



Doświadczenia interferencyjne z fotonami

Paweł Tomasz Pęczkowski

*Zakład Dydaktyki Fizyki, Instytut Fizyki Doświadczalnej
Uniwersytet Warszawski*

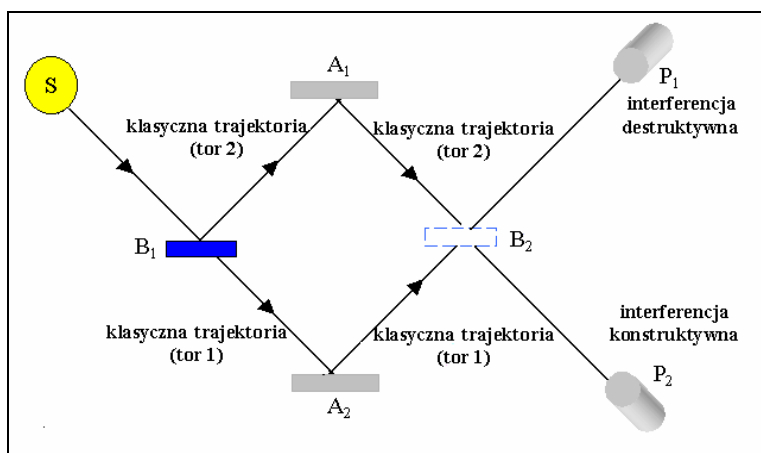
CZĘŚĆ II

1. Wstęp

W artykule omawiamy osobliwości kwantowe związane z naturą światła i doświadczenia mające na celu wyjaśnienie tych osobliwości. Od czasów I. Newtona i T. Younga toczy się spór, jaką naturę ma światło – czy zachowuje się jak cząstka, czy jak fala. W dzisiejszych czasach zgodzono się z interpretacją, że światło ma naturę dwoistą: korpuskularno-falową. Wyznacznikiem natury falowej jest zjawisko interferencji. Pojedyncze fotony w momencie emitowania przez źródło i w momencie pochłaniania przez ekran zachowują się jak cząstki (mogą zastać zarejestrowane bądź niezarejestrowane przez detektor), natomiast nie ma żadnego sposobu wykrycia zachowania się fotonu bez oddziaływania z materią. W poprzedniej części artykułu omówiliśmy najnowsze doświadczenia badające naturę dyfrakcyjno-interferencyjną fotonów. Opisaliśmy doświadczenie Younga w wersji jednofotonowej przeprowadzone przez G.I. Taylora (1909), doświadczenia A. Aspecta, P. Grangiera i G. Rogera (1986) i doświadczenie M. Lai i J.C. Dielsa (1990).

2. Doświadczenie J. A. Wheelera

Z eksperymentów przedstawionych w pierwszej części artykułu wynika, że jeżeli w doświadczeniu z dwiema szczelinami nie przeprowadzamy żadnych obserwacji drogi fotonu, to na ekranie tworzy się obraz interferencyjny. Natomiast jeżeli zasłonimy jedną szczelinę albo za szczeliną ustawimy detektor wykrywający, czy przeszedł przez nią foton, to obraz interferencyjny znika. Oznaczałoby to, że zachowanie się przyrody (tutaj: fotonów) zależy od tego, czy ją obserwujemy, czy nie. Odzwierciedla to jeden z aksjomatów teorii kwantowej, zgodnie z którym żadne fundamentalne zjawisko nie jest zjawiskiem, dopóki nie zostanie zarejestrowane. Pogląd ten wywodzi się z idei Bohra, który uważał, że roli obserwatora w zachowaniu się natury nie da się wyeliminować. Ideę tę rozwinął amerykański fizyk John A. Wheeler, który zaprojektował pewien nowy wariant doświadczenia z dwiema szczelinami [9]. W omawianym doświadczeniu eksperymentator czeka z wyborem sposobu obserwacji do czasu, aż foton przejdzie przez szczelinę. Idea tego doświadczenia została przedstawiona na rys. 1.



