

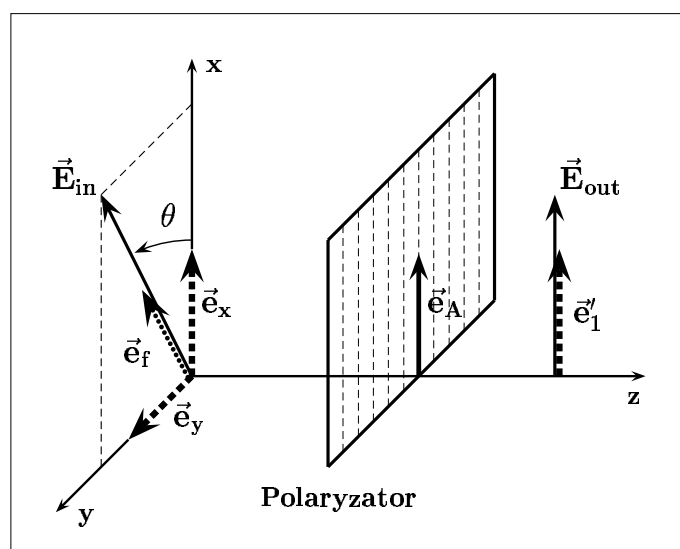
Rozdział 22

(U.1) Cząstki i fale

22.1 Doświadczenia z polaryzacją fotonu

22.1.1 Przypomnienie

W rozdziale 1 omawialiśmy korpuskularną interpretację doświadczenia z polaryzacją fotonu. Wracamy do tego zagadnienia nieco zmieniając notację, co ilustruje poniższy rysunek. Przypominamy,



Rys. 22.1: Schemat doświadczenia polaryzacyjnego.

że sytuacja doświadczalna jest następująca: z lewej strony (wzdłuż osi z) na polaryzator padają pojedyncze fotony o polaryzacji

$$\vec{e}_f = \vec{e}_x \cos \theta + \vec{e}_y \sin \theta, \quad (22.1)$$

przy czym kąt θ jaki tworzy wektor polaryzacji fotonu z osią x może być dowolny. Jest to parametr doświadczenia, który możemy kontrolować. Innymi słowy, sterując kątem θ możemy przygotować fotony o dowolnej polaryzacji danej w (22.1). Fotony te padają na polaryzator o kierunku przepuszczania $\vec{e}_A = \vec{e}_x$.

Na podstawie dyskusji z rozdziału 1 wiemy, że

- Prawdopodobieństwo przejścia fotonu przez polaryzator wynosi

$$P_A = |\vec{e}_f \cdot \vec{e}_A|^2 = |(\vec{e}_x \cos \theta + \vec{e}_y \sin \theta) \cdot \vec{e}_x|^2 = \cos^2 \theta. \quad (22.2)$$

W zasadzie znak modułu jest tu niepotrzebny. Pozostawimy go, bowiem niczego on nie zmienia.

- Po przejściu fotonu przez polaryzator następuje redukcja stanu jego polaryzacji: staje się ona zgodna z kierunkiem \vec{e}_A – kierunkiem polaryzatora

$$\vec{e}_f \xrightarrow{\text{przejście}} \vec{e}'_f = \vec{e}_A. \quad (22.3)$$

W naszym przypadku mamy $\vec{e}'_f = \vec{e}_x$, tak bowiem ustawiony jest polaryzator.

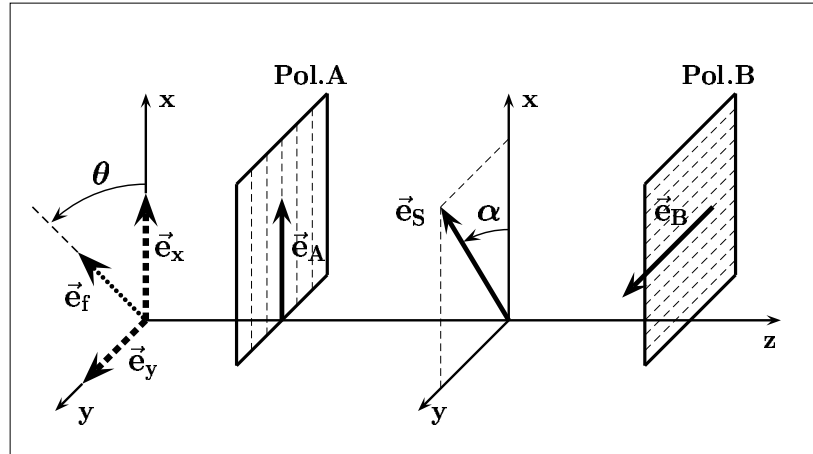
Jeżeli teraz na drodze fotonu (o polaryzacji \vec{e}'_f), który przeszedł przez pierwszy polaryzator (A), umieścimy drugi polaryzator (B) o kierunku przepuszczalności $\vec{e}_B = \vec{e}_y$, to prawdopodobieństwo przejścia fotonu przez ten drugi polaryzator wynosi

$$P_B = |\vec{e}'_f \cdot \vec{e}_B|^2 = |\vec{e}_x \cdot \vec{e}_y|^2 = 0. \quad (22.4)$$

Foton nie przejdzie przez polaryzator B . Doświadczenie to możemy podsumować stwierdzając, że dwa wzajemnie prostopadłe polaryzatory są nieprzezroczyste dla fotonu o dowolnej polaryzacji. Wniosek ten jest zarówno intuicyjnie oczywisty, jak i prosty do matematycznego uzasadnienia.

