



Doświadczenia interferencyjne z fotonami

*Paweł Tomasz Pęczkowski
ZDF, IFD, Uniwersytet Warszawski*

CZĘŚĆ I

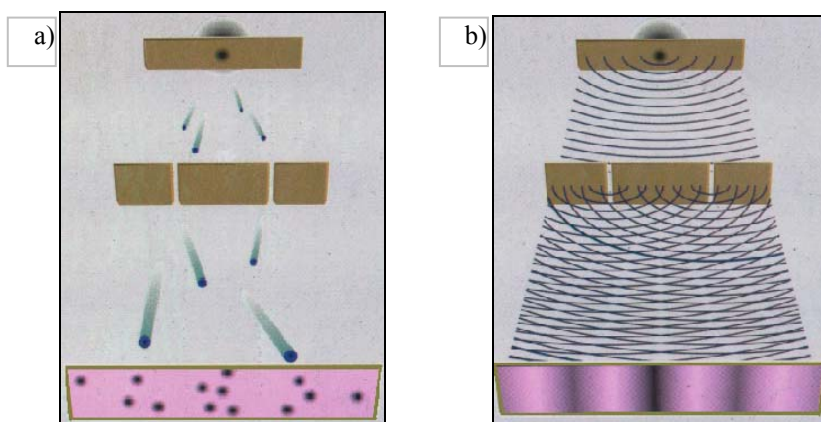
1. Wstęp

Źródłem osobliwości kwantowych związanych z naturą światła jest dwoistość korpuskularno-falowa. Autorem hipotezy, że światło jest strumieniem cząstek, był Izaak Newton. Jednak słynne doświadczenie Thomasa Younga z dwiema wąskimi szczelinami przeprowadzone w 1801 roku, jak również teoria Fresnela, przekonały większość uczonych, że światło ma naturę falową. Gdyby światło składało się z cząstek, takich jak ziarenka śrutu, to po przejściu tych cząstek przez jedną lub drugą szczelinę na ekranie ustawionym za płytką ze szczelinami obserwowalibyśmy dwa jasne prążki. W rzeczywistości widzimy jednak na przemian jaśniejsze i ciemniejsze obszary, co łatwo można wyjaśnić przyjmując, że każda ze szczelin, do których dociera światło, staje się źródłem fal wtórnych, które interferują ze sobą tworząc obszary oświetlone (gdy interferencja jest konstruktywna) i ciemne (gdy interferencja jest destruktywna). Wynik tego doświadczenia jest uważany za nieodpartą dowód na falową naturę światła.

Na początku XX wieku Albert Einstein wyjaśnił zjawisko efektu fotoelektrycznego, za co później otrzymał Nagrodę Nobla (1921 rok). W przyjętym wyjaśnieniu zjawiska Einstein założył, że światło składa się z pojedynczych cząstek, nazywanych fotonami (nazwę tę wprowadził chemik Gilbert N. Lewis w 1926 roku).

2. Korpuskularno-falowa natura fotonów

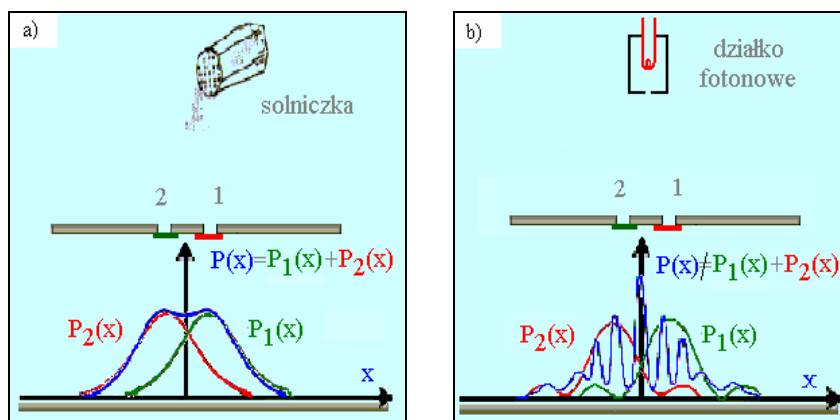
Obecnie znane są metody umożliwiające emisję pojedynczych fotonów, a nowoczesne detektory potrafią rejestrować pojedyncze fotony pojawiające się w określonym miejscu i czasie, w szczególności uderzające w ekran, który na ogół jest umieszczony za dwiema szczelinami. Na rys. 1 została przedstawiona idea powstawania obrazu interferencyjnego, który wyłania się w miarę wzrostu liczby fotonów padających na ekran. Pojedynczy foton może uderzyć w ekran w dowolnym przypadkowym miejscu. Nie można przewidzieć, które to będzie miejsce, można jedynie określić rozkład prawdopodobieństwa uderzenia fotonu w określony obszar ekranu. W miarę wzrostu liczby fotonów rozkład prawdopodobieństwa decyduje o tym, że w pewne obszary trafia więcej fotonów, a w inne obszary mniej. Wyłania się struktura prążków interferencyjnych.



