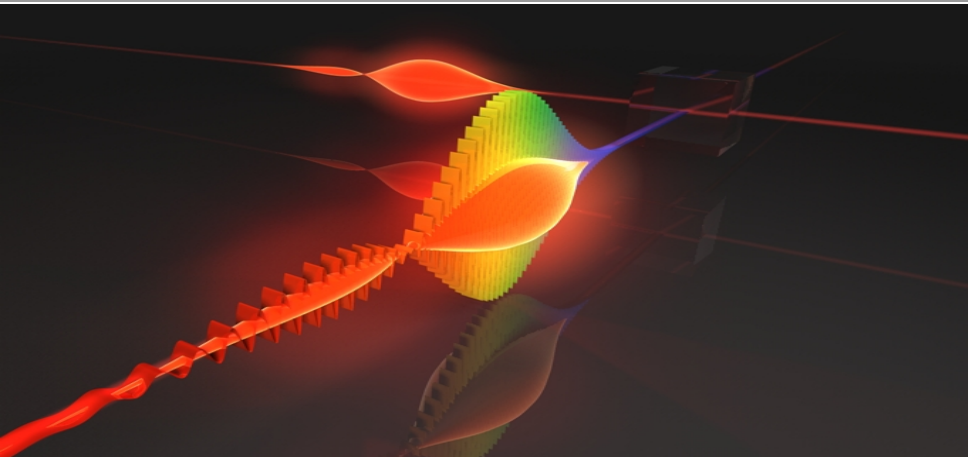


fotony i splątanie

Jacek Matulewski [Karolina Słowik](#) Jarosław Zaremba Jacek Jurkowski

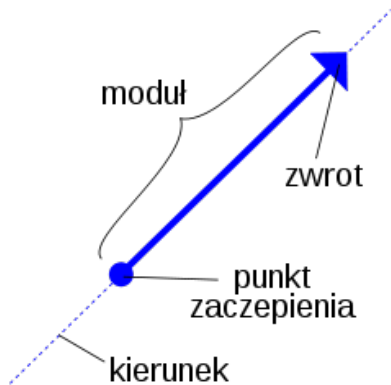
MECHANIKA KWANTOWA DLA NIEFIZYKÓW



- ▶ wektory
- ▶ pojedyncze fotony
- ▶ paradoks EPR

Wielkości wektorowe w fizyce

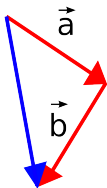
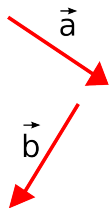
- ▶ punkt zaczepienia
- ▶ kierunek
- ▶ zwrot
- ▶ moduł (długość)



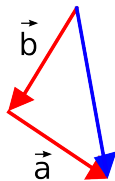
Przykłady wielkości i pól wektorowych

- ▶ siła \mathbf{F} , np. siła grawitacji działająca na studenta
- ▶ prędkość obiektu \mathbf{v}
- ▶ położenie obiektu \mathbf{r}
- ▶ pole elektryczne $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$
- ▶ w filmach mowa o polu siłowym

