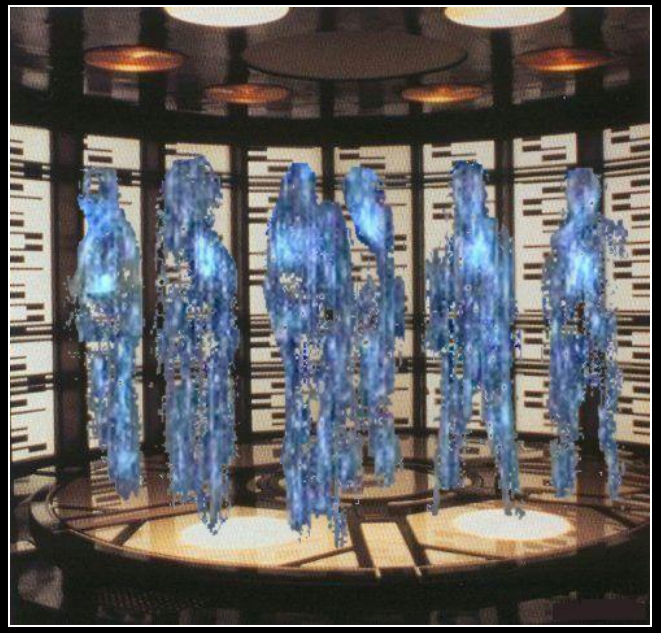
Teleportacja

czy mamy już technologię XXII 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

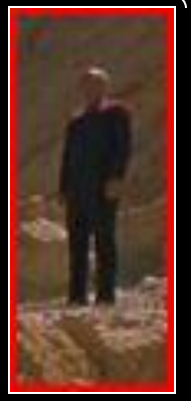
Energize!

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

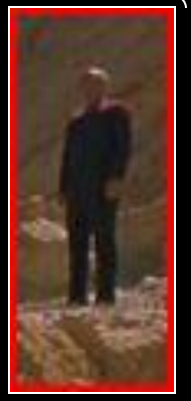
Energize!

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!

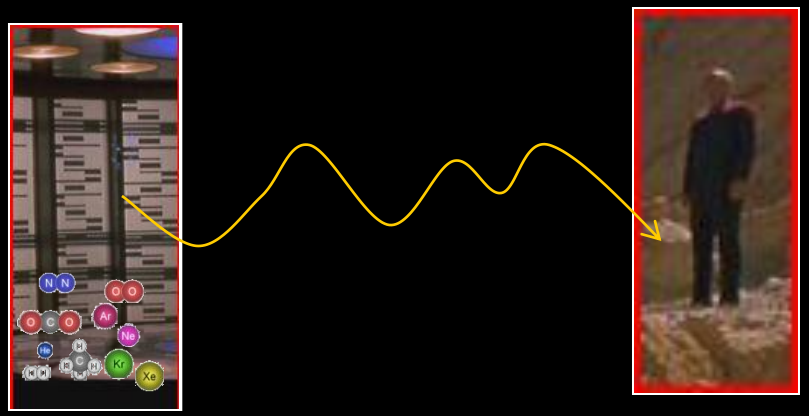
Materia + Antymateria → Fotony

Trzeba użyć również antymaterii....

Teleportacja informacji
(stanów atomów)

Teleportacja materii	Teleportacja informacji
Atomy są fizycznie przeniesione do miejsca docelowego i znajdują się w tym samym stanie co atomy przed teleportacją	Atomy muszą być od poczatku 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