Rys. 1. Doświadczenie z dwiema szczelinami pokazuje, że światło ma jednocześnie naturę korpuskularną jak i naturę falową. W miarę wzrostu liczby fotonów (a) tworzy się struktura prążków interferencyjnych (b); (na podstawie [1])

Struktura interferencyjna powstaje tylko wówczas, gdy otwarte są obie szczeliny i nie próbujemy sprawdzić, przez którą szczelinę przechodzi pojedyncza cząstka. Jeżeli zamkniemy w danej chwili jedną szczelinę albo tuż za nią umieścimy detektor (czyli układ fotoelektryczny, który sygnalizuje pochłanianie fotonów np. sygnałem dźwiękowym) pozwalający sprawdzić, którą przechodzi foton, to obraz interferencyjny znika. Okazuje się, że wysyłając pojedyncze fotony ze źródła światła twierdzimy, że zachowują się one jak fala przechodząca przez obie szczeliny jednocześnie (gdy nie dokonujemy pomiarów, przez którą szczelinę foton przechodzi) albo zachowują się jak cząstki przechodzące tylko przez jedną szczelinę (gdy za szczeliną ustawimy detektor sprawdzający, czy nastąpiło przejście fotonu przez nią).

Światło ugięte na obu szczelinach nie dodaje się tak, jak to sugeruje rys. 2 a) poprzez analogię do klasycznych ziaren soli. Prawdziwy obraz natężenia prążków interferencyjnych przedstawiony jest na rys. 2 b). Najjaśniejszy prążek powstaje w miejscu znajdującym się naprzeciwko punktu leżącego w połowie odległości między szczelinami.



Rys. 2. Doświadczenie z dwiema szczelinami dla klasycznych ziaren soli i fotonów. Gęstość prawdopodobieństwa względem środka układu dwóch szczelin: a) znalezienia ziarna soli na podłożu, b) zarejestrowania fotonów przez detektor (opracowanie własne)

Rys. 2a przedstawia klasyczną wersję doświadczenia z dwiema szczelinami. Rolę fotonów odgrywają tutaj ziarna soli sypane z solniczki. Każde ziarenko soli może przejść albo szczeliną 1 albo szczeliną 2. Wówczas rozkład ziarenek soli powinien być zgodny z sumą funkcji Gaussa $P_1(x)$ (dla pierwszej szczeliny) i $P_2(x)$ (dla drugiej szczeliny). Otrzymamy dwa maksima znajdujące się naprzeciwko szczelin. W przypadku fotonów rozkład jest inny. Otrzymamy wiele maksimów lokalnych, a maksimum globalne znajduje się naprzeciwko środka odcinka łączącego obie szczeliny. Dowodzi to, że rozkład $P(x)$ nie jest sumą dwóch funkcji Gaussa $P_1(x)$ i $P_2(x)$, co możemy zapisać $P(x) \neq P_1(x) + P_2(x)$.

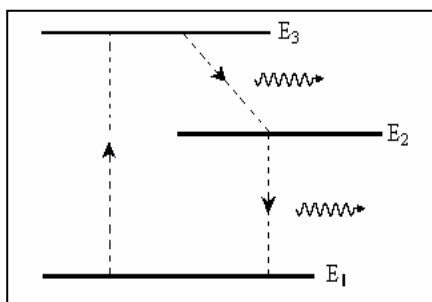
Efekt interferencyjny nie znika, jeżeli będziemy osłabiać natężenie wiązki światła. W pewnym miejscu płaszczyzny ekranu można ustawić detektor wykrywający pojedyncze fotony. Zauważymy, że detektor wytwarza serie przypadkowo pojawiających się sygnałów. Jeżeli będziemy przesuwać detektor wzdłuż ekranu, to częstość sygnałów zwiększa się lub zmniejsza, w taki sam sposób, jak zmieniają się maksima i minima jasności prążków interferencyjnych.