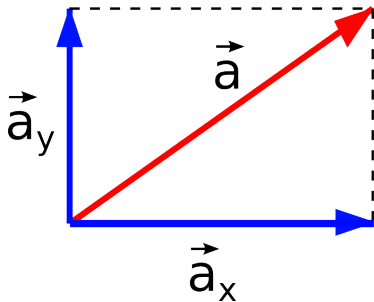
Dodawanie wektorów



$$\vec{a} + \vec{b} = \vec{b} + \vec{a}$$

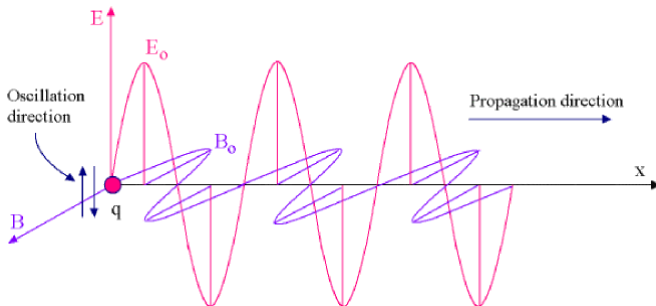


Składowe wektora



$$\mathbf{a} = a_x \mathbf{x} + a_y \mathbf{y}$$

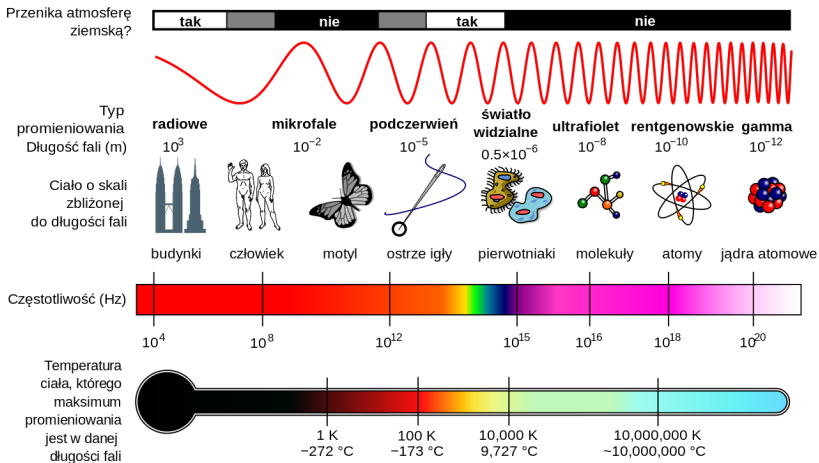
Promieniowanie elektromagnetyczne



pstcc.edu

- ▶ wytwarzane przez przyspieszające ładunki elektryczne
- ▶ kombinacja pól poprzecznych elektrycznego i magnetycznego
- ▶ prędkość propagacji w próżni $c \sim 300\,000\text{ km/s}$
- ▶ ... w ośrodku $\frac{c}{n}$, gdzie n - wsp. załamania

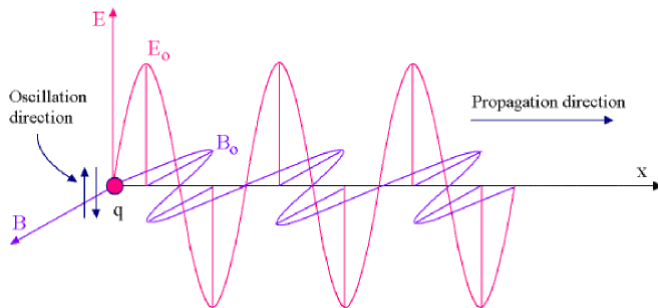
Widmo promieniowania elektromagnetycznego



źródło: wikipedia

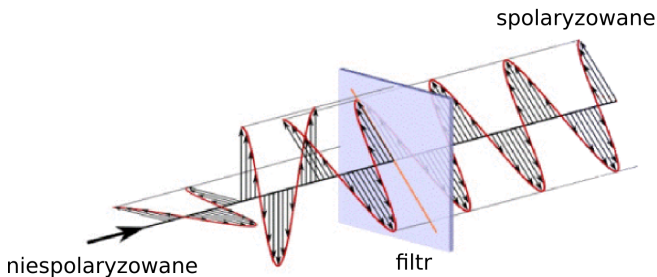
Polaryzacja światła to kierunek drgań pola elektrycznego

Światło spolaryzowane (pionowo)



Polaryzacja światła to kierunek drgań pola elektrycznego

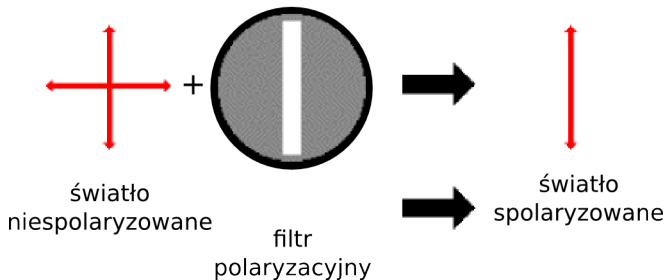
Światło niespolaryzowane można polaryzować



pstcc.edu

Źródła niespolaryzowanego światła: żarówka, Słońce, świeca, ...

Polaryzacja za pomocą filtra

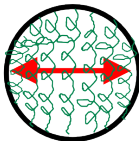


Polaryzacja za pomocą filtra

relacja pomiędzy orientacją molekuł łańcuchowych
a polaryzacją przepuszczonego światła



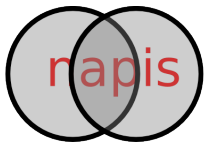
molekuły poziomo
polaryzacja pionowa



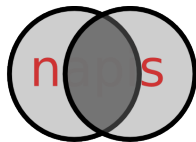
molekuły pionowo
polaryzacja pozioma

Polaryzacja za pomocą filtra

napis



para filtrów
równoległych

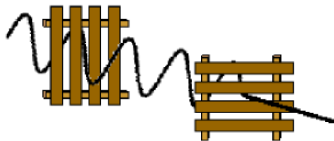


para filtrów
prostopadłych

Polaryzacja za pomocą filtra



sztachety obu płotów równoległe
pionowa składowa wibracji przedostaje się



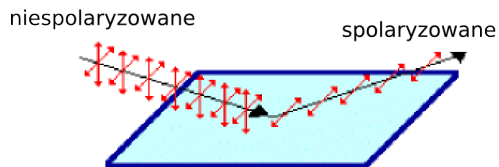
sztachety obu płotów prostopadłe
wibracje zablokowane

