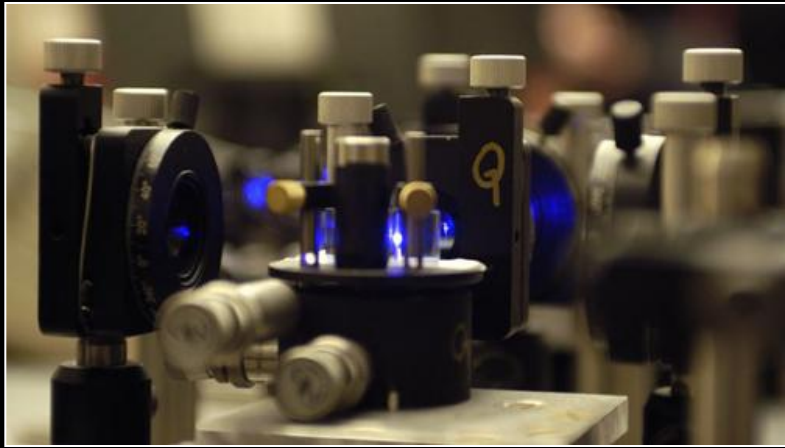


Teleportacja

czy mamy już technologię XXI wieku?



Rafał Demkowicz-Dobrzański
Centrum Fizyki Teoretycznej PAN

Energize!



Teleportacja w Startreku

Czas teleportacji: 2-5s, Zasięg: 40000km



Wchodzimy do transportera i wprowadzamy współrzędne docelowego miejsca teleportacji

Energize!
Materia zmienia się w energię

"Istniejemy" jako czysta energia - światło
Przenosimy się do miejsca docelowego

Energia z powrotem zmienia się w materię

No i jesteśmy!

Transporter odkryty na początku XXII wieku przez Dr. Emory Ericksona, ale bezpieczna wersja transportera pojawiła się dopiero w XXIII wieku na statku *USS Enterprise*

Atomy są fizycznie przeniesione z jednego miejsca w drugie a ich kwantowy stan końcowy jest identyczny ze stanem początkowym

Czy taka teleportacja jest możliwa?

Czas teleportacji: 2-5s, Zasięg: 40000km



Wchodzimy do transportera
i wprowadzamy
współrzędne docelowego
miejsca teleportacji

Energize!
Materia zmienia
się w energię

"Istniejemy" jako czysta
energia - światło
Przenosimy się do
miejsca docelowego

Energia z powrotem
zmienia się w materię

No i jesteśmy!

~~Materia > Energia~~

Niezgodne z prawem zachowania liczby barionowej,
leptonowej

Czy taka teleportacja jest możliwa?

Czas teleportacji: 2-5s, Zasięg: 40000km



Wchodzimy do transportera
i wprowadzamy
współrzędne docelowego
miejsca teleportacji

Energize!
Materia zmienia
się w energię

"Istniejemy" jako czysta
energia - światło
Przenosimy się do
miejsca docelowego

Energia z powrotem
zmienia się w materię

No i jesteśmy!

Materia + Antymateria → Fotony

Trzeba użyć również antymaterii....

Teleportacja informacji

(stanów atomów)

Teleportacja materii

Atomy są fizycznie przeniesione do miejsca docelowego i znajdują się w tym samym stanie co atomy przed teleportacją

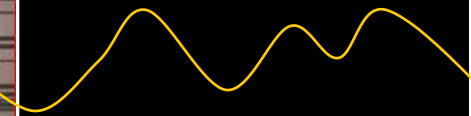
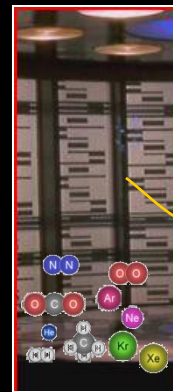
Teleportacja informacji

Atomy muszą być od początku w miejscu docelowym, a teleportowana jest informacja dzięki której tworzą strukturę oryginału.

Atomy oryginału tracą swoją strukturę
Inaczej mielibyśmy kopiowanie....



Energia



Informacja

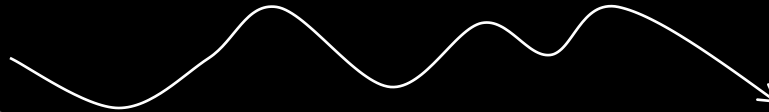


Teleportacja informacji

gdyby świat był klasyczny....



**pomiar stanu
każdego atomu**



**wyniki
pomiarów:
0011110001011**

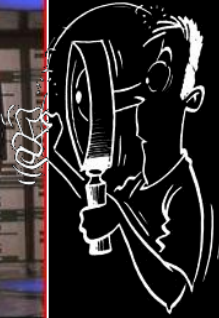


**odtworzenie stanów
atomów zgodnie z
uzyskaną
informacją**

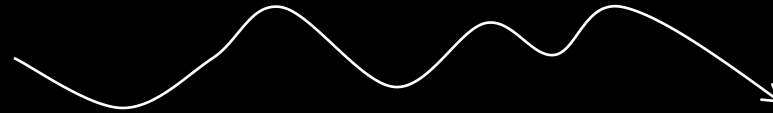
**W świecie klasycznym teleportacja informacji nie ma w sobie nic
zagadkowego sprawia jedynie trudności techniczne....**

**Ponadto, w podobny sposób można wytworzyć dowolną liczbę
wiernych kopii i pozostawić oryginał nietkniętym**

Teleportacja informacji ale świat jest kwantowy!!!