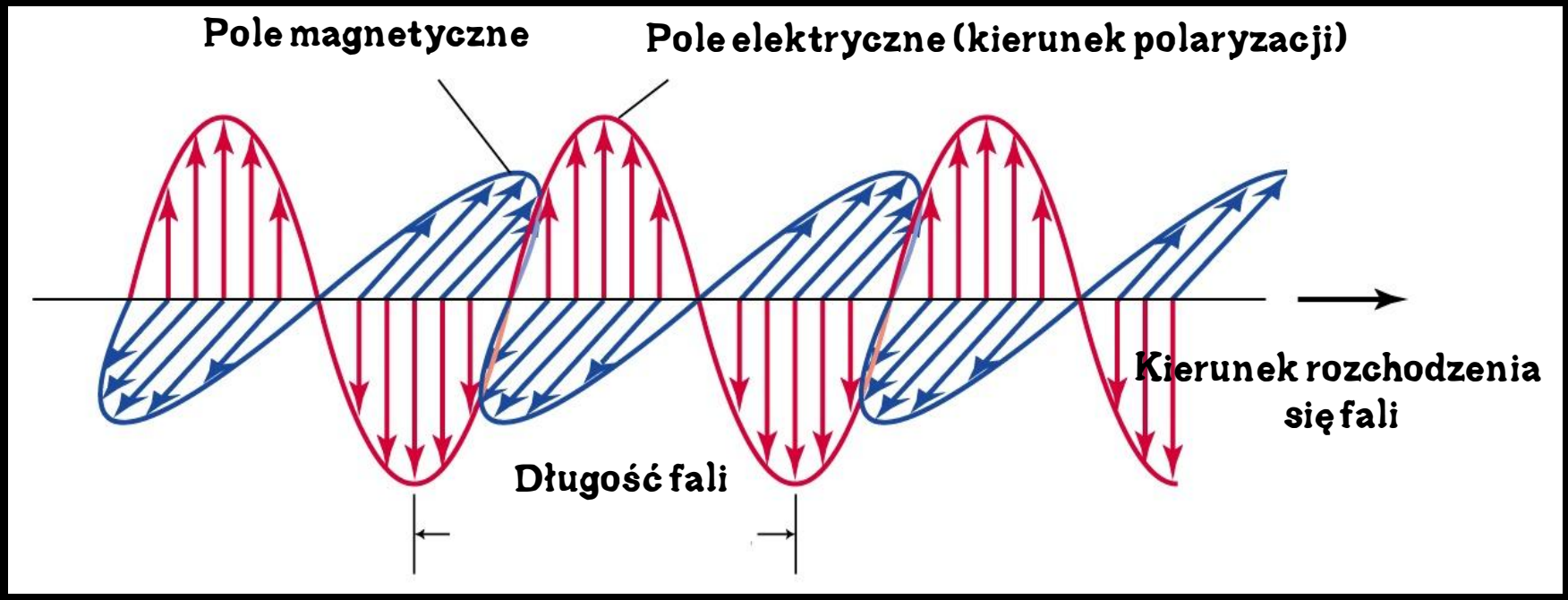
nie da się wiernie odtworzyć stanu atomów, gdyż pomiary nie dały pełnej informacji

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

XIX wiek: Światło jest falą

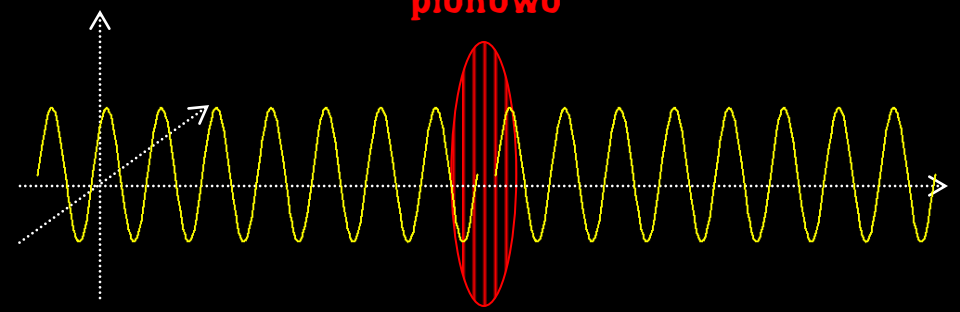
Światło jest falą elektromagnetyczną

Fala elektromagnetyczna o określonej długości fali:



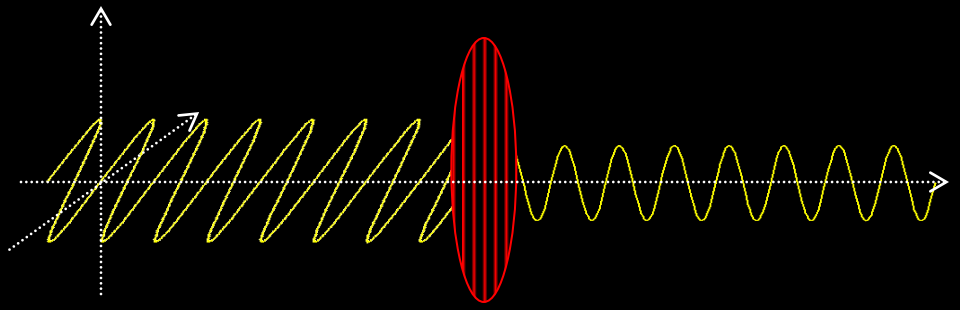
Przechodzenie światła przez polaryzator

Polaryzator ustawiony pionowo



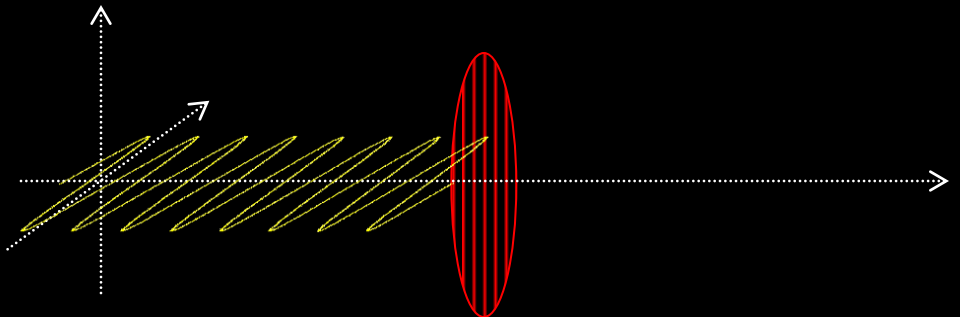
Światło o polaryzacji pionowej

Przechodzi bez osłabienia



Światło o polaryzacji pod kątem 45 stopni do poziomu

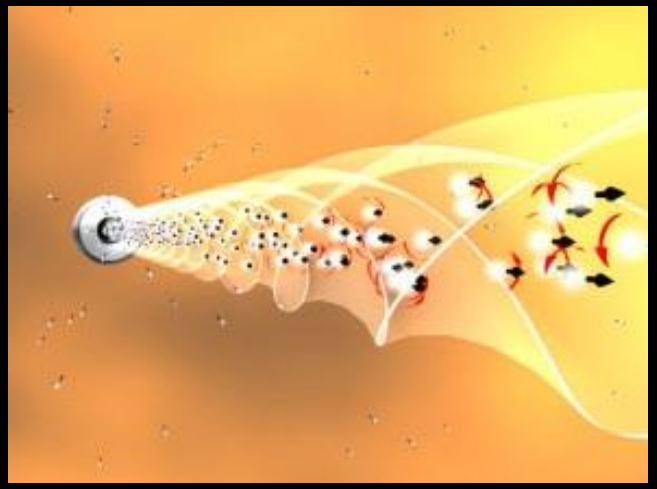
Natężenie światła spada do połowy