Polaryzacja za pomocą filtra



wordpress.com

Polaryzacja przez odbicie



odbicie od niemetalicznej powierzchni
skutkuje częściową polaryzacją światła

Polaryzacja przez odbicie



[gettyimages.com](https://www.gettyimages.com)

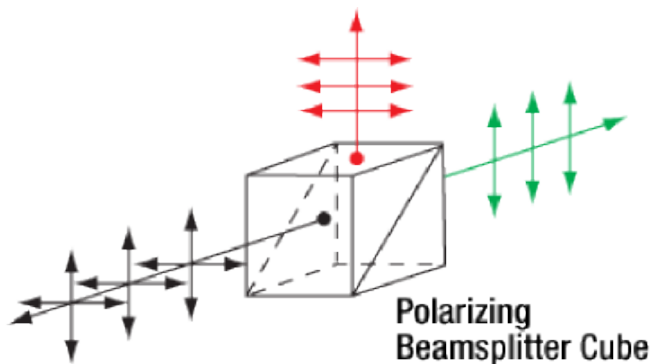
Polaryzacja przez odbicie



[gettyimages.com](https://www.gettyimages.com)



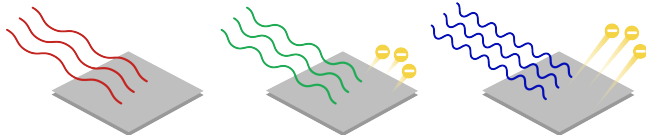
Polaryzacyjny dzielnik wiązki



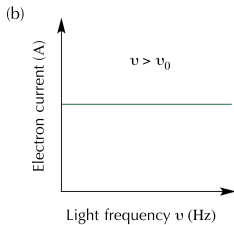
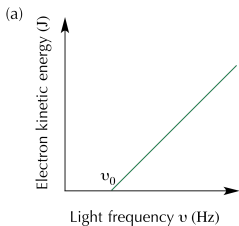
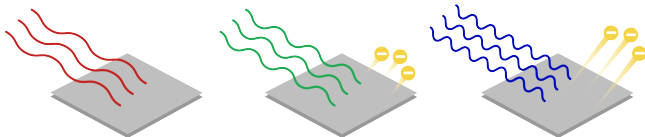
Cząsteczkowa natura światła: fotony

- ▶ doświadczenie Younga
- ▶ widmo promieniowania gwiazd
- ▶ efekt fotoelektryczny

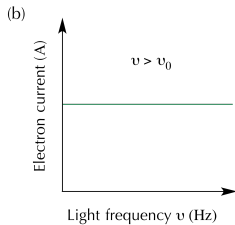
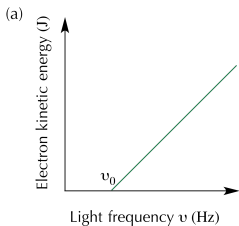
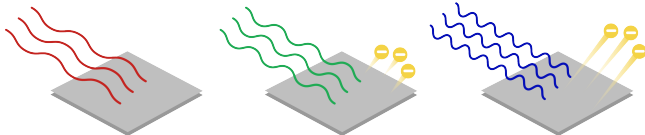
Efekt fotoelektryczny



Efekt fotoelektryczny



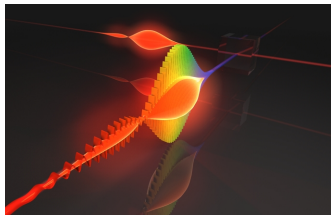
Efekt fotoelektryczny



$$W_{\text{bariera}} + E_{\text{elektron}} = h\nu$$

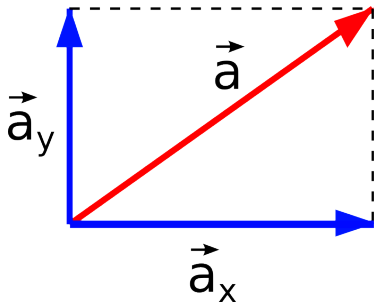
Foton - kwant pola elektromagnetycznego

- ▶ energia fotonu $E = h\nu$
 h - stała Plancka
 ν - częstotliwość fali
- ▶ długość fali fotonu $\lambda = \frac{c}{\nu}$
- ▶ nie ma masy $m = 0$
- ▶ pęd fotonu (wzór de Broglie'a) $p = \frac{h}{\lambda}$