**pomiar zaburza
atomy i nie daje
pełnej informacji o
ich stanie**



**wyniki
pomiarów:
0011110001011**



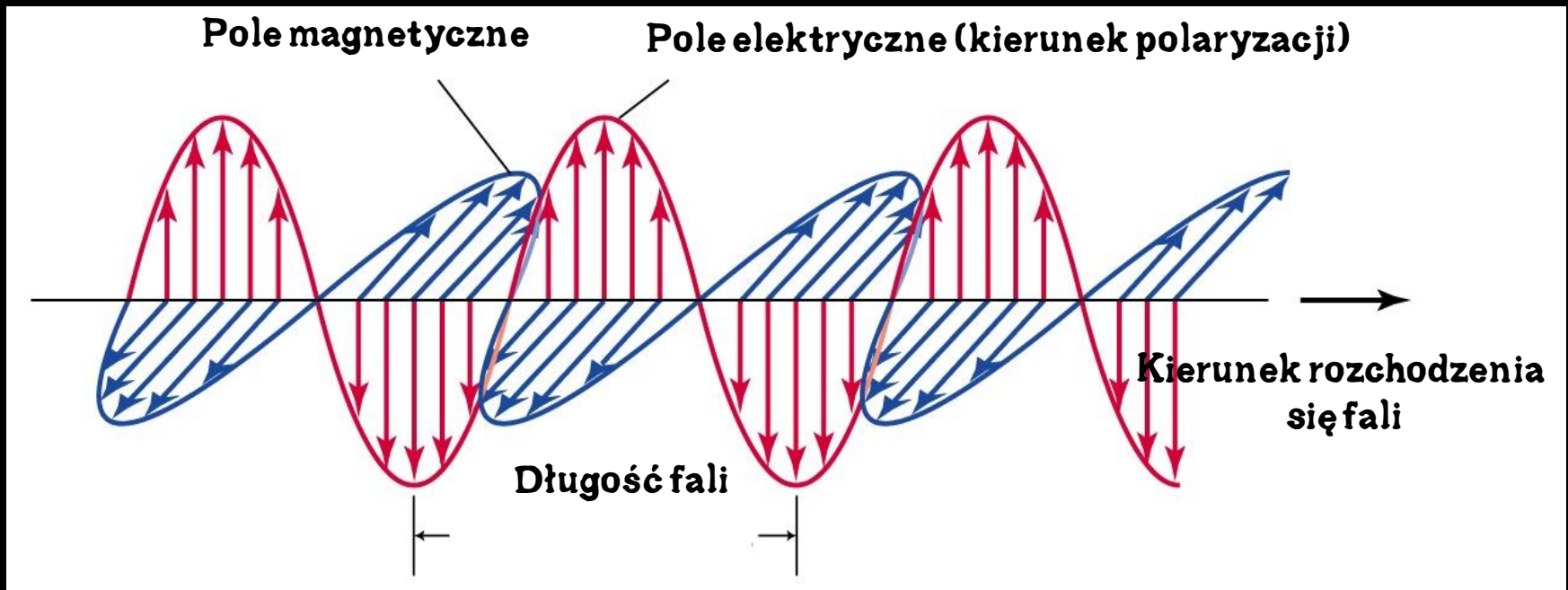
**nie da się wiernie
odtworzyć stanu
atomów, gdyż
pomiar nie dały
pełnej informacji**

**Teleportacji informacji w świecie kwantowym
nie da się zrobić w ten sposób!!!**

XIX wiek: Światło jest falą

Światło jest falą elektromagnetyczną

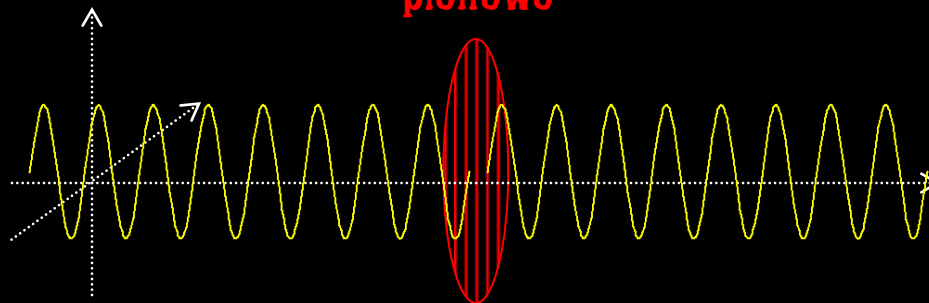
Fala elektromagnetyczna o określonej długości fali:



Przechodzenie światła przez polaryzator

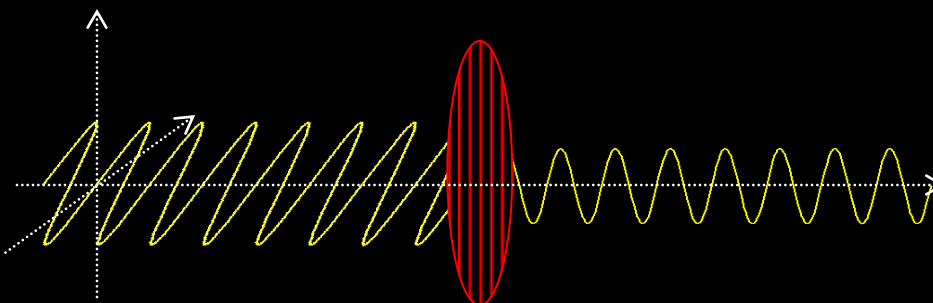
Polaryzator ustawiony pionowo

Światło o polaryzacji pionowej



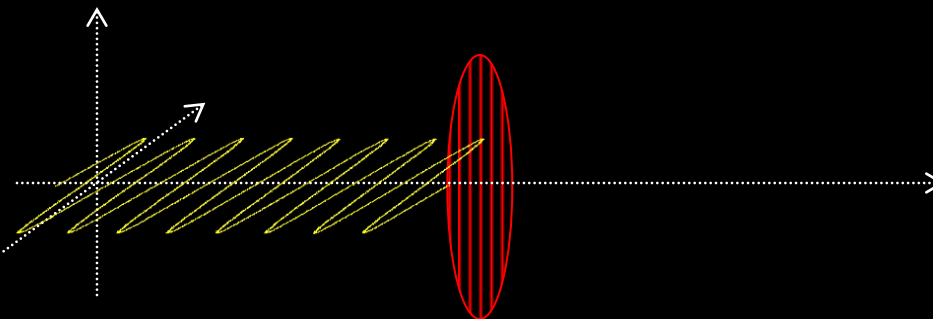
Przechodzi bez osłabienia

Światło o polaryzacji pod kątem 45 stopni do poziomu



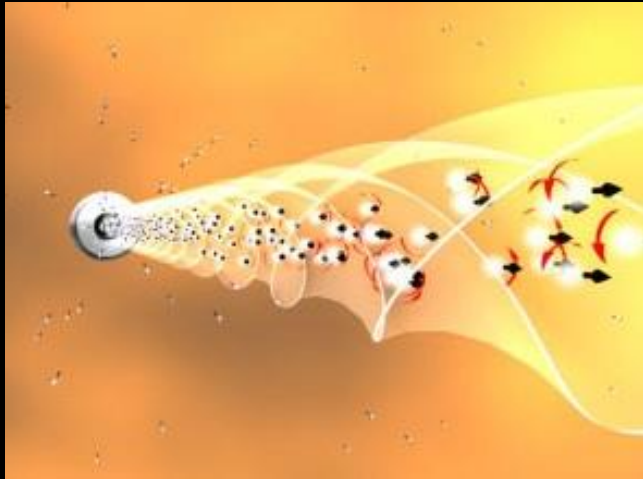
Natężenie światła spada do połowy

Światło o polaryzacji poziomej



Światło całkowicie pochłonięte przez polaryzator

XX wiek: Światło składa się z fotonów



Światło = **strumień cząstek zwanych fotonami**

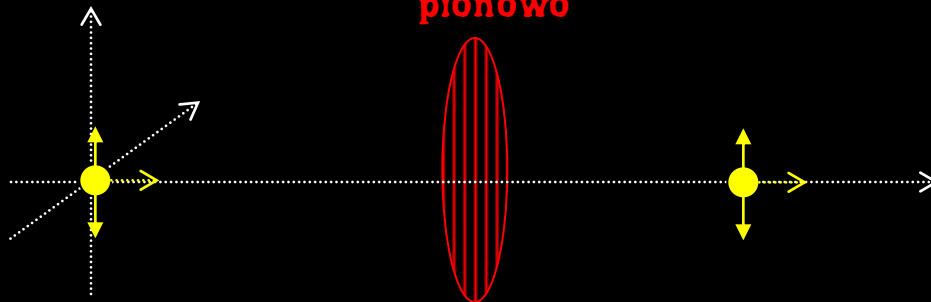
Foton może mieć różne polaryzacje

- Światło o polaryzacji pionowej składa się z fotonów o polaryzacji pionowej
- Światło o polaryzacji poziomej składa się z fotonów o polaryzacji poziomej
- ...