Światło o polaryzacji poziomej

Światło całkowicie pochłonięte przez polaryzator

XX wiek: Światło składa się z fotonów

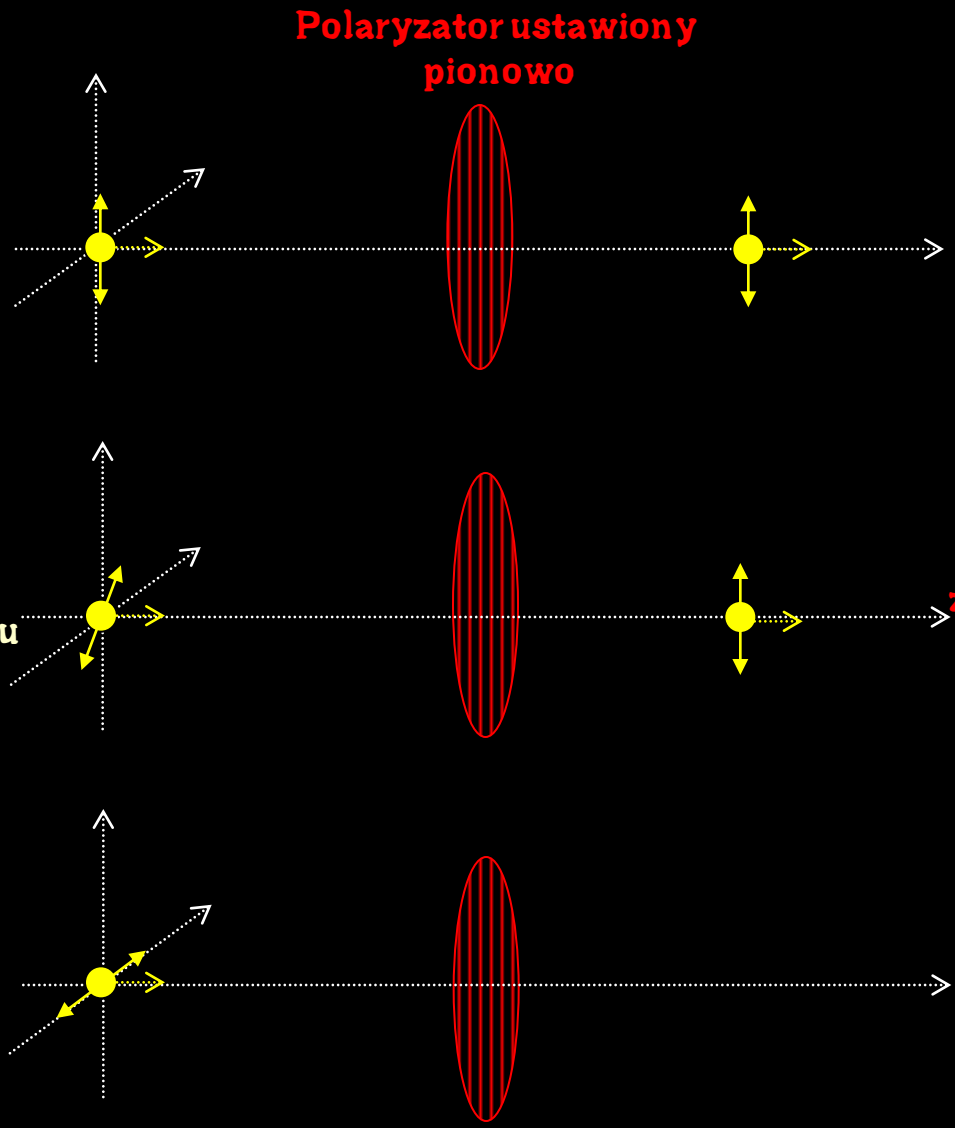


Światło = strumień cząstek zwanych fotonami

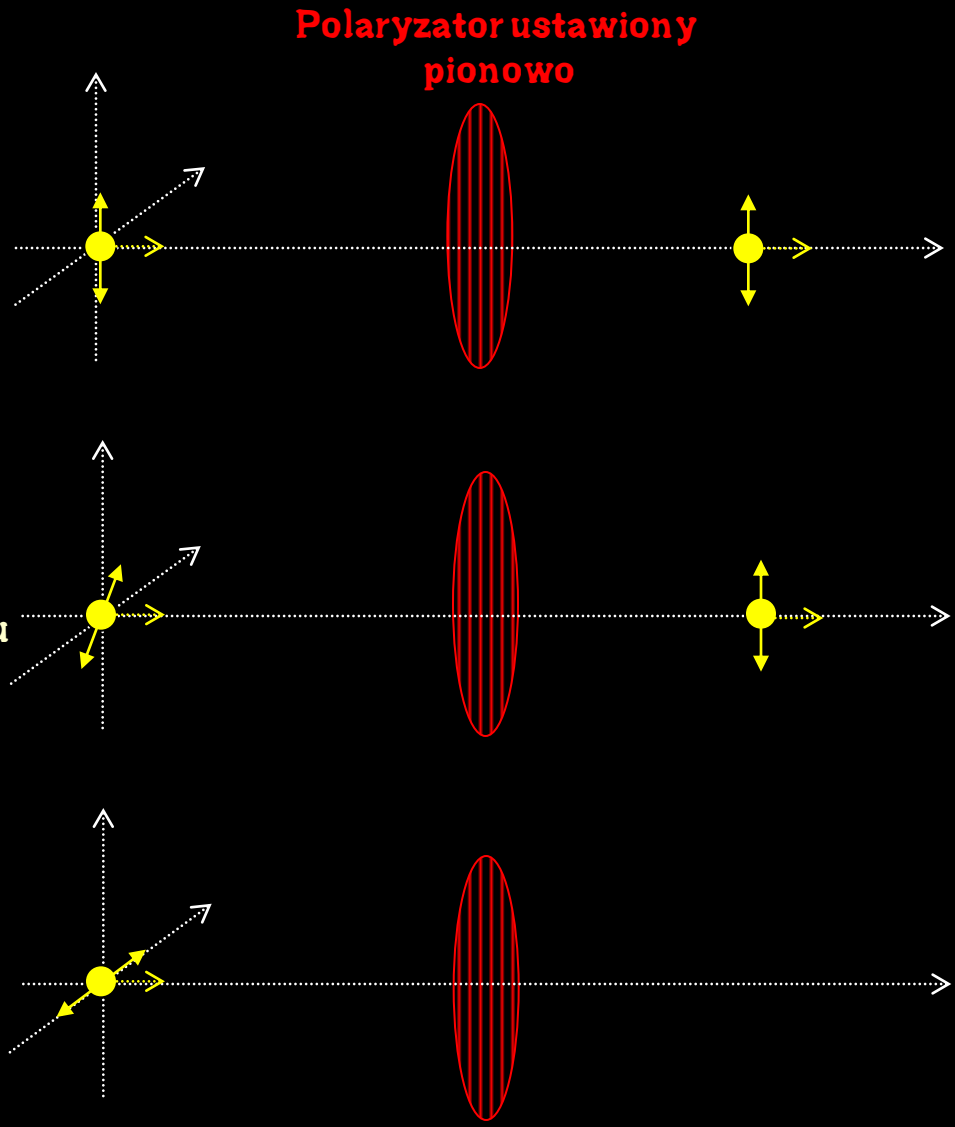
Foton może mieć różne polaryzacje

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

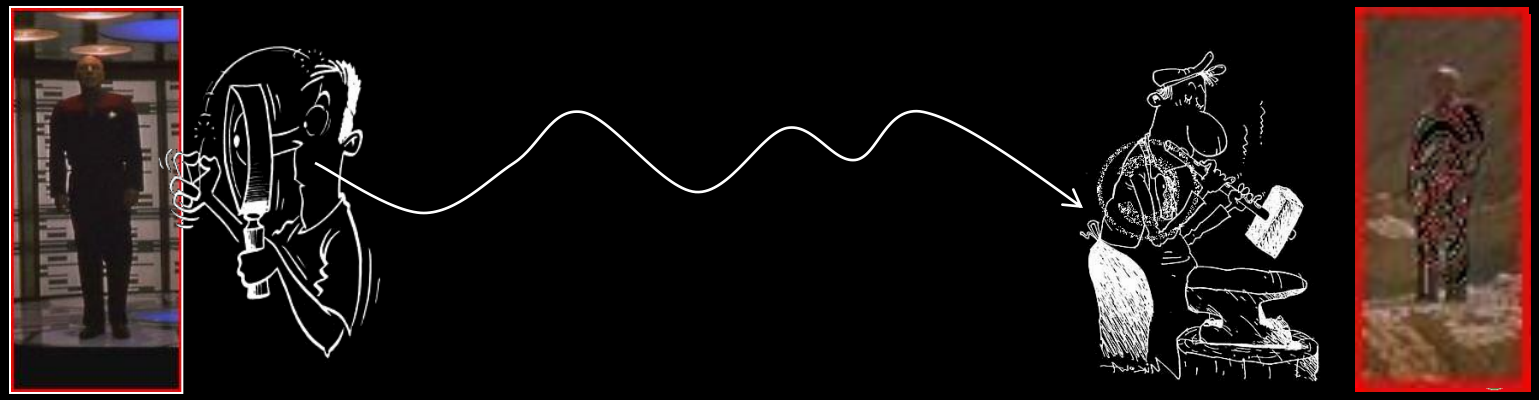