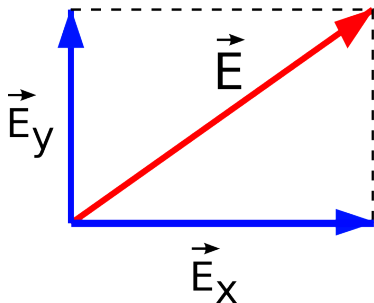
physics.aps.org

Polaryzacja fotonu jako układ dwupoziomowy



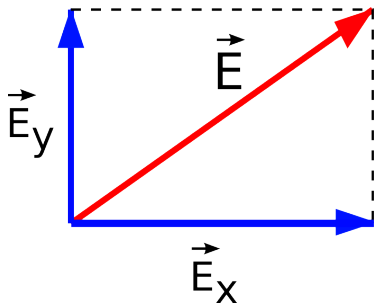
$$\mathbf{A} = A_x \mathbf{x} + A_y \mathbf{y}$$

Polaryzacja fotonu jako układ dwupoziomowy



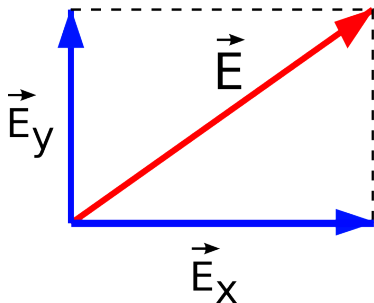
$$\mathbf{E} = E_x \mathbf{x} + E_y \mathbf{y}$$

Polaryzacja fotonu jako układ dwupoziomowy



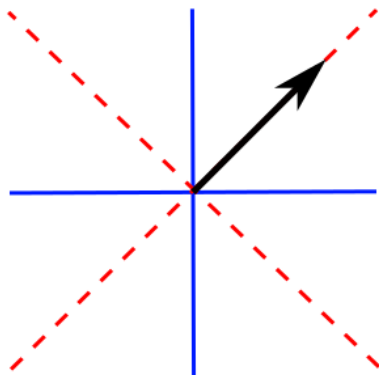
$$|\psi\rangle = E_x|x\rangle + E_y|y\rangle$$

Polaryzacja fotonu jako układ dwupoziomowy



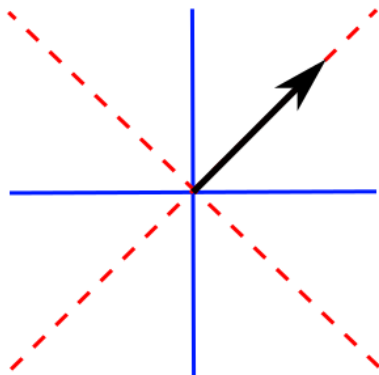
$$|\psi\rangle = E_x |\uparrow\rangle + E_y |\leftrightarrow\rangle$$

Zależnie od bazy, foton jest lub nie jest w superpozycji



$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|\uparrow\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\leftrightarrow\rangle = |/\rangle$$

Zależnie od bazy, foton jest lub nie jest w superpozycji

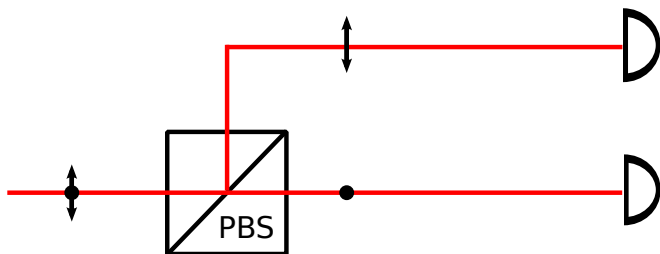


$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|\uparrow\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\leftrightarrow\rangle = |/\rangle$$

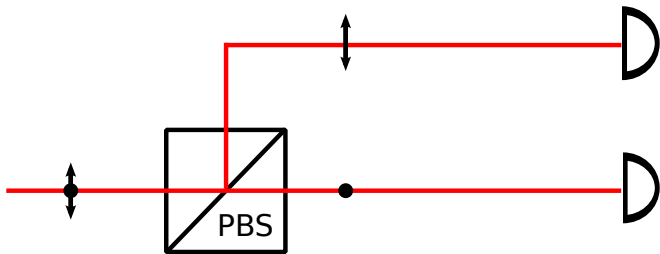
Czy bazy $+i$ i x komutują?

Jak zmierzyć polaryzację fotonu?

Jak zmierzyć polaryzację fotonu?



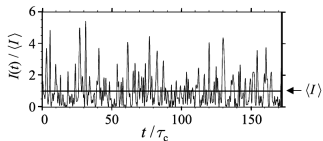
Jak zmierzyć polaryzację fotonu?