Przechodzenie fotonu przez polaryzator

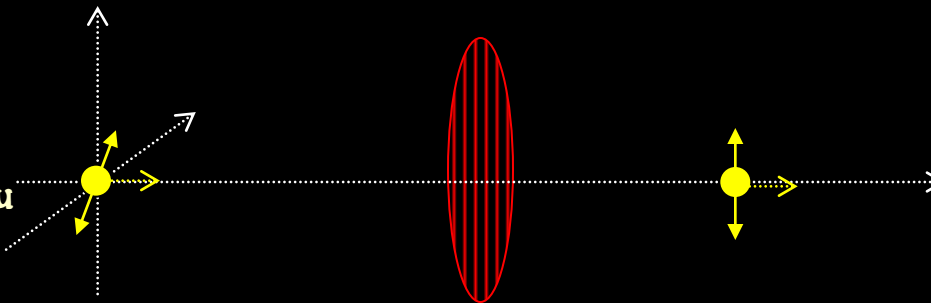
Polaryzator ustawiony pionowo

Foton o polaryzacji pionowej $|90^\circ\rangle$



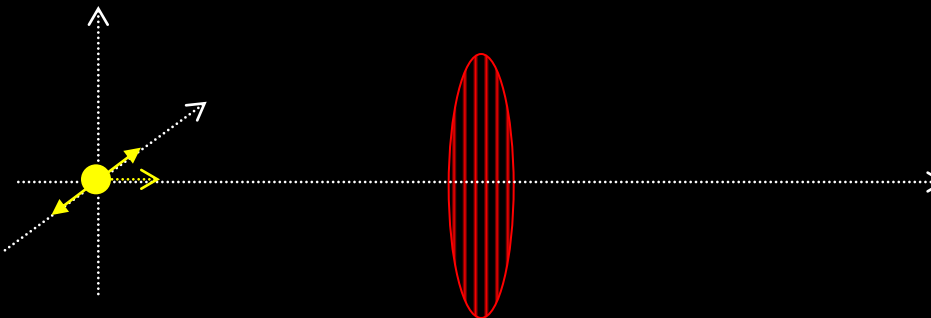
Przechodzi z prawdopodobieństwem 1

Foton o polaryzacji pod kątem 45 stopni do poziomu $|45^\circ\rangle$



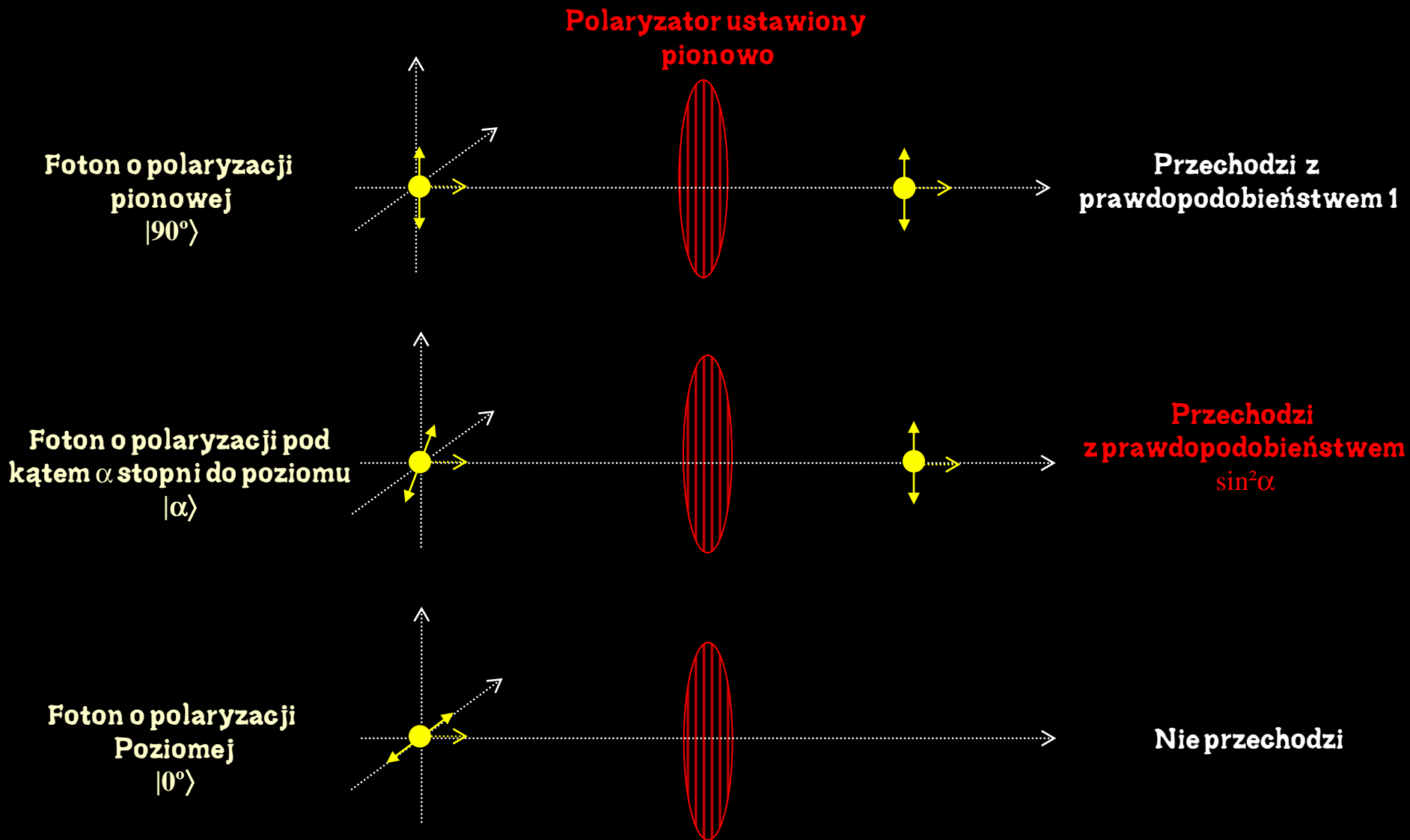
Przechodzi z prawdopodobieństwem $\frac{1}{2}$
Nie da się przewidzieć, czy przejdzie, czy nie