Przechodzenie fotonu przez polaryzator



Przechodzenie fotonu przez polaryzator



Spróbujmy zmierzyc stan polaryzacji fotonu...



foton o polaryzacji pod nieznanym kątem α

mierzymy polaryzatorem ustawionym np. pionowo

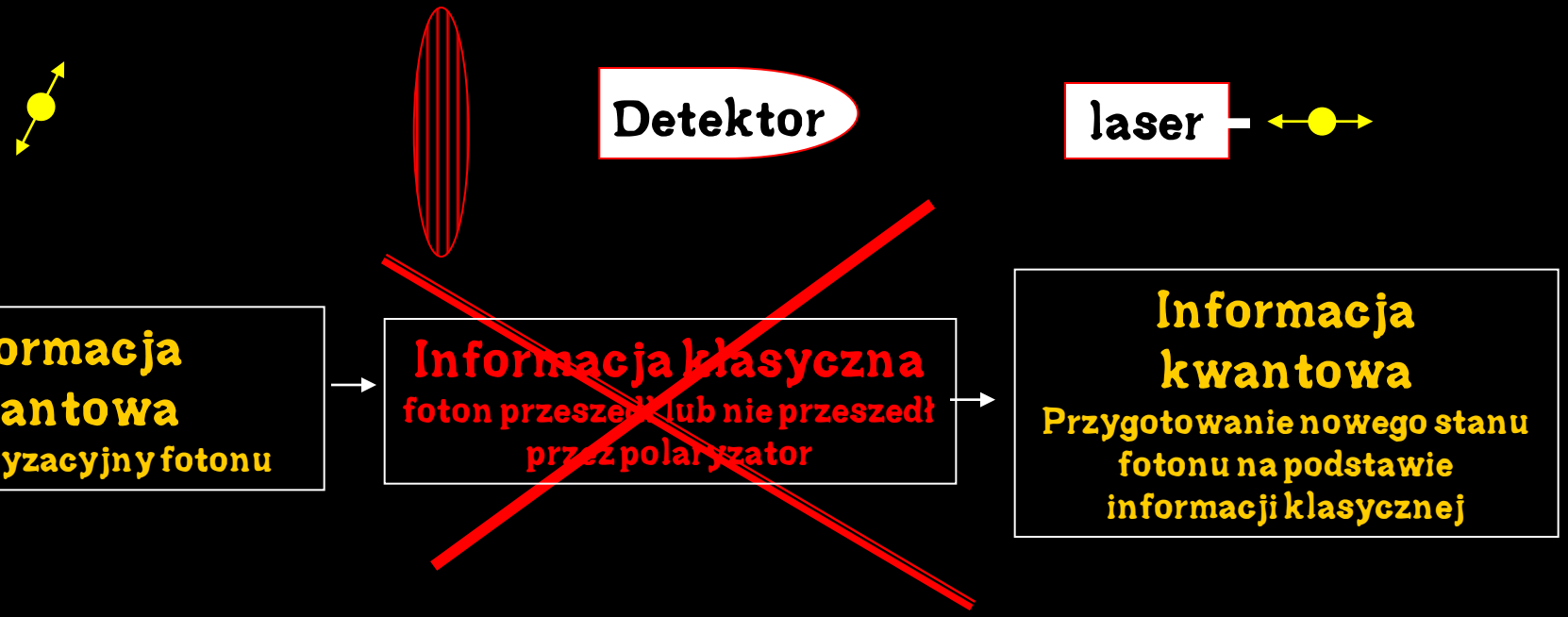
Jeśli foton przeszedł to α = ?

Jeśli nie to α = ?

Nie wiemy jaki foton powinniśmy wyprodukować!

