

Jedyna tajemnica mechaniki kwantowej

Tadeusz Pabjan

Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych, Kraków

Uniwersytet Papieski Jana Pawła II

The only mystery of quantum mechanics

Abstract

The double slit experiment is a relatively simple physical test that can be useful for demonstrating the corpuscular-wave dualism of light and matter, which is the supreme mystery of the whole quantum physics. A particular riddle here is especially the mechanism responsible for the formation of an interference pattern in a situation when single quantum objects pass through the experimental setup. In the article the main idea of the experiment is discussed and two possible explanations of its results are briefly shortly presented: the view of the Copenhagen school and the de Broglie-Bohm's pilot wave theory.

Keywords:

philosophy of physics, philosophy of quantum mechanics, double-slit experiment, quantum mechanical phenomena.

W roku 2002 czytelnicy wydawanego przez Institute of Physics czasopisma „Physics World” zostali poproszeni o wytypowanie doświadczenia, któremu zostanie przyznane zaszczytne miano „najpiękniejszego eksperymentu fizyki”¹. Zadanie fizykom pytania dotyczącego piękna zapewne jeszcze nie tak dawno potraktowano by jako daleko posuniętą niestosowność, podczas gdy obecnie nikt nie ma już większych wątpliwości co do tego, że kategoria piękna również w fizyce może odgrywać rolę istotnego kryterium, które pozwala poprawnie ocenić spójność i użyteczność danego rozwiązania czy koncepcji, a niekiedy nawet – odróżnić rozwiązania i koncepcje poprawne od błędnych. Piękno przestaje być w tym przypadku jedynie wyznacznikiem kanonów estetycznych i staje się autentycznym i istotnym elementem samej metody naukowej. Przymiotnik „najpiękniejszy” obecny we wspomnianym pytaniu spełnia również rolę stopnia wyższego od przymiotnika „najważniejszy”: eksperyment „najpiękniejszy” w całej historii fizyki powinien być eksperymentem „w najwyższym stopniu najważniejszym” – to znaczy takim, który nie tylko jest kamieniem milowym w badaniach nad określonym zagadnieniem z zakresu fizyki, ale który z pewnych względów przewyższa swoją rangą inne, analogiczne doświadczenia z tej dziedziny. Jakie to mogą być względy? Wyniki takiego eksperymentu mogą na przykład prowadzić w konsekwencji do radykalnych zmian obrazu świata, który powstaje

¹ R.P. Crease, *The Most Beautiful Experiment*, „Physics World”, September 2002, s. 19–20.

w znacznej mierze z informacji uzyskiwanych właśnie za pośrednictwem teorii fizycznych. Z racji metodologicznych odróżnia się zazwyczaj „naukowy” i „filozoficzny” obraz świata. Wiele wskazuje na to, że wytyczenie wyraźnej granicy pomiędzy tymi obrazami jest tylko czysto teoretycznym postulatem, w praktyce bardzo trudnym, a może nawet całkowicie niemożliwym do zrealizowania, ale zakładając – przynajmniej na potrzeby dyskusji – że taki podział faktycznie istnieje, należy domniemywać, że wyniki „najpiękniejszego” eksperymentu będą mieć doniosłe konsekwencje dla obydwu tych obrazów.

1. Doświadczenie z podwójną szczeliną

W wyniku głosowania czytelników „Physics World” tytuł najpiękniejszego eksperymentu fizyki przyznano doświadczeniu z zakresu mechaniki kwantowej przedstawiającemu interferencję pojedynczych elektronów na podwójnej szczelinie, które w laboratorium zostało przeprowadzone po raz pierwszy w roku 1961 przez Clausa Jönssona² i które stanowi udoskonaloną wersję eksperymentu Thomasa Younga z początku XIX wieku, demonstrującego falową naturę światła³. Okazało

² C. Jönsson, *Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten*, „Zeitschrift für Physik” 1961, 161, s. 454–474; w przekładzie na język angielski: *Electron Diffraction at Multiple Slits*, „American Journal of Physics” 1974, 42, s. 4–11.