Foton o polaryzacji Poziomej $|0^\circ\rangle$

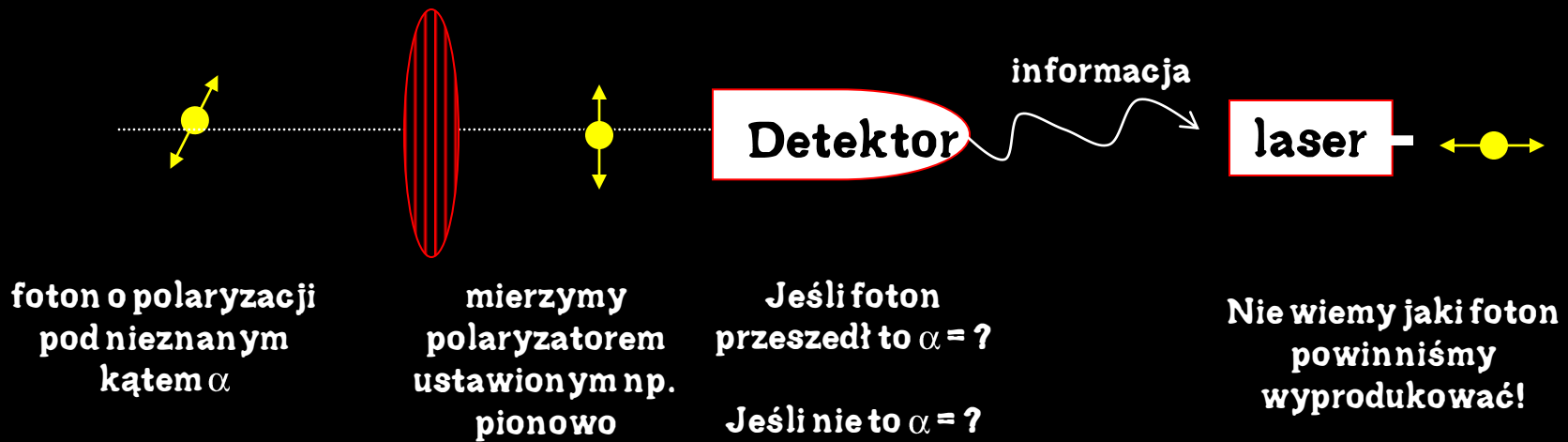
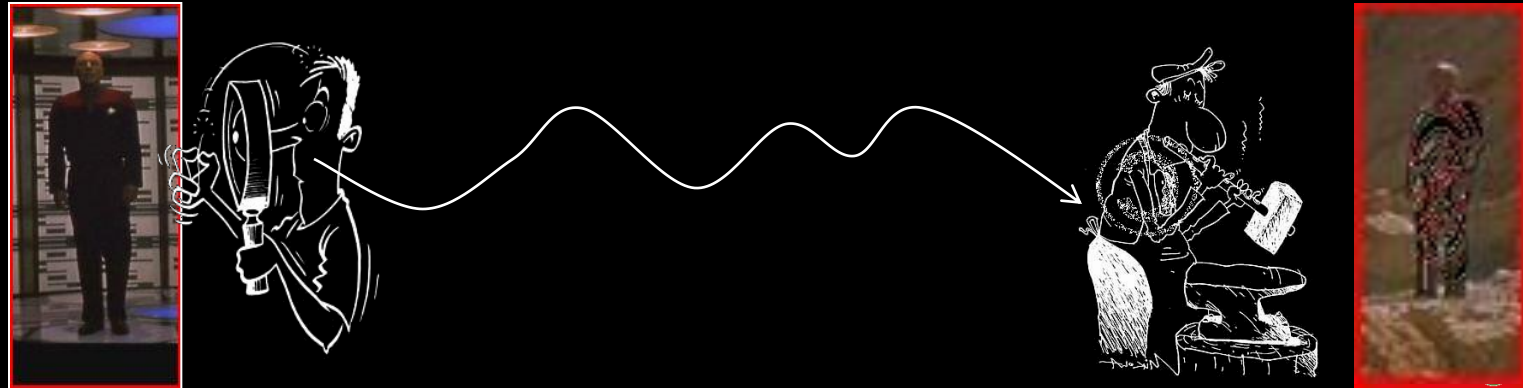


Nie przechodzi

Przechodzenie fotonu przez polaryzator



Spróbujmy zmierzyc stan polaryzacji fotonu...



Czy kwantowy stan da się przeteleportować?

Tak! Ale nie możemy starać się zamienić kwantowej informacji na klasyczną



Musimy teleportację przeprowadzić tak by niczego się nie dowiedzieć o stanie kwantowym

Inaczej zawsze go zaburzymy, a nie dowiemy się wystarczająco dużo, żeby móc go przygotować od nowa

Stany splątane

Wektor opisujący stan pojedynczego fotonu o polaryzacji pod kątem α :

$$|\alpha\rangle = \cos \alpha |\uparrow\rangle + \sin \alpha |\leftrightarrow\rangle$$

kwantowa superpozycja polaryzacji poziomej i pionowej

Stan niesplątany dwóch fotonów

$$|\psi\rangle = |\uparrow\rangle \otimes |\leftrightarrow\rangle$$

foton 1 foton 2

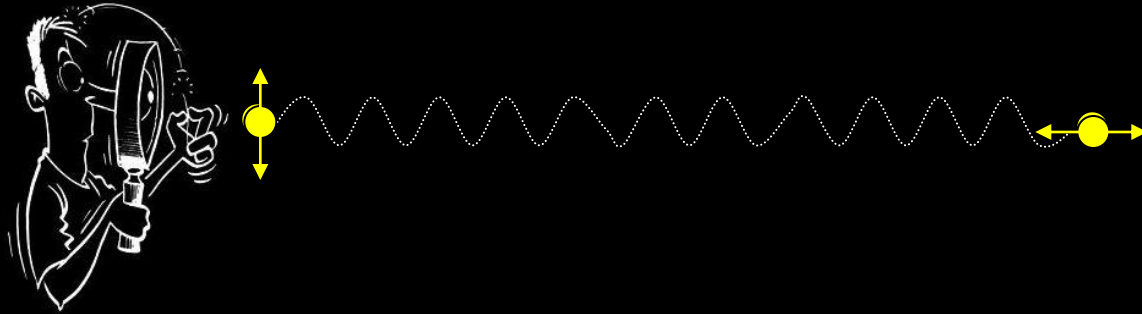
ogólniej: $|\psi\rangle = |\alpha_1\rangle \otimes |\alpha_2\rangle$

Przykładowy stan splątany dwóch fotonów

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle \otimes |\leftrightarrow\rangle + |\leftrightarrow\rangle \otimes |\uparrow\rangle)$$

stany fotonów są bardzo silnie skorelowane

Pomiar polaryzacji jednego fotonu należącego do pary splątanej



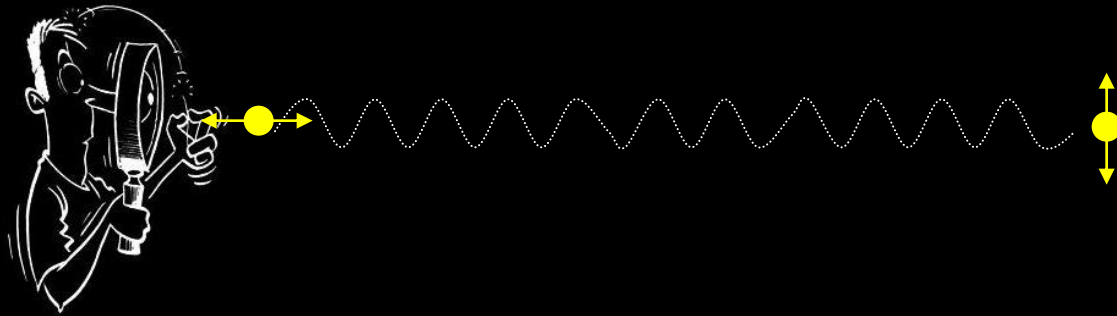
Mierzymy polaryzację fotonu 1

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle \otimes |\leftrightarrow\rangle + |\leftrightarrow\rangle \otimes |\uparrow\rangle)$$