Rys. 1. Schemat doświadczenia myślowego z opóźnionym wyborem (na podstawie [9])

Źródło światła S emituje pojedyncze fotony w ten sposób, że dwa kolejno wyemitowane fotony oddziela długi odstęp czasu. W ten sposób mamy gwarancję, że do układu wchodzi pojedynczy foton. Światło pada na płytkę światłodzielącą B₁ i dalej może biec po drodze oznaczonej jako tor 1 (część przepuszczona) lub po drodze oznaczonej jako tor 2 (część odbita). Na obu drogach zostały odpowiednio umieszczone lustra A₁ i A₂ całkowicie odbijające światło, które kierują foton do jednego z fotopowielaczy P₁ i P₂, pełniących rolę detektorów. Jeżeli w eksperymencie nie ma innych elementów, to zarejestrowanie fotonu przez detektor pozwala określić, którą drogą biegł foton. Okazuje się, że każdy foton jest wykrywany albo przez detektor P₁, albo przez detektor P₂, a więc zachowuje się jak cząstka. Wynik jest zgodny z innymi znanymi doświadczeniami z dwiema szczelinami. Jeżeli w aparaturze nie zostało umieszczone żadne inne urządzenie i detektory pozwalają określić drogę fotonu, to aparatura jako całość służy do wykrywania korpuskularnej natury światła. Umieścimy teraz drugie lustro półprzepuszczalne B₂ w obszarze przecięcia się drogi promieni świetlnych z luster A₁ i A₂ (patrz rys. 1). Jeżeli założymy, że foton zachowuje się jak fala, i dobierzemy odpowiednio parametry lustra B₂ (jego położenie), to możemy się spodziewać, że część światła przechodząca drogą (tor 1), przepuszczona przez lustro B₂, i część światła przechodząca drogą (tor 2), odbita przez lustro B₂, znoszą się (interferencja destrukcyjna), natomiast pozostałe części wzmacniają się (interferencja konstrukcyjna). Wówczas żaden foton nie dotrze do detektora P₁, a wszystkie dotrą do detektora P₂. Rzeczywiście taki wynik eksperymentu obserwujemy, co oznacza, że fotony przebiegają jednocześnie drogą (tor 1) i drogą (tor 2), a następnie interferują ze sobą, zatem zachowują naturę falową. Fotony nie są tutaj zlokalizo-

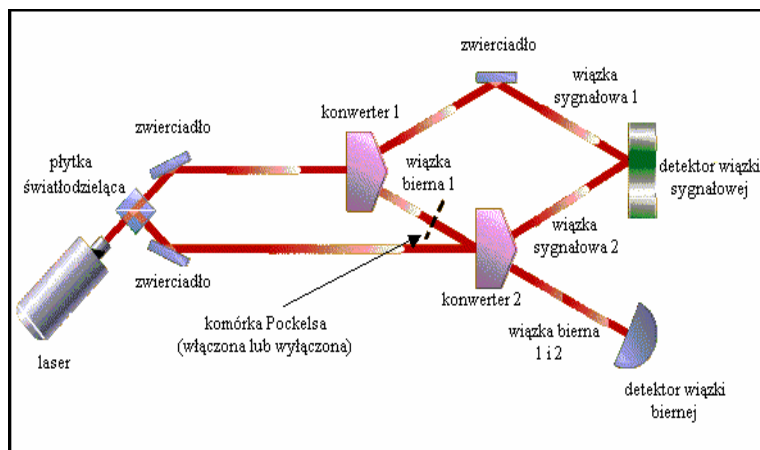
wane. Możemy powiedzieć, że aparatura z dodatkowym lustrem B_2 służy do wykrywania falowej natury światła.