PBS można obracać tak by zmierzyć w wybranej bazie.

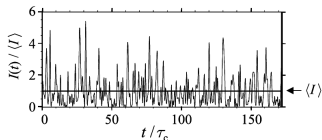
Właściwości statystyczne światła

Klasyczne źródło światła (np. żarówka) ma fluktuujące natężenie



Właściwości statystyczne światła

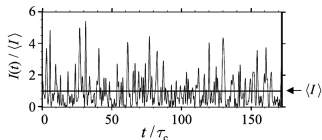
Klasyczne źródło światła (np. żarówka) ma fluktuujące natężenie



Światło lasera ma stałe natężenie.

Właściwości statystyczne światła

Klasyczne źródło światła (np. żarówka) ma fluktuujące natężenie



Światło lasera ma stałe natężenie.

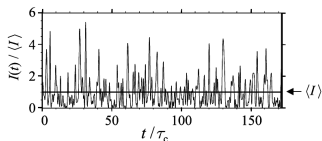
Fluktuacje natężenia charakteryzowane **funkcją korelacji 2. rzędu**

$$g_2(t) = \frac{\langle I(t_0)I(t_0 + t) \rangle}{\langle I(t_0) \rangle \langle I(t_0 + t) \rangle}$$

tu $\langle \cdot \rangle$ - średnia w czasie

Właściwości statystyczne światła

Klasyczne źródło światła (np. żarówka) ma fluktuujące natężenie



Światło lasera ma stałe natężenie.

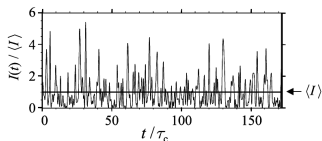
Fluktuacje natężenia charakteryzowane funkcją korelacji 2. rzędu

$$g_2(t) = \frac{\langle I(t_0)I(t_0 + t) \rangle}{\langle I(t_0) \rangle \langle I(t_0 + t) \rangle} \rightarrow g_2(0) = \frac{\langle I(t_0)^2 \rangle}{\langle I(t_0) \rangle^2}$$

tu $\langle \cdot \rangle$ - średnia w czasie

Właściwości statystyczne światła

Klasyczne źródło światła (np. żarówka) ma fluktuujące natężenie



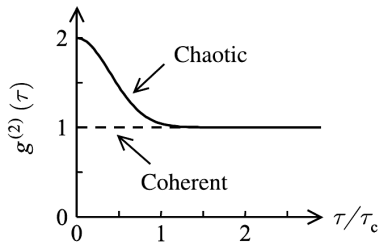
Światło lasera ma stałe natężenie.

Fluktuacje natężenia charakteryzowane **funkcją korelacji 2. rzędu**

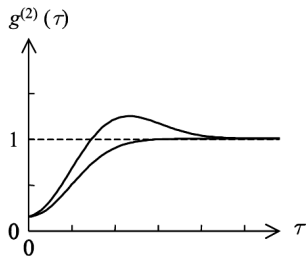
$$g_2(t) = \frac{\langle I(t_0)I(t_0 + t) \rangle}{\langle I(t_0) \rangle \langle I(t_0 + t) \rangle} \rightarrow g_2(0) = \frac{\langle I(t_0)^2 \rangle}{\langle I(t_0) \rangle^2} \geq 1$$

tu $\langle \cdot \rangle$ - średnia w czasie

Funkcja korelacji 2. rzędu dla klasycznego i kwantowego światła



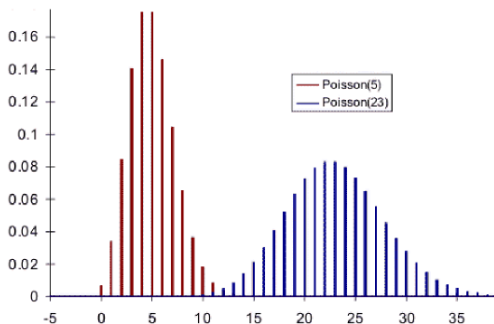
światło klasyczne:
zwykłe źródło (linia ciągła)
i laser (linia przerywana)



światło kwantowe,
zależnie od detali źródła

Światło lasera ma stałe natężenie

Światło lasera ma stałą średnią liczbę fotonów



Prawdopodobieństwo zmierzenia n fotonów dane rozkładem Poissona

$$p(n) = \frac{\lambda^n e^{-\lambda}}{n!}$$

gdzie λ - średnia liczba fotonów

Kwantowe światło jest "lepiej uporządkowane"