jeśli zmierzymy $|\uparrow\rangle$

$$|\psi\rangle = |\uparrow\rangle \otimes |\leftrightarrow\rangle$$

Pomiar polaryzacji jednego fotonu należącego do pary splątanej



Mierzymy polaryzację fotonu 1

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle \otimes |\leftrightarrow\rangle + |\leftrightarrow\rangle \otimes |\uparrow\rangle)$$

jeśli zmierzymy $|\uparrow\rangle$

$$|\psi\rangle = |\uparrow\rangle \otimes |\leftrightarrow\rangle$$

jeśli zmierzymy $|\leftrightarrow\rangle$

$$|\psi\rangle = |\leftrightarrow\rangle \otimes |\uparrow\rangle$$

Stan fotonu 2 zmienia się w zależności od wyniku pomiaru na fotonie 1!

Wyjątkowo splątany stan splątany

Oto on

$$|\Psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle \otimes |\leftrightarrow\rangle - |\leftrightarrow\rangle \otimes |\uparrow\rangle)$$

Dlaczego wyjątkowy?

$$\begin{aligned} |\Psi_\alpha^-\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|\alpha\rangle \otimes |\alpha + 90^\circ\rangle - |\alpha + 90^\circ\rangle \otimes |\alpha\rangle) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} [(\cos \alpha |\leftrightarrow\rangle + \sin \alpha |\uparrow\rangle) \otimes (-\sin \alpha |\leftrightarrow\rangle + \cos \alpha |\uparrow\rangle) + \\ &\quad - (-\sin \alpha |\leftrightarrow\rangle + \cos \alpha |\uparrow\rangle) \otimes (\cos \alpha |\leftrightarrow\rangle + \sin \alpha |\uparrow\rangle)] = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle \otimes |\leftrightarrow\rangle - |\leftrightarrow\rangle \otimes |\uparrow\rangle) = |\Psi^-\rangle \end{aligned}$$

Jeśli zmierzmy polaryzację $|\alpha\rangle$ dla fotonu 1, to foton 2 znajdzie się w stanie o polaryzacji $|\alpha + 90^\circ\rangle$



Wyjątkowo splątany stan splątany

Oto on

$$|\Psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle \otimes |\leftrightarrow\rangle - |\leftrightarrow\rangle \otimes |\uparrow\rangle)$$

Dlaczego wyjątkowy?

$$\begin{aligned} |\Psi_\alpha^-\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|\alpha\rangle \otimes |\alpha + 90^\circ\rangle - |\alpha + 90^\circ\rangle \otimes |\alpha\rangle) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} [(\cos \alpha |\leftrightarrow\rangle + \sin \alpha |\uparrow\rangle) \otimes (-\sin \alpha |\leftrightarrow\rangle + \cos \alpha |\uparrow\rangle) + \\ &\quad - (-\sin \alpha |\leftrightarrow\rangle + \cos \alpha |\uparrow\rangle) \otimes (\cos \alpha |\leftrightarrow\rangle + \sin \alpha |\uparrow\rangle)] = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle \otimes |\leftrightarrow\rangle - |\leftrightarrow\rangle \otimes |\uparrow\rangle) = |\Psi^-\rangle \end{aligned}$$

Jeśli zmierzmy polaryzację $|\alpha\rangle$ dla fotonu 1, to foton 2 znajdzie się w stanie o polaryzacji $|\alpha + 90^\circ\rangle$



Wyjątkowo splątany stan splątany

Oto on

$$|\Psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle \otimes |\leftrightarrow\rangle - |\leftrightarrow\rangle \otimes |\uparrow\rangle)$$

Dlaczego wyjątkowy?

$$\begin{aligned} |\Psi_\alpha^-\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|\alpha\rangle \otimes |\alpha + 90^\circ\rangle - |\alpha + 90^\circ\rangle \otimes |\alpha\rangle) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} [(\cos \alpha |\leftrightarrow\rangle + \sin \alpha |\uparrow\rangle) \otimes (-\sin \alpha |\leftrightarrow\rangle + \cos \alpha |\uparrow\rangle) + \\ &\quad - (-\sin \alpha |\leftrightarrow\rangle + \cos \alpha |\uparrow\rangle) \otimes (\cos \alpha |\leftrightarrow\rangle + \sin \alpha |\uparrow\rangle)] = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle \otimes |\leftrightarrow\rangle - |\leftrightarrow\rangle \otimes |\uparrow\rangle) = |\Psi^-\rangle \end{aligned}$$

Jeśli zmierzmy polaryzację $|\alpha\rangle$ dla fotonu 1, to foton 2 znajdzie się w stanie o polaryzacji $|\alpha + 90^\circ\rangle$