Istotną modyfikacją w doświadczeniu zaproponowanym przez Wheelera jest to, że eksperymentator podejmuje decyzję o umieszczeniu (lub nie) w układzie lustra B_2 później niż moment dotarcia fotonu do lustra B_1 . Dlatego ten eksperyment nosi nazwę eksperymentu z opóźnionym wyborem. Dopiero wtedy, gdy foton znajduje się na drodze (tor 1) lub (tor 2) (lub obu jednocześnie), decydujemy, który wariant doświadczenia przeprowadzamy – czy wariant bez lustra B_2 , weryfikujący naturę korpuskularną fotonu, czy wariant z lustrem B_2 , weryfikujący naturę falową fotonu.

Okazuje się, że wyniki przeprowadzonego doświadczenia w obu wariantach (z lustrem B_2 i bez) nie zmieniają się w stosunku do poprzedniej wersji. Mogłoby to oznaczać, że foton już po opuszczeniu lustra B_1 „decyduje” dopiero, czy ma zachować się jak cząstka, czy jak fala.

3. Doświadczenie L. Mandela

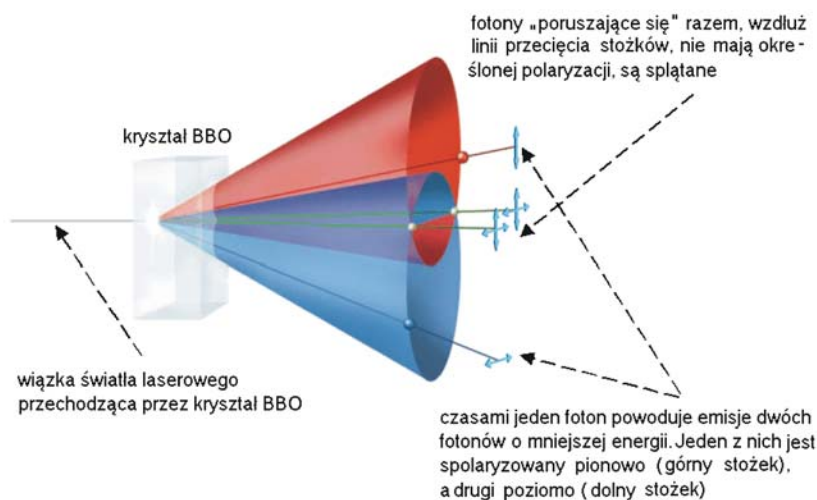
Realizacją doświadczenia myślowego zaproponowanego przez J.A. Wheelera jest doświadczenie przeprowadzone przez L. Mandela. W 1989 roku na Uniwersytecie w Rochester przeprowadzono doświadczenie, które wykazało, że aby zmienić zachowanie fotonu z falowego na korpuskularne, niekoniecznie trzeba ingerować w układ eksperymentalny. Doświadczenie Mandela wykazało, że foton może być zmuszony do zmiany zachowania się z falowego na korpuskularne w bardziej wyrafinowany sposób niż poprzez bezpośrednią interwencję [10]. Schemat eksperymentu został przedstawiony na rys. 2.



Rys. 2. Schemat układu doświadczenia L. Mandela (na podstawie [10])

Eksperyment polega na rozszczepieniu fotonu pochodzącego z wiązki laserowej na dwa fotony o energii dwa razy mniejszej. Proces ten nazywamy parametrycznym podziałem częstości (*parametric down-conversion process*) [11]. Foton ultrafioletowy o długości fali 351 nm po przejściu przez optycznie nieliniowy kryształ BBO (β -boranu baru) zostaje zaabsorbowany, po czym następuje emisja dwóch fotonów o energii dwa razy mniejszej (czyli dwukrotnie większej długości fali 702 nm, odpowiadającej barwie czerwonej widma fal elektromagnetycznych). Fotony otrzymane w wyniku parametrycznego podziału częstości mają ciekawe własności. Ponieważ podczas absorpcji i emisji fotonów muszą być spełnione zasady zachowania, muszą zachodzić związki pomiędzy pewnymi parametrami obu fotonów.