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:

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

kwantowa superpozycja polaryzacji poziomej i pionowej

Stan niesplątany dwóch fotonów

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

foton 1 foton 2

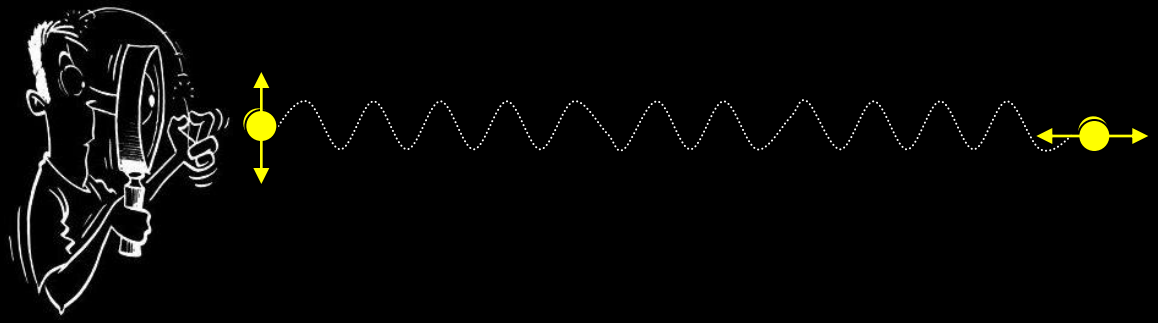
ogólniej: $|\psi\rangle = |\alpha_1\rangle \otimes |\alpha_2\rangle$

Przykładowy stan splątany dwóch fotonów

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

stany fotonów są bardzo silnie skorelowane

Pomiar polaryzacji jednego fotonu należącego do pary splątanej



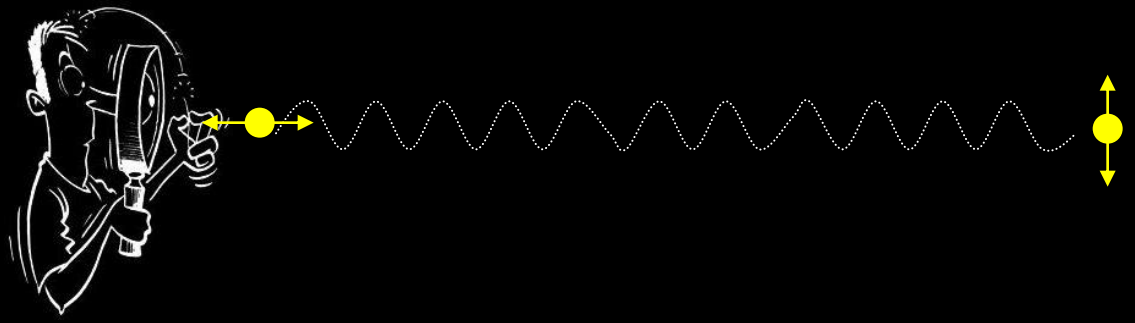
Mierzymy polaryzację fotonu 1

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

jeśli zmierzymy $|\updownarrow\rangle$

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

Pomiar polaryzacji jednego fotonu należącego do pary splątanej



Mierzymy polaryzację fotonu 1

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

jeśli zmierzymy $|\updownarrow\rangle$

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

jeśli zmierzymy $|\leftrightarrow\rangle$

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

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

Wyjątkowo splątany stan splątany

Oto on

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

Dlaczego wyjątkowy?

$$|\Psi^-_\alpha\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\alpha\rangle \otimes |\alpha+90^\circ\rangle - |\alpha+90^\circ\rangle \otimes |\alpha\rangle\right) =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}}[(\cos\alpha|\leftrightarrow\rangle + \sin\alpha|\updownarrow\rangle) \otimes (-\sin\alpha|\leftrightarrow\rangle + \cos\alpha|\updownarrow\rangle) +$$

$$-(-\sin\alpha|\leftrightarrow\rangle + \cos\alpha|\updownarrow\rangle) \otimes (\cos\alpha|\leftrightarrow\rangle + \sin\alpha|\updownarrow\rangle)] =$$

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

Jeśli zmierzymy 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

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

Dlaczego wyjątkowy?

$$|\Psi^-_\alpha\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\alpha\rangle \otimes |\alpha+90^\circ\rangle - |\alpha+90^\circ\rangle \otimes |\alpha\rangle\right) =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}}[(\cos\alpha|\leftrightarrow\rangle + \sin\alpha|\updownarrow\rangle) \otimes (-\sin\alpha|\leftrightarrow\rangle + \cos\alpha|\updownarrow\rangle) +$$

$$-(-\sin\alpha|\leftrightarrow\rangle + \cos\alpha|\updownarrow\rangle) \otimes (\cos\alpha|\leftrightarrow\rangle + \sin\alpha|\updownarrow\rangle)] =$$

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

Jeśli zmierzymy 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

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

Dlaczego wyjątkowy?

$$|\Psi^-_\alpha\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\alpha\rangle \otimes |\alpha+90^\circ\rangle - |\alpha+90^\circ\rangle \otimes |\alpha\rangle\right) =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}}[(\cos\alpha|\leftrightarrow\rangle + \sin\alpha|\updownarrow\rangle) \otimes (-\sin\alpha|\leftrightarrow\rangle + \cos\alpha|\updownarrow\rangle) +$$

$$-(-\sin\alpha|\leftrightarrow\rangle + \cos\alpha|\updownarrow\rangle) \otimes (\cos\alpha|\leftrightarrow\rangle + \sin\alpha|\updownarrow\rangle)] =$$

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

Jeśli zmierzymy 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)

$|\alpha\rangle$

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

Pomiar Bella

kolektywny pomiar na dwóch fotonach

Kwantowa teleportacja

troszkę dokładniej...