Można jeszcze bardziej osłabić natężenie wiązki światła tak, aby w danej chwili na drodze pomiędzy źródłem a detektorem znajdował się nie więcej niż jeden foton. Gdyby foton zachowywał się jak cząstka, to powinien przejść albo przez jedną szczelinę, albo przez drugą, ale nie przez obie jednocześnie. Prześledźmy ten przypadek bardziej szczegółowo.

3. Doświadczenie Younga w wersji jednofotonowej

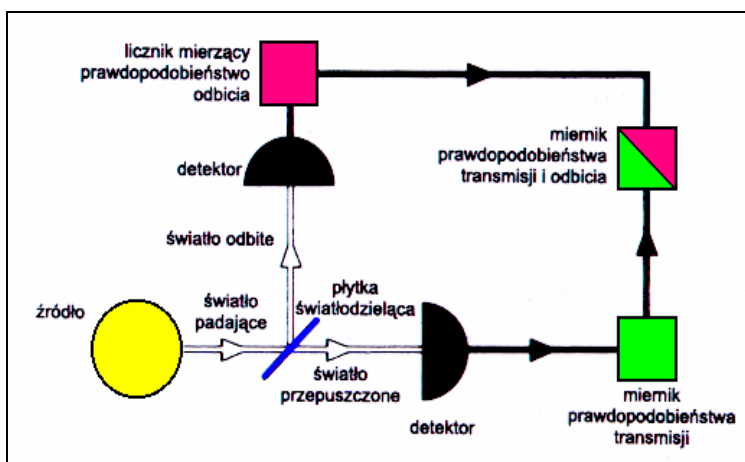
Doświadczenie Younga w wersji jednofotonowej zostało po raz pierwszy przeprowadzone w 1909 roku przez G.I. Taylora [2]. Jeżeli dostatecznie osłabimy natężenie wiązki światła, to możemy rejestrować pojedyncze fotony. Po dostatecznie długim czasie okazuje się, że na ekranie powstaje obraz interferencyjny. Wynika to stąd, że foton w momencie emitowania przez źródło i w momencie pochłaniania przez ekran zachowuje się jak cząstka, natomiast na drodze od źródła do punktu docelowego zachowuje się jak fala. Nie potrafimy stwierdzić, przez którą szczelinę przechodzi foton. Nie ma żadnego sposobu wykrycia fotonów bez oddziaływania z materią. Jeżeli spróbujemy ustawić detektor bezpośrednio za szczeliną w celu wykrycia czy dany foton przeszedł przez tę szczelinę, to zjawisko interferencji znika. Możemy ustalić prawdopodobieństwo przejścia fotonu przez daną szczeliną, natomiast nie wiemy, przez którą szczeliną pojedynczy foton przejdzie. Dla konkretnego fotonu nie umiemy powiedzieć, w którym miejscu na ekranie zostanie wykryty, ale umiemy określić prawdopodobieństwo, że nastąpi to w określonym punkcie ekranu. W ten sposób dla dużej liczby fotonów, na podstawie prawa wielkich liczb Bernoulliego, możemy przewidzieć rozkład natężenia prążków interferencyjnych.

Zastanówmy się teraz, jak można wyprodukować i wykryć pojedynczy foton. Światło powstaje w wyniku przejścia elektronów z wyższych poziomów energetycznych atomu na niższe, gdy elektron oddaje energię emitując fotony. Aby wyprodukować pojedynczy foton, trzeba zmusić pojedynczy atom do wyemitowania dokładnie jednego kwantu energii w wyniku przejścia elektronu między dwoma poziomami energetycznymi. Załóżmy, że atom może znajdować się w jednym z trzech stanów energetycznych: E_1 , E_2 , E_3 (rys. 3). Przejście elektronu między dwoma poziomami energii (E_1 i E_3) można uzyskać wzbudzając atom za pomocą impulsu laserowego o energii odpowiadającej różnicy poziomów energetycznych $E_3 - E_1$. Elektron zostaje wzbudzony z E_1 do E_3 , a potem szybko spada na poziom pośredni E_2 i następnie na poziom podstawowy E_1 . Przeskok z E_3 do E_2 oraz z E_2 do E_1 wyzwala energię w postaci fotonu (rys. 3).