Istotę parametrycznego podziału częstości wyjaśniliśmy na rys. 3. Pokazano tu fragment schematu układu doświadczalnego zawierającego konwerter częstości (nieliniowy kryształ BBO). W tym kryształcie od czasu do czasu foton ultrafioletowy jest przekształcany w dwa fotony o dwukrotnie mniejszej energii, „poruszające się” wzdłuż krawędzi dwóch stożków. W parametrycznym podziale częstości powstają dwa splątane fotony, których polaryzacja jest zorientowana prostopadle do siebie, tzn. można przyjąć, że wektor polaryzacji jednego fotonu leży w płaszczyźnie pionowej (na górnym stożku na rys. 3), a drugiego w płaszczyźnie poziomej (na dolnym stożku na rys. 3).



Rys. 3. Fragment układu doświadczalnego tłumaczący istotę parametrycznego podziału częstości (opracowanie własne [12])

W doświadczeniu Mandela wiązka światła wychodzi z lasera i jest kierowana na płytkę światłodzielącą. Następnie część fotonów trafia do konwertera częstości 1, a część do konwertera częstości 2. Każdy z konwerterów dzieli foton na dwa fotony o mniejszej częstości. Jeden z tych fotonów został nazwany fotonem sygnałowym, a drugi fotonem biernym. Konwertery są ustawione w ten sposób, że dwa fotony bierne łączą się w jedną wiązkę bierną, która zostaje zarejestrowana przez detektor wiązki biernej. Wiązki sygnałowe dochodzą do detektora wiązki sygnałowej różnymi drogami, dzięki odpowiednim zwierciadłom. Układ doświadczalny nie pozwala obserwatorowi stwierdzić, którą drogę wybiera foton przechodzący przez płytkę światłodzielącą wiązkę. Foton zachowuje się jak fala i po przejściu przez konwertery daje dwie wiązki sygnałowe i dwie wiązki bierne. Wiązki sygnałowe dają w detektorze obraz interferencyjny. Zauważmy, że fotony sygnałowe i bierne po wyjściu z konwertera nigdy nie spotykają się, ale wpadają do detektorów niezależnie od siebie.

Jednak jeżeli zablokuje się drogę, którą przechodzi jeden z fotonów biernych (komórka Pockelsa włączona), to obraz interferencyjny zostaje zniszczony. Jest to zadziwiające, ponieważ nie ingerowaliśmy w drogę żadnego z fotonów sygnałowych. Zmieniła się nasza wiedza o drodze fotonów. Teraz możemy ustalić, która drogą przechodził foton sygnałowy do detektora, przez porównanie jego czasu przebycia z czasem przebycia drugiego („niezablokowanego”) fotonu biernego. Foton już nie może dotrzeć do detektora obiema drogami jako fala, ale musi albo zatrzymać się „na przeszkodzie”, albo przejść jedną drogą jako cząstka.

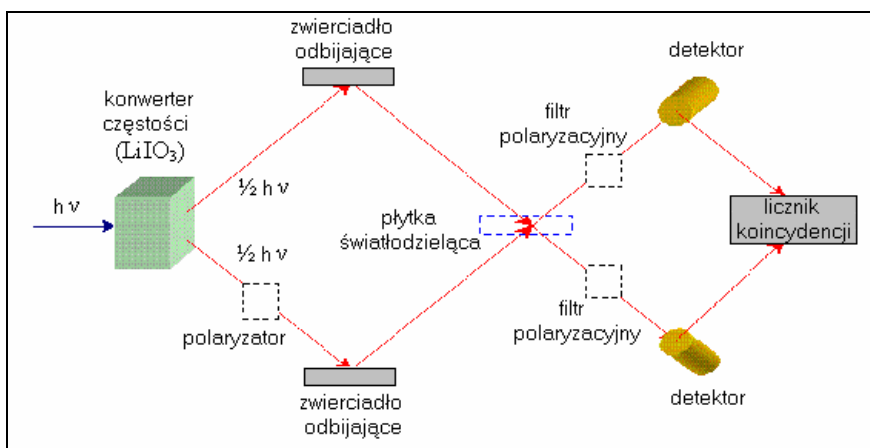
Jednoczesna detekcja fotonu sygnałowego i biernego wskazuje na to, że oba fotony pochodzą z fotonu odbitego przez rozszczepiacz wiązki, który przechodził przez konwerter 2. Wiemy więc, że do detektora fotonów sygnałowych dotarł foton sygnałowy z wiązki 2, który powstał przy przejściu przez konwerter 2.