$|\alpha\rangle$

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

Pomiar Bella

Możemy uzyskać 4 różne stany splątane

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

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

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

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

trzeba przesłać informację co zostało zmierzone

Przeteleportowany stan

$|\alpha\rangle$

$|-\alpha\rangle$

$|90° - \alpha\rangle$

$|90° + \alpha\rangle$

żeby dokonać odpowiedniej transformacji

Kwantowa teleportacja

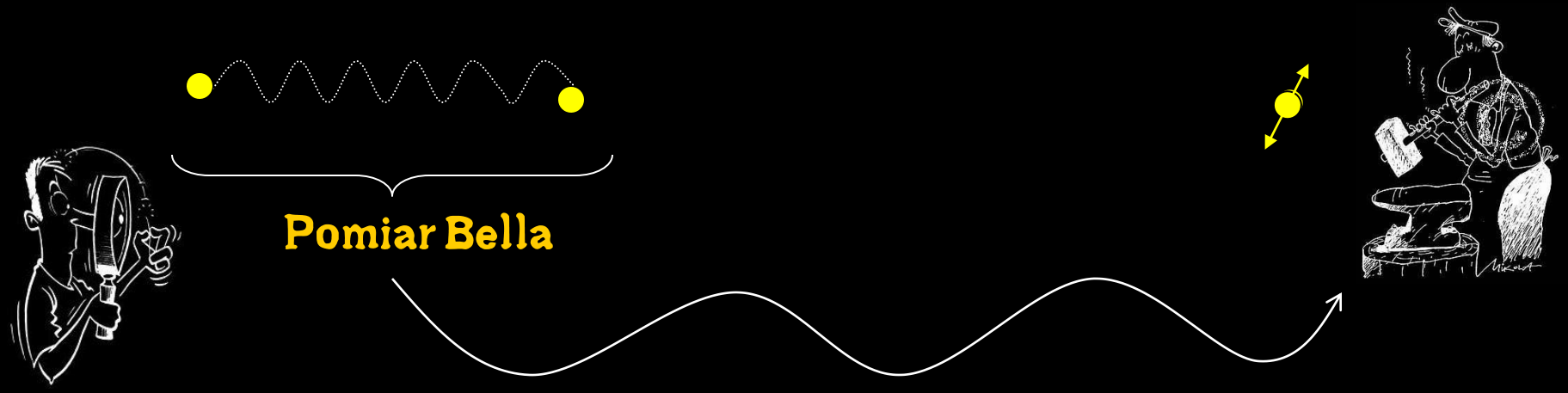
w skrócie

$|\alpha\rangle$ $|\psi^-\rangle$

Kwantowa teleportacja

w skrócie

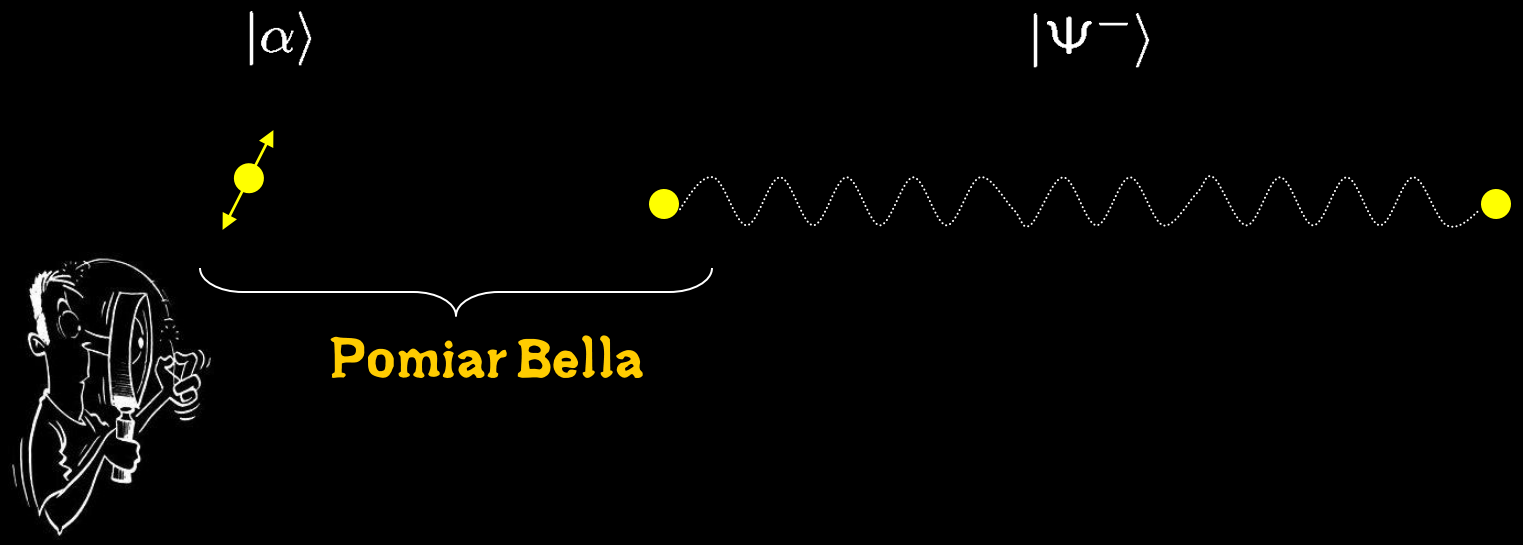
Korekta stanu



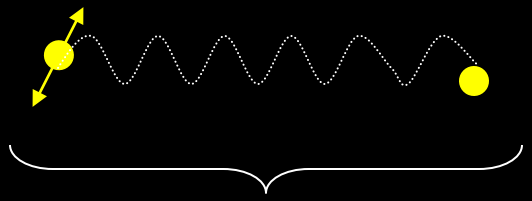
Pomiar Bella nie daje żadnej informacji o teleportowanym stanie

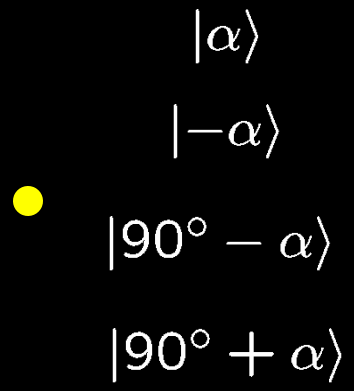