³ T. Young, *On the Theory of Light and Colours*, „Philosophical Transactions of the Royal Society of London” 1802, 92, s. 12–48; T. Young, *Experiments and Calculations Relative to Physical Optics*,

się, że interferujące elektrony zdeklasowały wszystkie wielkie doświadczenia znane z historii fizyki – m.in. te, dzięki którym znani są współcześnie Eratostenes, Galileusz, Newton, Michelson i Morley, Rutherford, Schrödinger i wielu innych sławnych uczonych. Dlaczego stosunkowo proste doświadczenie, polegające na przepuszczaniu pojedynczych elektronów przez przegrodę z podwójną szczeliną, fizycy uznali za eksperyment „najpiękniejszy”? Trafną i zarazem przekonującą odpowiedź na to pytanie można znaleźć u Richarda Feynmana, który w swoich *Wykładach z fizyki*⁴ zauważa, że w doświadczeniu tym jak w soczewce skupiają się i ujawniają wszystkie niezwykle i paradoksalne cechy mechaniki kwantowej; pozwala ono bowiem zaobserwować fenomen, który jest „absolutnie niemożliwy do wyjaśnienia na sposób klasyczny”. W fenomenie tym przejawia się sam rdzeń, sama istota mechaniki kwantowej. W rzeczywistości – pisze Feynman – zjawisko to „zawiera w sobie *jedyną* tajemnicę” tej teorii. Co istotne, tajemnicy tej nie można się pozbyć w żaden prosty sposób; w szczególności zaś nie usuwają jej próby „wyjaśnienia” wyniku eksperymentu proponowane przez przedstawicieli zarówno standardowej interpretacji teorii kwantowej, jak i jej interpretacji alternatywnych.

Czytelnicy tego artykułu zapewne dobrze znają wspomnianą powyżej wypowiedź Feynmana, ponieważ jest ona czę-

„Philosophical Transactions of the Royal Society of London” 1804, 94, s. 1–16.

⁴ R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, vol. 3, Addison-Wesley, Reading MA 1963.

sto przywoływana w różnego rodzaju opracowaniach dotyczących interpretacyjnych problemów mechaniki kwantowej. Za Feynmanem rozpoczyna się w nich dyskusję nad najtrudniejszymi zagadnieniami tej teorii od zaprezentowania prostego eksperymentu, który pozwala od razu przejść do sedna sprawy i – pomijając wiele szczegółów „technicznych” – w stosunkowo łatwy sposób ukazać najważniejsze problemy tej matematycznie i konceptualnie zaawansowanej teorii fizycznej. Autor niniejszego opracowania odwołuje się w tym miejscu do argumentu Feynmana nie dlatego, że ma zamiar rozpoczynać wykład mechaniki kwantowej, ale ponieważ chce uniknąć ewentualnego zarzutu dotyczącego niepotrzebnego epatowania tajemnicą, w sytuacji gdy mowa o tak „prostym” doświadczeniu. Jeśli fizyk tej klasy co Feynman – którego z całą pewnością można uznać za autorytet w kwestiach dotyczących mechaniki kwantowej – określa wynik eksperymentu z podwójną szczeliną mianem „jedyniej tajemnicy” tej teorii, to należy założyć, że wypowiedź ta nie jest jedynie dobrze brzmiącym, lecz niewiele znaczącym hasłem, ale stwierdzeniem, za którym kryje się problem o fundamentalnym znaczeniu dla poprawnej interpretacji fizyki kwantowej.