Według interpretacji kopenhaskiej mechaniki kwantowej funkcja falowa opisuje naszą wiedzę o świecie. Zaburzenie funkcji falowej (destrukcja interferencji) jest spowodowane przez zmianę wiedzy eksperymentatora, czyli przez sprecyzowanie przebiegu przeprowadzanego eksperymentu. Funkcja falowa istnieje w pewnym stanie superpozycji „interferencja” i „brak interferencji” aż do chwili, kiedy ktoś chce to sprawdzić. Według interpretacji probabilistycznej (reprezentowanej np. przez R. Penrose’a) destrukcja funkcji falowej jest obiektywnym fizycznym zdarzeniem, które występuje niezależnie od pomiarów eksperymentatora.

4. Doświadczenie M.O. Scully’ego i K. Drühla – „kwantowa gumka”

Okazuje się, że wykonanie pomiaru nie niszczy bezpowrotnie obrazu interferencyjnego. Jeżeli skasujemy informację o drodze fotonu, to możemy znów odzyskać obraz interferencyjny. Eksperyment, który umożliwia pokazanie tego faktu, został zaprojektowany przez Marlana O. Scully’ego i Kai Drühla [13] i nazwano go

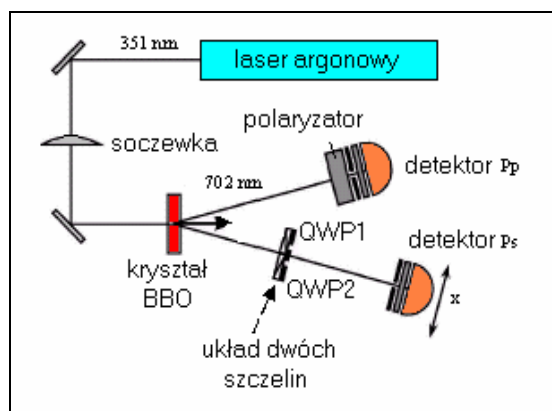
„kwantową gumką” (*quantum eraser*). Potwierdzający eksperyment sprawdzający przewidywania Scully’ego został przeprowadzony w 1994 roku przez grupę pracującą pod kierunkiem R.Y. Chiao na Uniwersytecie Berkeley (USA) [14]. Rys. 4 pokazuje schemat tego doświadczenia.



Rys. 4. Schemat układu doświadczenia M.O. Scully’ego i K. Drühla (na podstawie [14])

Różni się ono od poprzedniego doświadczenia tym, że pary splątanych fotonów wytwarzanych przez konwerter częstotliwości (LiIO_3) spotykają się ponownie w płytce światłodzieliącej i trafiają do dwóch detektorów. Mierzona jest częstość zliczeń obu detektorów (licznik koincydencji). Okazuje się, że układ zachowuje strukturę interferencyjną, co świadczy o falowym zachowaniu fotonów. Ciekawe jest, że gdy dodamy do układu urządzenie zmieniające polaryzację fotonów w ten sposób, aby stały się one rozróżnialne, to rejestrowany przez licznik koincydencji obraz interferencyjny znika. Po umieszczeniu w układzie doświadczenia filtrów polaryzacyjnych powodujących nierozróżnialność fotonów obraz interferencyjny zostaje przywrócony.