22.1.2 Trzy polaryzatory

Rozważymy teraz nieco bardziej złożoną sytuację eksperymentalną. Jak poprzednio foton padający (wzdłuż osi z) ma dowolną polaryzację daną wzorem (22.1). Na jego drodze umieszczono trzy polaryzatory. Dwa z nich (A i B) są ustawione tak jak poprzednio, tzn. $\vec{e}_A = \vec{e}_x$ oraz $\vec{e}_B = \vec{e}_y$. Cała różnica polega na tym, że pomiędzy tamte dwa, wstawiono dodatkowo trzeci polaryzator o



Rys. 22.2: Doświadczenie polaryzacyjne z trzema polaryzatorami.

kierunku przepuszczania

$$\vec{e}_s = \vec{e}_x \cos \alpha + \vec{e}_y \sin \alpha, \quad (22.5)$$

gdzie α jest pewnym ustalonym kątem (którym też możemy manipulować). Szukamy teraz odpowiedzi na pytanie: czy foton padający o polaryzacji \vec{e}_f danej w (22.1) przejdzie przez układ złożony z trzech polaryzatorów?

Wydawać by się mogło, że polaryzatory A i B zapewniają pochłonięcie fotonu, więc dodatkowe "utrudnienie" w postaci trzeciego – środkowego polaryzatora powinno "tym bardziej"

uniemożliwić przejście fotonu. Intuicja podpowiada więc, że odpowiedzią na postawione pytanie powinno być: *nie, nie przejdzie*.

Trzeba jednak konsekwentnie przeanalizować problem, aby się upewnić, czy przypadkiem intuicja nas nie zawodzi. Foton na swej drodze natrafia kolejno na trzy polaryzatory, przez które przechodzi z określonym prawdopodobieństwem. Jeśli przejdzie, to następuje redukcja stanu jego polaryzacji. Zbadajmy zatem kolejne etapy zjawiska.

1. Foton o polaryzacji \vec{e}_f (patrz (22.1)) przechodzi przez polaryzator A z prawdopodobieństwem $P_A = \cos^2 \theta$. Po przejściu, jego polaryzacja ulega redukcji i opisana jest wektorem $\vec{e}'_f = \vec{e}_A = \vec{e}_x$.
2. Na polaryzator S (środkowy) pada więc foton o polaryzacji $\vec{e}'_f = \vec{e}_x$. Prawdopodobieństwo przejścia przez polaryzator (zgodnie z powyższą teorią) wynosi

$$P_S = \left| \vec{e}'_f \cdot \vec{e}_S \right|^2 = \left| \vec{e}_x \cdot (\vec{e}_x \cos \alpha + \vec{e}_y \sin \alpha) \right|^2 = \cos^2 \alpha. \quad (22.6)$$

Przejście fotonu przez polaryzator S jest więc możliwe. Po przejściu, ponownie następuje redukcja stanu polaryzacji. Foton, który przeszedł przez polaryzator S ma więc polaryzację daną wektorem

$$\vec{e}''_f = \vec{e}_S = \vec{e}_x \cos \alpha + \vec{e}_y \sin \alpha. \quad (22.7)$$

3. Foton, który przeszedł przez polaryzator S ma polaryzację \vec{e}''_f i pada na polaryzator B . Tym razem prawdopodobieństwo przejścia wynosi

$$P_B = \left| \vec{e}''_f \cdot \vec{e}_B \right|^2 = \left| (\vec{e}_x \cos \alpha + \vec{e}_y \sin \alpha) \cdot \vec{e}_y \right|^2 = \sin^2 \alpha, \quad (22.8)$$

a jego polaryzację (po redukcji) określa wektor

$$\vec{e}'''_1 = \vec{e}_B = \vec{e}_y. \quad (22.9)$$

Przejście fotonu przez jeden z polaryzatorów jest zdarzeniem niezależnym od przejścia przez pozostałe dwa. Dlatego też stwierdzamy, że całkowite prawdopodobieństwo przejścia fotonu przez trzy polaryzatory dane jest jako iloczyn trzech prawdopodobieństw

$$P_{\text{przejścia}} = P_A P_S P_B = \cos^2 \theta \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin^2 \alpha \quad (22.10)$$

Prawdopodobieństwo to znika, gdy $\alpha = 0^\circ$ (polaryzatory A i S są ustawione w tym samym kierunku) lub gdy $\alpha = 90^\circ$ (współliniowe są polaryzatory S i B). Nietrudno też zauważyć, że $P_{\text{przejścia}}$ jest (dla danego kąta θ) maksymalne, jeśli $\alpha = 45^\circ$, a więc gdy polaryzator S jest ustawiony "w pół drogi" pomiędzy A i B .

Wniosek : Kwantowo-mechaniczna analiza zjawiska polaryzacji wskazuje, że czysto intuicyjny wniosek jest BŁĘDNY. Ustawienie "dodatkowej" przeszkody sprawia, że uprzednio nieprzezroczysty układ polaryzatorów A i B , po ustawieniu polaryzatora S stał się częściowo przepuszczalny. Warunkiem częściowej przezroczystości jest ustawienie środkowego polaryzatora w sposób niewspółliniowy ani z A ani z B tj. tak, aby $\alpha \neq 0^\circ$ oraz $\alpha \neq 90^\circ$.

* * * * *