Rys. 3. Uproszczony schemat poziomów energetycznych (E_1 , E_2 , E_3) atomu. Linia przerywaną oznaczono przejście elektronowe, a falistą linią – emisję fotonów (opracowanie własne)

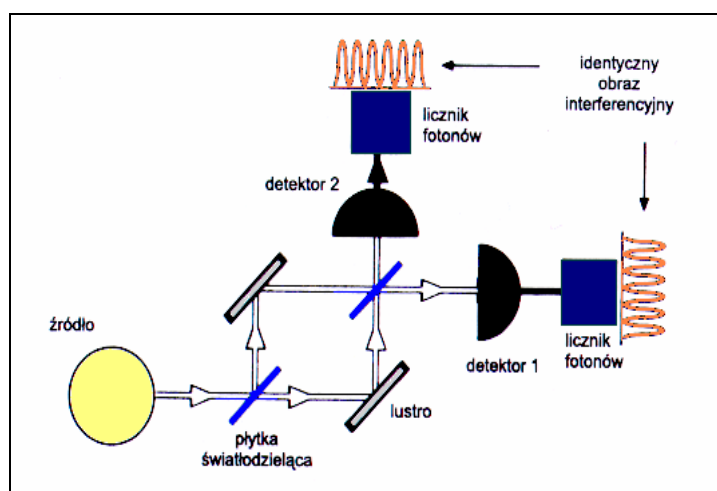
W ten sposób można wyemitować dwa pojedyncze fotony. Umieszczony detektor wykrywa foton uzyskany przy przejściu elektronu z górnego poziomu energetycznego (E_3) do poziomu pośredniego (E_2) i w tym momencie otwiera na krótko „bramkę”, która pozwala drugiemu fotonowi, emitowanemu przy przejściu elektronu z poziomu pośredniego do poziomu podstawowego, wejść do układu doświadczalnego (rys. 4). Chociaż nie rejestrujemy w tym momencie fotonu, mamy pewność, że został on wyemitowany do układu doświadczalnego. Tego typu pomysłowe doświadczenie po raz pierwszy wykonali w latach osiemdziesiątych XX wieku pracujący w Paryżu Alain Aspect i Philippe Grangier [3].



Rys. 4. Schemat doświadczenia A. Aspecta i P. Grangiera ukazującego rozdzielanie pojedynczego fotonu na dwie części; (na podstawie [3], [4]). Fotony emitowane ze źródła padają na płytkę światłodzielącą. Jest to rodzaj zwierciadła, które przepuszcza połowę światła, a drugą połowę odbija pod pewnym kątem. Płytkę światłodzielącą pozwala podzielić trajektorię fotonu na dwie drogi: światła przepuszczonego i światła odbitego. Przypomina to rozszczepienie wiązki światła przez kryształ kalcytu

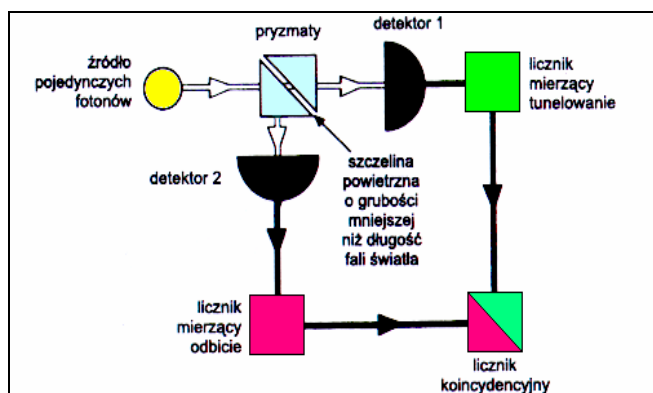
Za obiema drogami ustawiono detektory. Jeżeli foton ma naturę falową, to po rozdzieleniu wiązki pierwotnej można obie otrzymane wiązki „zmusić” do interferencji (rys. 4). Natomiast gdy do płytki światłodzielącej foton dociera jako pojedyncza cząstka, to musi ona zostać przepuszczona albo odbita i dalej porusza się tylko po jednej z możliwych dróg. Okazuje się, że gdy na obu drogach wychodzących z płytki światłodzielącej umieści się detektory, to pojedyncze fotony podążają albo jedną, albo drugą drogą. Nigdy nie zaobserwowano równoczesnego wykrycia światła na obu drogach. Sugerowałoby to, że połowa światła podążała jedną, a połowa drugą drogą, czyli że światło zachowuje się jak strumień cząstek.