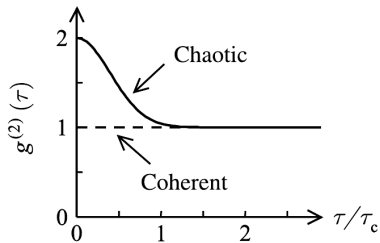
• • • • • • • • • •
Antibunched

• • • • • • • • • •
Coherent (random)

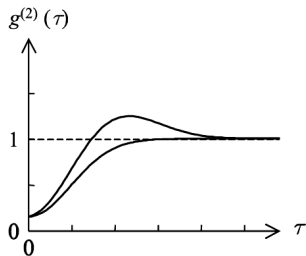
•••• ••• ••••
Bunched

np. dokładnie 1 foton na raz

Funkcja korelacji 2. rzędu dla klasycznego i kwantowego światła



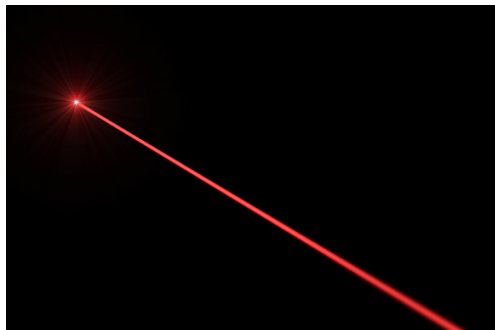
światło klasyczne:
zwykłe źródło (linia ciągła)
i laser (linia przerywana)



światło kwantowe,
zależnie od detali źródła

Skąd się biorą pojedyncze fotony?

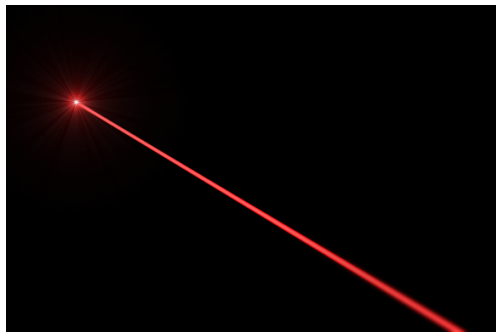
Metoda 1: osłabiony laser



$$|\psi\rangle = |1\rangle?$$

Skąd się biorą pojedyncze fotony?

Metoda 1: osłabiony laser

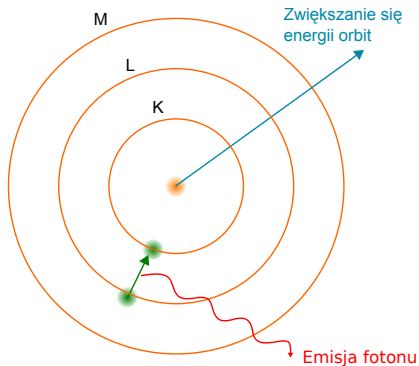


$$|\psi\rangle \approx |0\rangle + p|1\rangle + p^2|2\rangle + \dots$$

p - mała wartość

Skąd się biorą pojedyncze fotony?

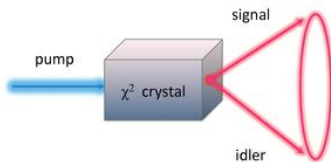
Metoda 2: emisja ze wzbudzonego atomu



- ▶ wzbudzanie impulsowe → emisja "na życzenie"
- ▶ istnieją metody sterowania kierunkiem emisji

Skąd się biorą pojedyncze fotony?

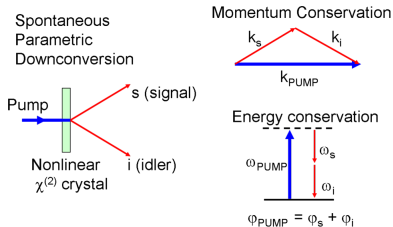
Metoda 3: spontaniczne parametryczne dzielenie częstotliwości (SPDC)



źródło: wikipedia

Skąd się biorą pojedyncze fotony?

Metoda 3: spontaniczne parametryczne dzielenie częstotliwości (SPDC)

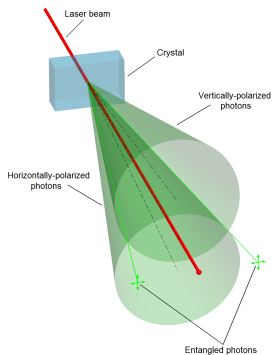


źródło: wikipedia

SPDC produkuje pary fotonów: heraldowane źródła

Detekcja jednego z fotonów oznacza,
że w drugiej wiązce z pewnością jest foton.