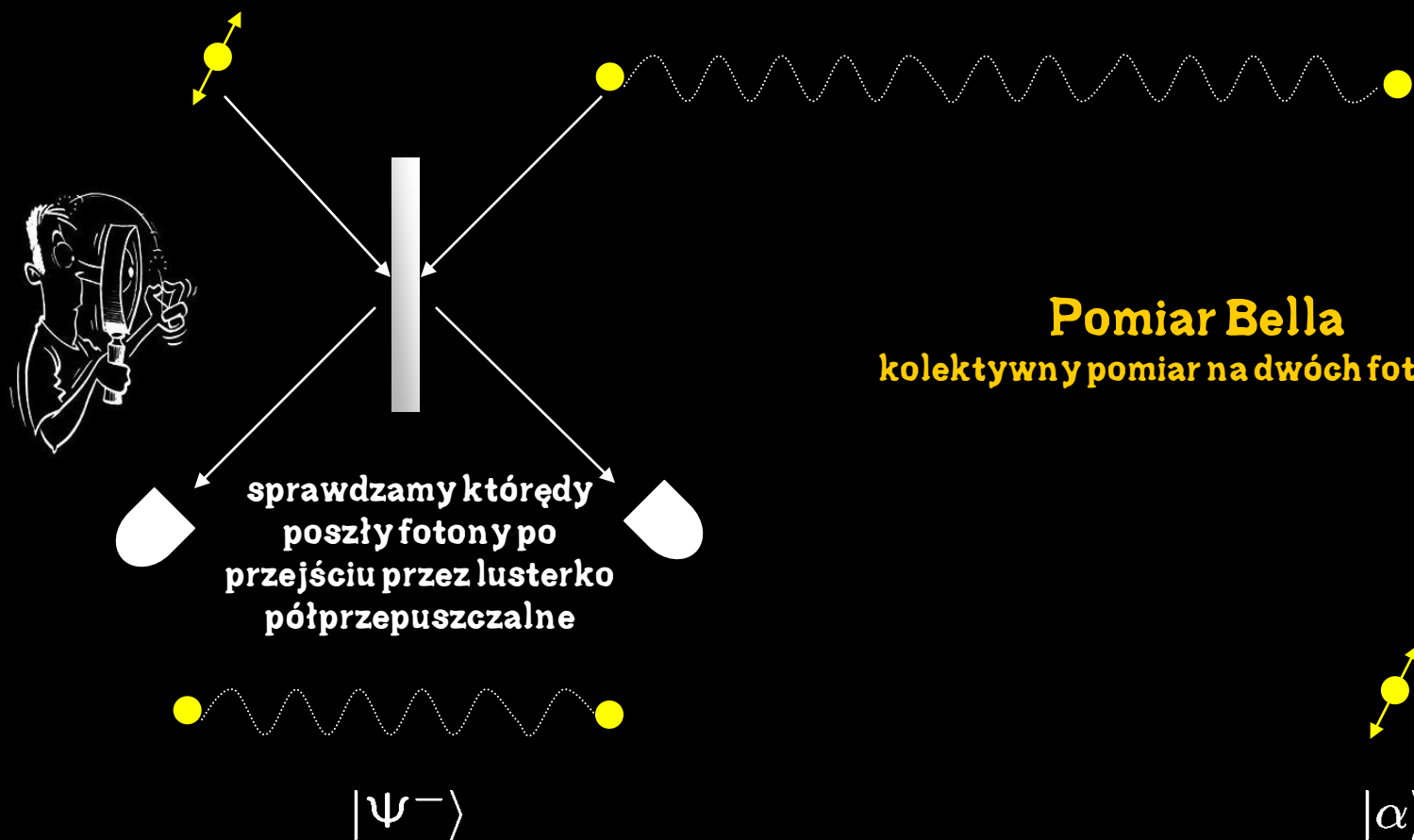


Kwantowa teleportacja

Bennett i inni (1993)

$|\alpha\rangle$

$$|\Psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\downarrow\rangle \otimes |\leftrightarrow\rangle - |\leftrightarrow\rangle \otimes |\uparrow\downarrow\rangle)$$



Kwantowa teleportacja

trochę dokładniej...

$|\alpha\rangle$

$$|\Psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\downarrow\rangle \otimes |\leftrightarrow\rangle - |\leftrightarrow\rangle \otimes |\uparrow\downarrow\rangle)$$



Pomiar Bella

Możemy uzyskać 4 różne stany splątane

$$|\Psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\downarrow\rangle \otimes |\leftrightarrow\rangle - |\leftrightarrow\rangle \otimes |\uparrow\downarrow\rangle)$$

$$|\Psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\downarrow\rangle \otimes |\leftrightarrow\rangle + |\leftrightarrow\rangle \otimes |\uparrow\downarrow\rangle)$$

$$|\Phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\uparrow\rangle \otimes |\leftrightarrow\rangle - |\leftrightarrow\rangle \otimes |\uparrow\uparrow\rangle)$$

$$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\uparrow\rangle \otimes |\leftrightarrow\rangle + |\leftrightarrow\rangle \otimes |\uparrow\uparrow\rangle)$$



Przeteleportowany stan

trzeba przesać
informację co zostało
zmierzone

$|\alpha\rangle$

$|\alpha\rangle$

$|90^\circ - \alpha\rangle$

$|90^\circ + \alpha\rangle$

żeby dokonać
odpowiedniej
transformacji



Kwantowa teleportacja

w skrócie

$|\alpha\rangle$



$|\psi^-\rangle$



Kwantowa teleportacja w skrócie



Pomiar Bella nie daje żadnej informacji o teleportowanym stanie

Przeteleportowaliśmy stan nie wiedząc jaki on jest!!!

Komunikacja ponadświatlna?

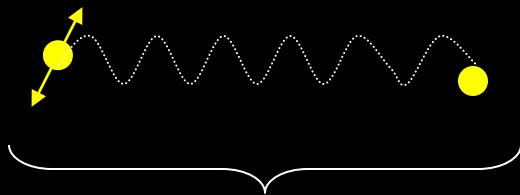
$|\alpha\rangle$

$|\psi^-\rangle$



Pomiar Bella

Komunikacja ponadświatlna?