Aby sprawdzić, czy można w podobny sposób wykryć naturę falową światła, A. Aspect, P. Grangier i G. Roger zmodyfikowali układ doświadczalny [3] zastępując detektory z rys. 4 lustrami, które połączyły drogi fotonów rozszczepionych przez pierwszą płytkę światłodzielną. Zaobserwowano wówczas interferencję. Schemat układu doświadczalnego (interferometru Macha-Zehndera) został przedstawiony na rys. 5. Jest to w gruncie rzeczy doświadczenie przypominające doświadczenie z dwiema szczelinami.



Rys. 5. Schemat interferometru Macha-Zehndera (zmodyfikowany układ doświadczalny A. Aspecta, P. Grangiera i G. Rogera przedstawiony na rys. 4); (na podstawie [3–4])

Wkrótce po przeprowadzeniu omówionego doświadczenia (w 1992 r.) trzech indyjskich naukowców, Dipankar Home i Partha Ghose z Instytutu Bosego oraz Girish Agarwal z Uniwersytetu w Hajdarabadzie, zaproponowali eksperyment, który mógłby wykazać jednoczesne zachowanie się fotonów jak cząstki i jak fale. Zasadniczym pomysłem było zastąpienie płytki światłodzielącej z doświadczenia Aspecta i Grangiera przez układ zbudowany z dwóch pryzmatów, ustawionych bardzo blisko siebie – niemal dotykających się (rys. 6).



Rys. 6. Projekt eksperymentu: G.S. Agarwal, P. Ghose i D. Home (1992); (na podst. [3–4])

Pryzmaty były wycięte w kształcie graniastosłupa o podstawie trójkąta prostokątnego. Światło padające prostopadle na boczną ściankę pryzmatu przyległą do przyprostokątnej trójkąta trafia na ściankę przyległą do przeciwprostokątnej trójkąta pod kątem 45° . Ulega wtedy całkowitemu odbiciu wewnątrz pryzmatu. Natomiast gdy obie ścianki do siebie przylegają, to światło padające na taki jednorodny układ w kształcie prostopadłościanu pod kątem prostym do jednej ze ścian przechodzi całkowicie na zewnątrz. Gdy między obiema prostokątnymi ściankami powstaje mała szczelina, to część światła zostaje odbita, a część przechodzi przez szczelinę i podąża dalej po linii prostej. Aby uzyskać taki efekt, szczelina musi być mniejsza niż długość fali światła. Odsetek światła, które przejdzie przez układ lub które zostanie odbite, zależy od szerokości szczeliny. Im większa jest szczelina, tym większa część światła przechodzi przez układ. Można tak dobrać szerokość szczeliny, żeby połowa światła została przepuszczona, a połowa odbita. Tak zaprojektowane doświadczenie zostało w rzeczywistości przeprowadzone przez zespół fizyków japońskich: Mutaka Mizobuchi i Yoshiyuki Ohtake z centrum badawczego Hamamatsu Photonics w miejscowości Hamakita [5].

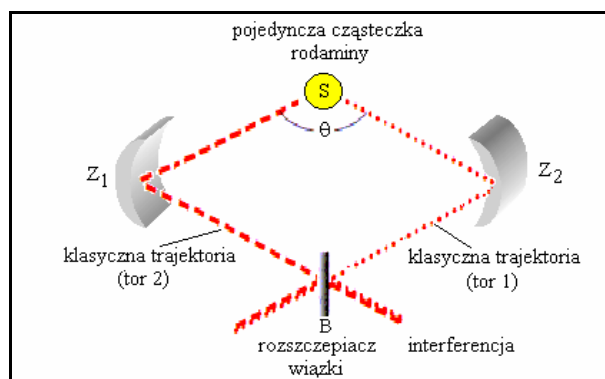
Fotony ze źródła pojedynczych fotonów padały na pryzmaty. Część fotonów przeszła na wprost, a część została odbita. Istniały zatem dwie drogi, którymi fotony mogły się poruszać. Na tych drogach ustawiono detektory. Gdyby fotony zachowywały się jak cząstki, to powinny wybierać jedną z możliwych dróg, ale nigdy obie jednocześnie. A to oznacza, że foton może zostać zarejestrowany tylko przez jeden z detektorów. Rzeczywiście, zarejestrowane fotony poruszały się jako cząstki i nie rozszczepiały się na dwie części przy przejściu przez pryzmaty. Jednocześnie fotony, które obrały drogę na wprost musiały tunelować przez szczelinę, co oznacza, że przejawiały naturę falową. Nadal jednak stwierdzono, że licznik koincydencji nigdy nie rejestruje jednoczesnego przybycia dwu połówek foto-