Na czym polega tajemnica, o której wspomina Feynman? Eksperyment z podwójną szczeliną ujawnia przede wszystkim – oprócz wszystkich innych niezwykłych własności świata kwantowego – dualną naturę „światła i materii”⁵. Występujący

⁵ R.P. Feynman, *QED: The Strange Theory of Light and Matter*, Princeton University Press, Princeton 1988.

w poprzednim zdaniu cudzysłów obejmuje dwa stosowane często w żargonie fizyków pojęcia, które co prawda są intuicyjnie oczywiste, ale przy bliższej analizie okazują się wyjątkowo mało precyzyjne. Słabość ta charakteryzuje zwłaszcza drugie z wymienionych pojęć: „materia” jest terminem ze słownika filozoficznego i nie ma swojej definicji operacyjnej (nie ma jednostek, w których można byłoby „mierzyć” materię), a interpretacyjne problemy z tym pojęciem ujawniają się natychmiast, gdy zastąpi się je najbliższym jej określeniem, które ma sens operacyjny, to znaczy terminem „masa” (lub równoważną masie „energiją”), i gdy próbuje się przy pomocy tego podstawienia zbudować zwrot „dualizm korpuskularno-falowy masy (energii)”. Niejednoznaczność tego określenia jest duża, a poprawność logiczna wątpliwa. Aby uniknąć konieczności przeprowadzania drobiazgowych analiz semantycznych i zarazem ustrzec się zarzutu nieścisłości terminologicznej, lepiej w tym przypadku mówić o dualizmie korpuskularno-falowym „obiektów kwantowych”. Zarówno fotony, będące kwantami światła, jak i elektrony (a także protony, neutrony, atomy, a nawet całe molekuly) reprezentujące „materię”, podpadają bowiem pod kategorię „obiektów”, które stosując się do praw obowiązujących w świecie kwantowym, wykazują dualną – to znaczy korpuskularno-falową – naturę. W pierwszym przypadku (własności korpuskularne) przejawia się ona dobrze określoną lokalizacją danego obiektu i możliwością ustalenia jego pędu, w drugim (własności falowe) – zdolnością do ulegania dyfrakcji i interferencji. Istotne jest tu zwłaszcza drugie z tych zjawisk ze względu

na stosunkowo łatwy sposób jego zaobserwowania: na skutek nakładania się fal o stałej różnicy faz pojawia się charakterystyczny obraz interferencyjny, stanowiący niepodważalny dowód na to, że w danym eksperymencie ujawnia się falowa natura badanych obiektów.

2. Cząstki czy fale?

Układ doświadczalny konieczny do przeprowadzenia eksperymentu z podwójną szczeliną jest na tyle prosty⁶, że czytelnikom tego artykułu nie trzeba go szczegółowo opisywać; najważniejsze jego elementy to działło elektronowe, przegroda z podwójną szczeliną i detektor odgrywający rolę ekranu, który umożliwia obserwację przybywających ze źródła cząstek. Każdy z elektronów po spotkaniu z detektorem zostaje zarejestrowany jako dobrze zlokalizowany jasny punkt świetlny. Pojawiający się na ekranie detektora obraz interferencyjny, zbudowany z punktów świetlnych pozostawionych przez poszczególne elektrony, stanowi najlepszą ilustracją tego, czym w swej istocie jest dualizm korpuskularno-falowy: obiekty kwantowe – w tym

⁶ F.P. Miller, A.F. Vandome, J. McBrewster, *Double-Slit Experiment*, Alphascript Publishing 2009; O. Donati, G.F. Missiroli, G. Pozzi, *An Experiment on Electron Interference*, „American Journal of Physics” 1973, 41, s. 639–644; O. Nairz, M. Arndt, A. Zeilinger, *Quantum Interference Experiments with Large Molecules*, „American Journal of Physics” 2003, 71, s. 319–325.