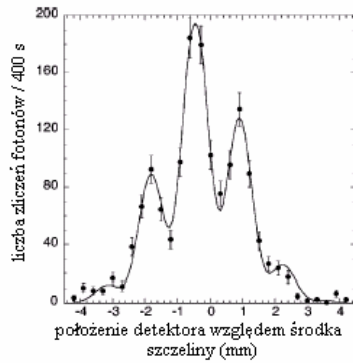
Do chwili obecnej zaprojektowano i przeprowadzono wiele doświadczeń z „kwantową gumką”. Jedno z nich jest opisane w pracy [15]. Schemat tego doświadczenia pokazuje rys. 5.



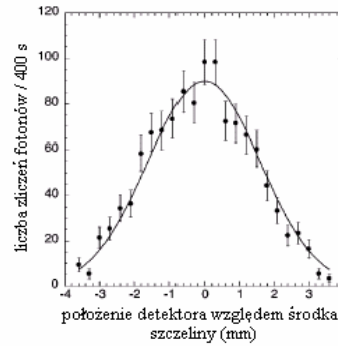
Rys. 5. Schemat doświadczenia z „kwantową gumką” (na podstawie [15])

Fotony emitowane przez laser argonowy o długości fali 351 nm przechodzą przez kryształ BBO, generujący w procesie parametrycznego podziału częstotliwości splątane fotony o długości fali 702 nm. Na drodze jednego fotonu jest ustawiona podwójna szczelina z ćwierćfalówkami¹ QWP1 i QWP2, a za nią detektor Ps. Na drodze drugiego fotonu jest ustawiony polaryzator liniowy, a za nim detektor Pp. Jeżeli ćwierćfalówki QWP1 i QWP2 oraz polaryzator są usunięte, to obserwujemy interferencję fotonu trafiającego do detektora Ps tzn. fotonu sygnałowego (rys. 6a). Jest to standardowy obraz interferencyjny w doświadczeniu Younga z podwójną szczeliną umieszczoną na drodze fotonu sygnałowego. Niesymetryczność obrazu interferencyjnego wynika z niesymetryczności układu dwóch szczelin. Po umieszczeniu ćwierćfalówek prawie cały obraz interferencyjny znika, gdyż możemy określić drogę, po której poruszał się foton sygnałowy (rys. 6b). Szczątkowa interferencja jest obecna z powodu małych błędów w wyrównywaniu ustawienia ćwierćfalówek. Jeżeli ustawimy polaryzator zgodnie z QWP1, to znowu pojawiają się prążki interferencyjne (rys. 6c). Podobnie się dzieje, gdy ustawimy polaryzator zgodnie z QWP2. Pojawiają się prążki interferencyjne symetryczne do poprzedniego przypadku (rys. 6d).

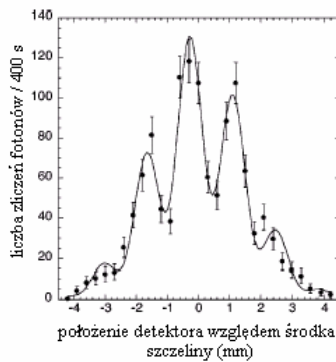
¹ Ćwierćfalówka jest to odpowiednio wycięta płytka z kryształu dwójłomnego o grubości tak dobranej dla danej długości fali świetlnej, że po przejściu fali przez płytkę powstaje różnica dróg optycznych $\frac{1}{4}$ i $\frac{3}{4}$ długości fali między dwoma promieniami (promieniem zwyczajnym i nadzwyczajnym). Ćwierćfalówka służy do zmiany monochromatycznego światła spolaryzowanego liniowo na spolaryzowane eliptycznie.