nu obiema drogami. A więc, w doświadczeniu te same fotony zostały „złapane” na tym, że jednocześnie zachowują się jak fale i jak cząstki. W ten sposób udało się zaobserwować naturę korpuskularną i falową jednocześnie w tym samym doświadczeniu.

4. Doświadczenie M. Lai i J.C. Dielsa

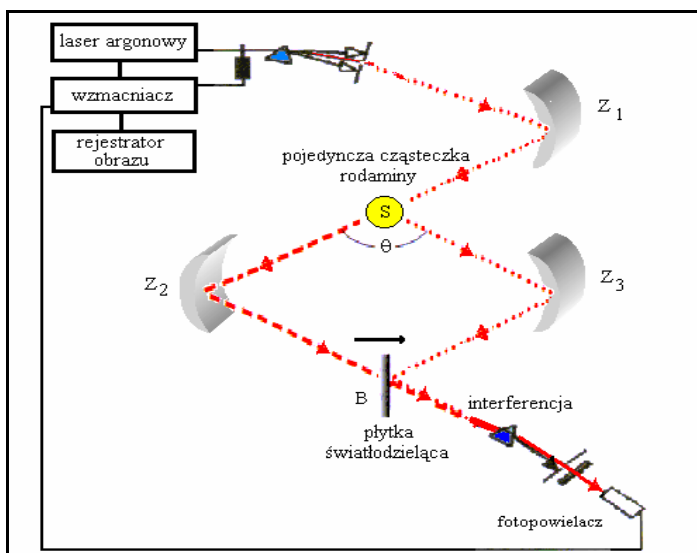
Natura korpuskularno-falowa fotonów uwidacznia się podczas mierzenia interferencji w cienkiej warstwie barwnika organicznego (cząsteczki rodamin), znacznie cieńszej niż długość fali światła. Natężenie wiązki światła emitowanej przez barwnik jest bardzo małe, każdy pomiar może być więc traktowany jako wykrycie pojedynczego fotonu. Odstęp między dwiema detekcjami wynosi kilka mikrosekund. Dlatego jeżeli zauważa się interferencję, to musi to być interferencja pojedynczego fotonu. Wynika to stąd, że czas życia cząstki w stanie wzbudzonym wynosi tylko kilka nanosekund i fotony nie mają możliwości oddziaływać ze sobą (tzn. ich funkcje falowe nie interferują ze sobą).

Jeżeli cząsteczka traci energię bez pobudzenia zewnętrznego, to emisja promieniowania musi być kierunkowa, tzn. nie może zachodzić w postaci fali sferycznej (w różnych kierunkach). Ta hipoteza została postawiona przez Einsteina i potwierdzona w doświadczeniach, w których mierzono przekrój rozprzestrzeniającej się dobrze skolimowanej wiązki molekularnej po spotkaniu z wiązką światła. Na rys. 7 źródło S zawiera cząsteczki emitujące pojedyncze fotony w dobrze rozdzielonych momentach czasowych. Promieniowanie jest kierowane przez dwa wklęsłe zwierciadła odbijające Z_1 i Z_2 wzdłuż dwóch różnych dróg optycznych (tor 1 i tor 2) różniących się w fazie o kąt około 180° , a następnie łączone w punkcie B (płytkę światłodzielącą przepuszczającą część promieniowania, a odbijającą pozostałą część). Płytkę światłodzielącą może być przesuwana w poziomie, co powoduje różnice faz między wiązkami poruszającymi się po obu trajektoriach.