przypadku elektrony – poruszają się jak fale (o tym świadczy niezbicie obecność wzoru interferencyjnego), ale rozpoczynają swoją podróż i kończą ją jako cząstki (za tym przemawia to, że każdy z elektronów opuszcza źródło jako dyskretna korpuskuła i uderza w określone miejsce na ekranie, dając pojedynczą plamkę świetlną). Sprzeczność z intuicją makroskopową jest bezpośrednia – w świecie obiektów znanych z fizyki klasycznej tak pojęty dualizm nie zachodzi – ale to jeszcze nie ona stanowi „jedyną tajemnicę” mechaniki kwantowej. Tajemnica ta ujawnia się dopiero wtedy, gdy działo elektronowe zostanie zmuszone do wysyłania w kierunku podwójnej szczeliny pojedynczych elektronów, które stopniowo, jeden po drugim, docierają do ekranu, tworząc na nim obraz interferencyjny⁷. W przypadku dużej ilości cząstek, które jednocześnie przechodzą przez zestaw eksperymentalny i docierają do detektora, powstawanie wzoru interferencyjnego można zawsze tłumaczyć wzajemnym oddziaływaniem poszczególnych cząstek lub związanych z tymi cząstkami fal de Broglie’a. Jeśli jednak elektrony przebiegają przez aparaturę pojedynczo, jeden za drugim, i jeśli na ekranie detektora wzór interferencyjny wyłania się stopniowo, w miarę przybywania plamek świetlnych odpowiadających poszczególnym elektronom, to takie wyjaśnienie przestaje wystarczać.

⁷ A. Tonomura, J. Endo, T. Matsuda, T. Kawasaki, *Demonstration of Single-electron Buildup of an Interference Pattern*, „American Journal of Physics” 1989, 57, s. 117–120.

„Jedyna tajemnica” mechaniki kwantowej nie daje się łatwo ubrać w słowa i zamknąć w jednoznacznych i w miarę precyzyjnych sformułowaniach – tym bardziej że chodzi w tym przypadku o nadanie interpretacji zjawiskom kwantowym, do których zdroworozsądkowe kategorie języka naturalnego (a właśnie takiego języka używa się do tego celu) stosują się w bardzo ograniczonym zakresie. Stąd też w następnych zdaniach znajdują się określenia ujęte w cudzysłowie lub poprzedzane zwrotami „jakby” lub „w pewnym sensie”. Zabieg ten ma za zadanie wykluczenie literalnego sensu zdań sformułowanych w języku naturalnym, ale zarazem umożliwienie takiego opisu dziwnego zachowania obiektów kwantowych, który przynajmniej w pewnym zakresie będzie zrozumiały i pozwoli czytelnikowi lub słuchaczowi jeśli nie zrozumieć, to przynajmniej w pewien sposób wyobrazić sobie zjawisko, o którym mowa. W następnym akapicie zostanie krótko wspomniane stanowisko szkoły kopenhaskiej, zgodnie z którym tego typu „zrozumienie” w ogóle nie jest możliwe, a jakiegokolwiek próby „wyobrażania sobie” tego, co dzieje się z obiektami kwantowymi (przed momentem pomiaru), są pozbawione większego sensu; zakładając jednak – przynajmniej na potrzeby niniejszej dyskusji – że nawet nieudolne „próby zrozumienia” tego fenomenu mają pewną wartość poznawczą, należy zauważyć co następuje:

Powstanie wzoru interferencyjnego w sytuacji, w której przez układ doświadczalny przebiegają pojedyncze obiekty kwantowe (odpowiednie doświadczenia przeprowadzono z wykorzystaniem elektronów, fotonów, neutronów, protonów,