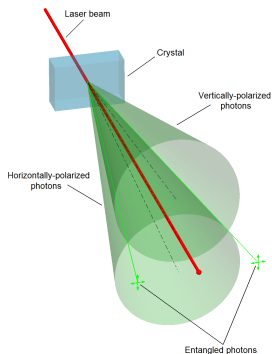
SPDC produkuje pary fotonów: splątanie



źródło: wikipedia

$$|\psi\rangle = \dots$$

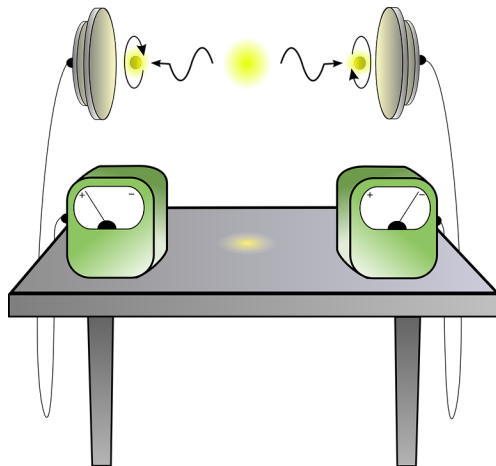
SPDC produkuje pary fotonów: splątanie



źródło: wikipedia

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|\uparrow\leftrightarrow\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\leftrightarrow\downarrow\rangle$$

Paradoks EPR: Einstein Podolsky Rosen (1935)



Paradoks EPR: Einstein Podolsky Rosen (1935)

- ▶ splątane fotony wysyłamy do odległych laboratoriów

Paradoks EPR: Einstein Podolsky Rosen (1935)

- ▶ splątane fotony wysyłamy do odległych laboratoriów
- ▶ szefowie laboratoriów nazywają się Alicja i Bob

Paradoks EPR: Einstein Podolsky Rosen (1935)

- ▶ splątane fotony wysyłamy do odległych laboratoriów
- ▶ szefowie laboratoriów nazywają się Alicja i Bob
- ▶ pomiar polaryzacji fotonu w laboratorium A determinuje stan polaryzacji fotonu w laboratorium B (mimo że jej nie mierzymy)

Nadświatlny przekaz informacji?

Paradoks EPR: Einstein Podolsky Rosen (1935)

- ▶ splątane fotony wysyłamy do odległych laboratoriów
- ▶ szefowie laboratoriów nazywają się Alicja i Bob
- ▶ pomiar polaryzacji fotonu w laboratorium A determinuje stan polaryzacji fotonu w laboratorium B (mimo że jej nie mierzymy)

Nadświatlny przekaz informacji?

- ▶ wyjaśnienia:
 - ▶ albo *spooky action at a distance* (nielokalność teorii kwantowej)

Paradoks EPR: Einstein Podolsky Rosen (1935)

- ▶ splątane fotony wysyłamy do odległych laboratoriów
- ▶ szefowie laboratoriów nazywają się Alicja i Bob
- ▶ pomiar polaryzacji fotonu w laboratorium A determinuje stan polaryzacji fotonu w laboratorium B (mimo że jej nie mierzymy)

Nadświatlny przekaz informacji?

- ▶ wyjaśnienia:
 - ▶ albo *spooky action at a distance* (nielokalność teorii kwantowej)
 - ▶ albo ukryte zmienne decydujące o wyniku pomiarów → f.falowa nie niesie pełnej informacji o układzie
- lokalny realizm

Paradoks EPR: Einstein Podolsky Rosen (1935)

- ▶ $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|+-\rangle + |-+\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} (|/\rangle + |\backslash\rangle)$
- ▶ Alicja mierzy losowo w jednej z dwóch baz $+$ i x
 - ▶ A mierzy w bazie $+$ \rightarrow stan fotonu B określony w bazie $+$
 - ▶ A mierzy w bazie x \rightarrow stan fotonu B określony w bazie x
- ▶ wyjaśnienia
 - ▶ albo lokalny realizm: stan określony w obu bazach (co przeczy nieoznaczoności)
 - ▶ albo nielokalność

Teoria kwantowa jest nielokalna

Twierdzenie Bella

Lokalna teoria ukrytych zmiennych nie może odtworzyć wszystkich przewidywań mechaniki kwantowej.

ozn. że te teorie dają rozbieżność w przewidywaniach wyniku pewnego eksperymentu.

Nierówności Bella

- ▶ A i B wykonują pomiary na serii splątanych par fotonów.
- ▶ Mierzą losowo polaryzację w bazach $+$ i x .
- ▶ Otrzymują wyniki 0 i 1 w tych bazach, gdzie

$$\begin{aligned} | \rangle &= 0, & | - \rangle &= 1 \\ | \setminus \rangle &= 0, & | / \rangle &= 1 \end{aligned}$$

- ▶ A i B badają statystykę wyników.