Rys. 7. Schemat doświadczenia M. Lai, J.C. Dielsa (na podstawie [6])

Powstaje pytanie, czy zaobserwujemy interferencję na wyjściu rozszczepiacza wiązki B. W artykule Minga Lai, Jeana-Claudego Dielsa [6–7] i w książce D. Hallidaya, R. Resnicka, J. Walkera [8] opisano eksperyment zaprojektowany tak, aby odpowiedzieć na to pytanie. Autorzy twierdzą, że konwencjonalny eksperyment Younga z dwiema szczelinami sprawdza tylko korpuskularno-falową naturę światła w rozprzestrzenianiu się fotonów ze źródła, natomiast nie odpowiada na pytanie, co będzie działo się podczas emisji fotonów pod dużym kątem, jak na rys. 8. Eksperymenty mające na celu wykazać dualną naturę światła przy rozprzestrzenianiu się ze źródła wykorzystują układ Younga z dwiema szczelinami albo interferometr Michelsona. W tych eksperymentach foton wychodzący ze źródła rozchodzi się dwiema różnymi drogami w przestrzeni i osiąga punkt, w którym następuje obserwowana interferencja. Koncepcja wyjaśnienia tego zjawiska przyjmuje, że foton może znajdować się jednocześnie na dwóch oddzielonych od siebie drogach. W celu wyjaśnienia zachowania się fotonu przy eksperymencie z dużym kątem pomiędzy dwoma kierunkami emisji fotonu, musimy odpowiedzieć na pytanie, w jaki sposób foton zachowuje się podczas emisji.



Rys. 8. Schemat układu doświadczalnego z doświadczenia M. Lai, J. Dielsa (na podst.[6])

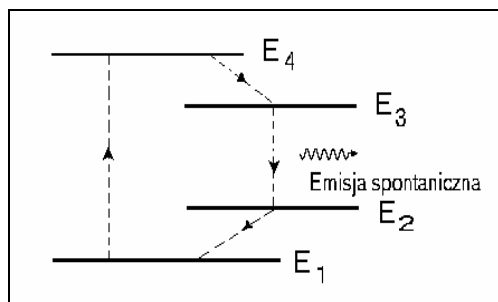
Zgodnie z poglądem mechaniki kwantowej, kiedy cząsteczka wysyła promieniowanie, foton jest emitowany jako paczka o energii równej różnicy energii w dwóch stanach przejściowych cząsteczki. Einstein pokazał, że proces pojedyn-

czej emisji musi być kierunkowy. Z drugiej strony teoria promieniowania zakłada, że rozprzestrzenianie się pola elektromagnetycznego emitowanego przez cząsteczkę jest podobne do pola klasycznego dipola elektrycznego. Zgodnie z tą teorią, możliwość wykrycia emitowanego fotonu w określonym czasie i kierunku jest proporcjonalna do natężenia pola promieniowania w tym czasie i w tym kierunku, a odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości rozważanego punktu od źródła promieniowania. Z tego punktu widzenia można oczekiwać wystąpienia interferencji w eksperymencie zaprojektowanym na rys. 1.

Pomysł przedstawiony na rys. 7 został wykorzystany do zbudowania układu doświadczalnego, przedstawionego na rys. 8.

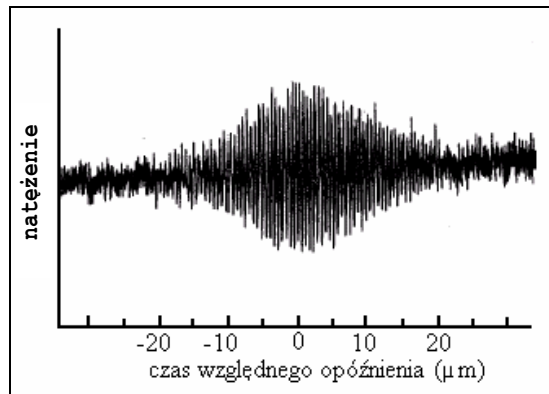
Dzięki tak skonstruowanemu układowi doświadczalnemu, można uzyskać emisję fotonów w dwóch prawie przeciwnych kierunkach. Fotony są kolimowane przez zwierciadła wklęsłe Z_2 i Z_3 (o ogniskowej $f=30$ cm), a następnie są łączone w rozszczepiaczu wiązki B, który można przesuwac w poziomie. Źródłem spontanicznej emisji jest cienka warstwa (cieńsza niż długość fali) barwnika organicznego rodaminu pokryta szklaną powłoką. Źródło jest wzbudzone przez promień laserowy o długości fali 514 nm.