Przeteleportowaliśmy stan nie wiedząc jaki on jest!!!

Komunikacja ponadświetlna?



Komunikacja ponadświetlna?





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 przesłać nie można!

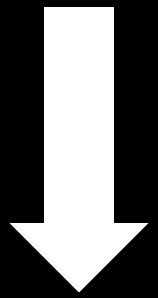
Konieczne jest przesłanie wyniku pomiaru i korekta stanu

Kwantowa teleportacja

Dwa splątane fotony

+

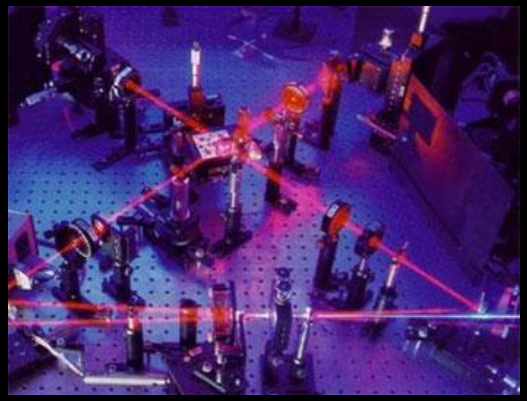
Przesłanie dwóch bitów informacji

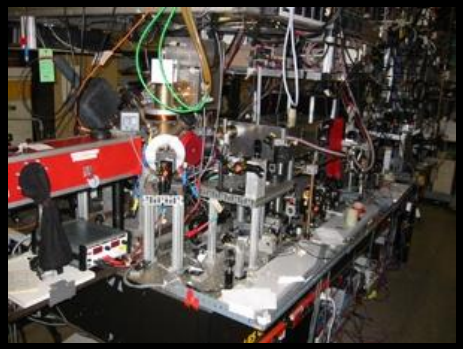


Teleportacja stanu jednego fotonu
(jednego kwantowego bitu - qubitu)

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

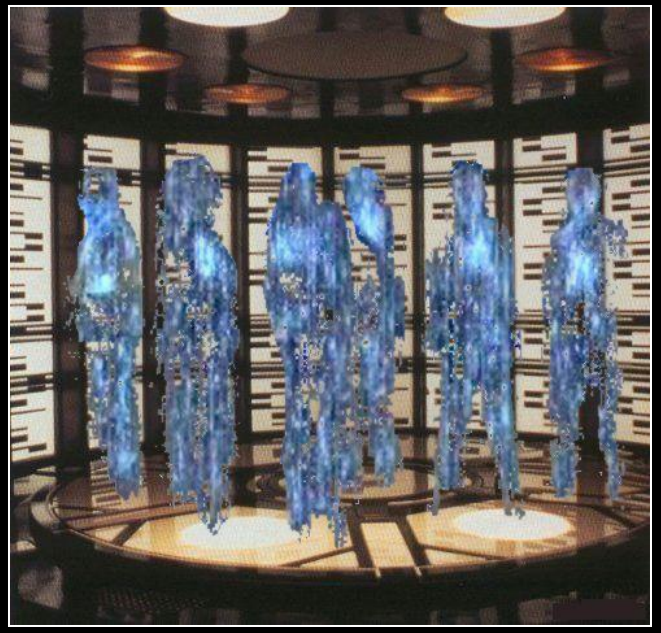
Przesyłanie kwantowej informacji, bez konieczności przesyłania układu kwantowego

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

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

Teleportacja

czy mamy już technologię XXII wieku?



Rafał Demkowicz-Dobrzański
Centrum Fizyki Teoretycznej PAN