Pomiar Bella

$|\alpha\rangle$

$|-\alpha\rangle$

$|90^\circ - \alpha\rangle$

$|90^\circ + \alpha\rangle$

W wyniku pomiaru Bella stan odległej cząstki zmienia się natychmiast!

Jednak z uwagi, że nie wiadomo z góry, w którym z czterech stanów się znajdzie, informacji przestać nie można!

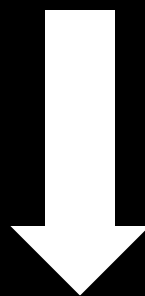
Konieczne jest przesłanie wyniku pomiaru i korekta stanu

Kwantowa teleportacja

Dwa splątane fotony

+

**Przesłanie dwóch bitów
informacji**

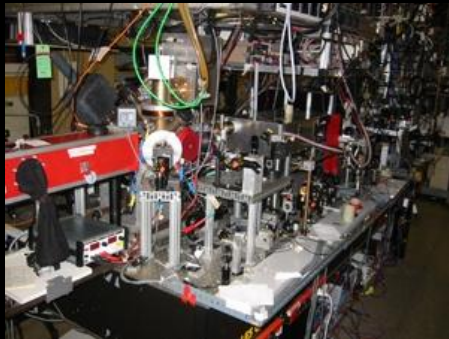
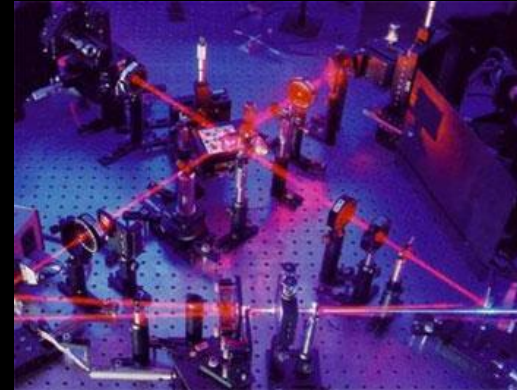


**Teleportacja stanu jednego fotonu
(jednego kwantowego bitu - qubitu)**

Eksperymentalna realizacji

Pierwsza teleportacja stanu fotonu (1997)

A. Zeillinger i inni (Wiedeń)



Pierwsza teleportacja stanu atomu (2004)

R. Blatt i inni (Innsbruck)

Teleportacja stanu fotonu pod Dunajem (600m) (2005)

A. Zeillinger i inni (Wiedeń)

Teleportacja stanu fotonu na stan atomów (2006)

I. Girac i inni (Garsching)

Zastosowanie teleportacji

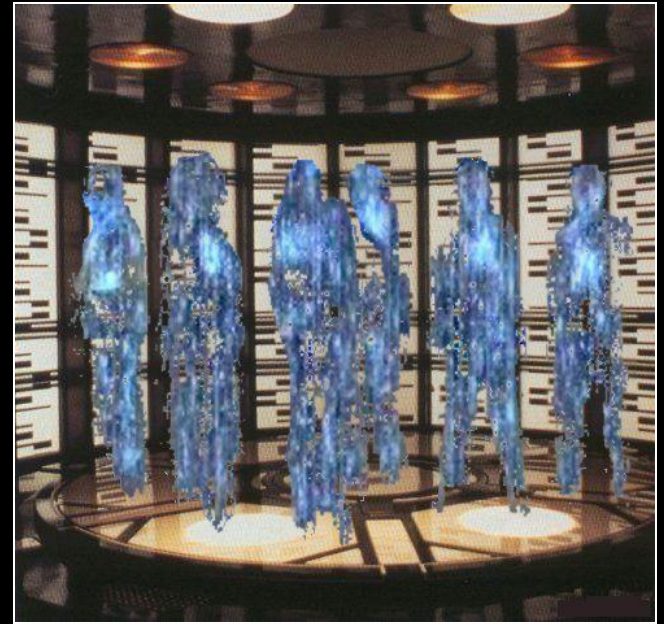
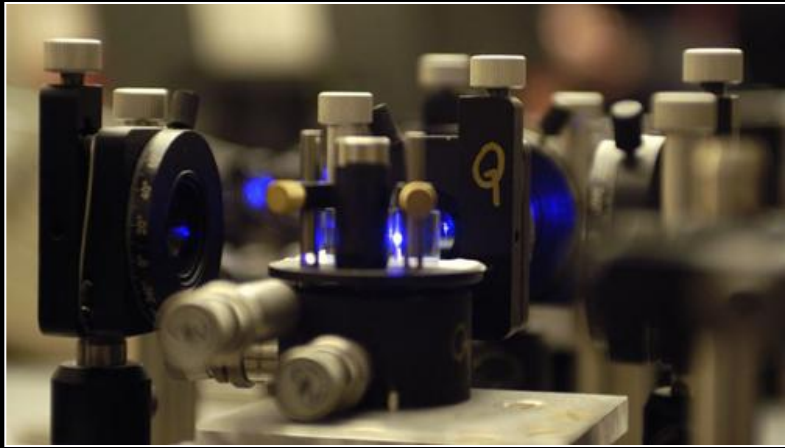
Przesyłanie kwantowej informacji, bez konieczności przesyłania układu kwantowego

Kwantowa kryptografia - do zwiększenia zasięgu przesyłanych stanów kwantowych (Quantum repeaters)

Komputery kwantowe - w sytuacji wysokiego poziomu błędów teleportacja pozwala wykonywać trudne fragmenty obliczeń off-line nie niszcząc danych

Teleportacja

czy mamy już technologię XXII wieku?



Rafał Demkowicz-Dobrzański
Centrum Fizyki Teoretycznej PAN