Cząsteczka barwnika może znajdować się w czterech stanach energetycznych. Na rys. 9 pokazano schemat poziomów cząsteczki rodaminu i zaznaczono możliwe przejścia odpowiadające jej pobudzeniu i spontanicznej emisji fotonów. Emisja spontaniczna następuje między drugim i trzecim poziomem energetycznym. Nie ma zależności fazy między fotonem wzbudzonym a fotonem spontanicznie emitowanym, czyli fotony wykrywane przez detektor pochodzą z przypadkowego procesu emisji i są niezależne jeden od drugiego. Ponieważ zwierciadła (rys. 8) znajdują się daleko od źródła, nie ma zależności pomiędzy poziomem wzbudzenia cząsteczki a wysyłanym przez nią promieniowaniem. Cząsteczka zachowuje się tak, jakby była swobodna.



Rys. 9. Schematyczne przedstawienie stanów energetycznych cząsteczki rodaminu. Emisja spontaniczna występuje pomiędzy E_3 - E_2 . Linia przerywaną oznaczono przejście elektronowe, a falistą linią emisję fotonów (opracowanie własne)

Do detekcji wiązki na wyjściu z rozszczepiacza użyto fotopowielacza z licznikiem fotonów. Przed fotopowielaczem ustawiono pryzmat, żeby oddzielić fotony emitowane spontanicznie od fotonów z wiązki wzбудzonej. Na końcu układu użyto wzmacniacza, żeby zwiększyć stosunek sygnału do szumu. Impuls jest rejestrowany na wyjściu z tego wzmacniacza przez rejestrator obrazu. Wynik doświadczenia, tzn. obraz zarejestrowany przez rejestrator obrazu, jest pokazany na rys. 10.



Rys. 10. Obraz prążków interferencyjnych zarejestrowanych w doświadczeniu [6]

Na rys. 10 widać prążki interferencyjne. Na osi poziomej podano wielkość względnego opóźnienia wyrażoną w μm (odległość i czas są ze sobą powiązane prędkością światła), a na osi pionowej natężenie, tj. liczbę fotonów zarejestrowanych przez detektor w stałym czasie, wynoszącym 3s. Względne opóźnienie oznacza różnicę czasów między wyemitowanymi fotonami w dwóch przeciwnych kierunkach. Zaobserwowanie prążków interferencyjnych potwierdza dualną naturę fotonów spontanicznie emitowanych w procesie pojedynczej emisji. Żeby zinterpretować ten fakt w optyce kwantowej, trzeba pokazać, że spontaniczna emisja układu atomowego jest rzeczywiście spójna we wszystkich kierunkach, nawet wtedy, gdy faza i kierunek propagacji fali jest zupełnie przypadkowy.

W tym miejscu kończymy pierwszą część artykułu. W drugiej części opiszemy jeszcze bardziej zadziwiające doświadczenia pokazujące, że aby zmienić zachowanie fotonu z falowego na korpuskularne, niekoniecznie trzeba ingerować w układ eksperymentalny, a nawet można odzyskać utracony obraz interferencyjny.

Literatura:

- [1] J. Horgan, *Filozofia teorii kwantów*, Świat Nauki **9**, 78, 1992.
- [2] G.I. Taylor, *Interference fringes with feeble light*, Proc. Cambridge Philos. Soc. **15**, 114, 1909.
- [3] P. Grangier, G. Roger, A. Aspect, *Experimental evidence for a photon anticorrelation effect on a beam splitter: a new light on single-photon interferences*, Europhys. Lett. **1**, 173, 1986.
- [4] P. Ghose, D. Home, G.S. Agarwal, An „*experiment to throw more light on light*”, Phys. Lett. A **168**, 95, 1992.
- [5] Y. Mizobuchi, Y. Ohtaké, An „*experiment to throw more light on light*”, Phys. Lett. A **168**, 1, 1992.
- [6] M. Lai, J.C. Diels, *Interference between spontaneous emission in different directions*, Am. J. Phys. **58** (10), 928, 1990.
- [7] M. Lai, J.C. Diels, *Wave-particle duality of a photon in emission*, J. Opt. Soc. Am. B **9**, 2290, 1992.
- [8] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Podstawy fizyki*, tom 5, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2003.