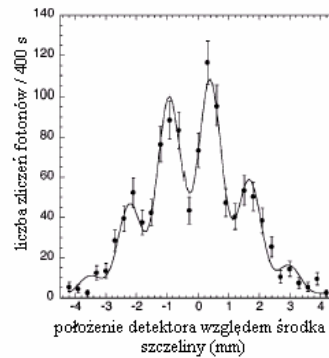
Rys. 6a. Ćwierćfalówki QWP1 i QWP2 są usunięte. Na ekranie detektora Ps występują prążki interferencyjne [15]



Rys. 6b. Ćwierćfalówki QWP1 i QWP2 są umieszczone przed podwójną szczeliną. Obraz interferencyjny na ekranie Ps znika [15]



Rys. 6c. Polaryzator jest ustawiony zgodnie z ćwierćfalówką QWP1. Na ekranie Ps pojawia się obraz interferencyjny [15]



Rys. 6d. Polaryzator jest ustawiony zgodnie z ćwierćfalówką QWP2. Na ekranie Ps pojawia się obraz interferencyjny (odwrotnie niż na rys. 6c) [15]

5. Wnioski

Odpowiednie ustawienie polaryzatora w układzie doświadczalnym powoduje wymazanie bądź uzyskanie informacji o drodze fotonu sygnałowego. Zauważmy, że suma obrazów interferencyjnych z rys. 6c i 6d daje obraz w przybliżeniu taki jak na rys. 6b. Autorzy eksperymentu przeprowadzili go również w wersji z opóźnionym wyborem, w którym interferujący foton trafiający do detektora Ps jest wykrywany wcześniej niż ten, który trafia do detektora Pp.

6. Podsumowanie

Opisywane doświadczenia interferencyjne ujawniają zadziwiające własności światła, które raz przejawia naturę falową, a w innych doświadczeniach wykazuje naturę korpuskularną. Powstaje pytanie, jaką naturę ma w rzeczywistości światło i od czego to zależy. Z przeprowadzonych doświadczeń interferencyjnych wynika, że światło jest wysyłane ze źródła w postaci fotonów i rejestrowane w detektorze w postaci fotonów. Natomiast pytanie, co dzieje się między źródłem a detektorem, traci sens, gdyż nie można przypisać realnego stanu cząstce. Możemy mówić jedynie o wynikach pewnych pomiarów uzyskanych podczas eksperymentów. Jak pisze Zeilinger [12], „możemy zrozumieć mechanikę kwantową, jeżeli uświadomimy sobie, iż nauka nie opisuje, czym jest przyroda, raczej stwierdza, co możemy o niej powiedzieć”.

Podziękowania

Pragnę wyrazić moją wdzięczność prof. dr. hab. Andrzejowi Majhoferowi i dr. hab. Zygmuntowi Szeplińskiemu za życzliwe zainteresowanie i pożyteczne wskazówki.

Literatura

- [9] J. Gribbin, *W poszukiwaniu kota Schrödingera*, Wydawnictwo Zysk i S-ka, Poznań, 1997.
- [10] Z.Y. Ou, L. Mandel, *Further Evidence of Nonclassical Behavior in Optical Interference*, Phys. Rev. Lett. **62**, 2941, 1989.
- [11] P.G. Kwiat, K. Mattle, H. Weinfurter, A. Zeilinger, *New high-intensity source of polarization-entangled photon pairs*, Phys. Rev. Lett. **75**, 4337, 1995.
- [12] A. Zeilinger, *Kwantowa teleportacja*, Świat Nauki **7**, 24, 2000.
- [13] M.O. Scully, K. Drühl, *Quantum eraser: A proposed photon correlation experiment concerning observation and „delayed choice” in quantum mechanics*, Phys. Rev. A **25**, 2208, 1982.
- [14] A.M. Steinberg, P.G. Kwiat, R.Y. Chiao, *Dispersion cancellation in a measurement of the single photon propagation velocity in glass*, Phys. Rev. Lett. **68**, 2421, 1992.
- [15] S.P. Walborn, M.O. Terra Cunha, S.S. Pádua, C.H. Monken, *Double-slit quantum eraser*, Phys. Rev. A, **65**, 033818, 2002.