Nierówności Bella

- ▶ A i B badają statystykę wyników:
 N_{10} - liczba wyników 1 w laboratorium A i 0 w lab. B, itd.

Nierówności Bella

- ▶ A i B badają statystykę wyników:
 N_{10} - liczba wyników 1 w laboratorium A i 0 w lab. B, itd.
- ▶ definiujemy funkcje korelacji (nic wspólnego z $g_2(t)$)

$$C(+, x) = \frac{N_{11} + N_{00} - N_{10} - N_{01}}{N_{11} + N_{00} + N_{10} + N_{01}}$$

oznacza że Alicja mierzy w bazie +, a Bob w bazie x, itd.

Nierówności Bella

- ▶ A i B badają statystykę wyników:
 N_{10} - liczba wyników 1 w laboratorium A i 0 w lab. B, itd.
- ▶ definiujemy funkcje korelacji (nic wspólnego z $g_2(t)$)

$$C(+, x) = \frac{N_{11} + N_{00} - N_{10} - N_{01}}{N_{11} + N_{00} + N_{10} + N_{01}}$$

oznacza że Alicja mierzy w bazie +, a Bob w bazie x, itd.

- ▶ lokalna teoria ukrytych zmiennych daje ograniczenie:

$$C(+, +) + C(+, x) + C(x, +) - C(x, x) \leq 2$$

- ▶ podczas gdy doświadczenie daje:

$$C(+, +) + C(+, x) + C(x, +) - C(x, x) = 2\sqrt{2}$$

Nierówności Bella

- ▶ A i B badają statystykę wyników:
 N_{10} - liczba wyników 1 w laboratorium A i 0 w lab. B, itd.
- ▶ definiujemy funkcje korelacji (nic wspólnego z $g_2(t)$)

$$C(+, x) = \frac{N_{11} + N_{00} - N_{10} - N_{01}}{N_{11} + N_{00} + N_{10} + N_{01}}$$

oznacza że Alicja mierzy w bazie +, a Bob w bazie x, itd.

- ▶ lokalna teoria ukrytych zmiennych daje ograniczenie:

$$C(+, +) + C(+, x) + C(x, +) - C(x, x) \leq 2$$

- ▶ podczas gdy doświadczenie daje:

$$C(+, +) + C(+, x) + C(x, +) - C(x, x) = 2\sqrt{2}$$

Doświadczenie potwierdza nielokalną teorię kwantową.

Twierdzenie o nieklonowaniu

Jak sklonować stan kwantowy?

klonowanie - stworzenie kopii układu kwantowego opisanego idenstycznym stanem jak oryginał

Twierdzenie o nieklonowaniu

Strategia:

- ▶ wziąć znany stan
- ▶ przygotować identyczny



Twierdzenie o nieklonowaniu

Strategia:

- ▶ zmierzyć nieznaną stan
- ▶ przygotować identyczny



Twierdzenie o nieklonowaniu

Strategia:

- ▶ zmierzyć nieznaną stan
- ▶ przygotować identyczny

Przykład!



Twierdzenie o nieklonowaniu

Strategia:

- ▶ zmierzyć nieznaną stan
- ▶ przygotować identyczny

Ale:

- ▶ pomiar zmienia stan
- ▶ żeby go zmierzyć trzeba próbki statystycznej (dużo kopii układu)



Twierdzenie o nieklonowaniu

Strategia:

- ▶ zmierzyć nieznaną stan
- ▶ przygotować identyczny

Ale:

- ▶ pomiar zmienia stan
- ▶ żeby go zmierzyć trzeba próbki statystycznej (dużo kopii układu)



Nie można sklonować nieznanego stanu kwantowego, który mamy w pojedynczym egzemplarzu.

Twierdzenie o nieklonowaniu

Strategia:

- ▶ zmierzyć nieznaną stan
- ▶ przygotować identyczny

Ale:

- ▶ pomiar zmienia stan
- ▶ żeby go zmierzyć trzeba próbki statystycznej (dużo kopii układu)



Nie można sklonować nieznanego stanu kwantowego,
który mamy w pojedynczym egzemplarzu.

Żeby sklonować kwantową owcę, potrzeba "1000" oryginałów.

- ▶ Foton to kwant promieniowania elektromagnetycznego.
- ▶ Właściwości fotonu to: energia, polaryzacja, statystyka.
- ▶ Stany jednofotonowe mają specjalne znaczenie do doświadczeń kwantowo optycznych.
- ▶ Doświadczenie EPR i nierówności Bella: doświadczenie wyklucza możliwość istnienia ukrytych zmiennych.
- ▶ Nie można sklonować nieznanego stanu kwantowego.