a nawet całych atomów i wieloatomowych molekuł⁸), świadczy o tym, że każdy tego typu obiekt w pewnym sensie przechodzi jednocześnie przez obydwa otwory i interferuje sam ze sobą. Jako że obraz interferencyjny powstaje stopniowo – cząstki uderzają w ekran detektora jedna po drugiej – należy również uznać, iż obiekty kwantowe „znają” zarówno przeszłość, jak i przyszłość układu doświadczalnego, w którym się znajdują: każda z nich, rozpoczynając swoją podróż w stronę detektora, musi „wiedzieć”, w które miejsce ekranu uderzyły cząstki biegnące wcześniej, i w które miejsce uderzą cząstki biegnące później – tak, by każda cząstka mogła w odpowiednim miejscu ekranu wnieść swój własny wkład do obrazu interferencyjnego. Jakiegokolwiek próby „podglądnięcia”, którą szczeliną przedostaje się obiekt – polegające np. na ustawieniu detektorów przed przegrodą – niszczą wzór interferencyjny. Wzór ten nie pojawia się również wtedy, gdy detektor ustawiony jest pomiędzy przegrodą i ekranem (tzw. eksperyment z opóźnionym wyborem). Obiekty kwantowe najwyraźniej „wiedzą”, że są obserwowane, a nawet – że zostaną zaobserwowane w przyszłości: skoro w eksperymentach z opóźnionym wyborem nie pojawia się obraz interfe-

⁸ O. Nairz, M. Arndt, A. Zeilinger, *Quantum Interference...*, *op. cit.*; I. Estermann, O. Stern, *Beugung von Molekularstrahlen*, „Zeitschrift für Physik” 1930, 61, s. 95–125; R. Colella, A.W. Overhauser, S.A. Werner, *Observation of Gravitationally Induced Quantum Interference*, „Physical Review Letters” 1975, 34, s. 1472–1474; C. Moskovitz, *Largest Molecules Yet Behave Like Waves in Quantum Double-Slit Experiment*, „LiveScience”, 25 III 2012, <http://www.livescience.com/19268-quantum-double-slit-experiment-largest-molecules.html>.

rencyjny, to znaczy, że obiekty te już przed „podjęciem decyzji” dotyczącej wyboru jednej z dwu szczelin muszą „wiedzieć”, że iż za przegrodą czeka na nie detektor, którego zadaniem jest poinformowanie eksperymentatora o „wyborze” dokonany przez cząstkę.

Czy wynik eksperymentu z podwójną szczeliną faktycznie zasługuje na nobilitujące miano tajemnicy? Zapewne tak. O tym, że wyjaśnienie zachowania obiektów kwantowych rzeczywiście jest kłopotliwą zagadką, może świadczyć chociażby nieproporcjonalnie wielka liczba wyrażen ujętych w cudzysłowie, która pojawia się w każdym opracowaniu dotyczącym tego doświadczenia (wyrażen takich nie zabrakło również w powyższym akapicie). Uciekanie się do przenośni i porównań, przy jednoczesnej niemożności precyzyjnego sformułowania wniosków dotyczących interpretacji tego zagadnienia, jest wyrazem pewnej bezradności każdego, kto próbuje przedstawić wynik tego eksperymentu w zrozumiały dla słuchaczy lub czytelników sposób. Bezradność ta bierze się w znacznej mierze stąd, że opisywana rzeczywistość układu kwantowego w najwyższym stopniu nie przystaje do zdroworozsądkowych kategorii świata makroskopowego, opartych na logice dwuwartościowej.

3. Próby wyjaśnienia dualizmu

Chociaż „jedyną tajemnicą” mechaniki kwantowej nie można się pozbyć w żaden łatwy sposób, to jednak próby wyjaśnienia doświadczenia z podwójną szczeliną były podejmowane na długo przed rokiem 1961 – to znaczy wtedy, gdy doświadczenie to nie zostało jeszcze przeprowadzone w laboratorium, ale miało status eksperymentu myślowego. Skrótowy charakter tego niżej opisanego opracowania decyduje o tym, że spośród wielu tego typu prób w tym miejscu zostaną wspomniane tylko dwie: interpretacja szkoły kopenhaskiej i teoria fali pilotującej de Broglie’a-Bohma.

Jednym ze stosunkowo najprostszych sposobów uniknięcia dyskusowanych trudności jest przyjęcie stanowiska szkoły kopenhaskiej, zgodnie z którym należy w ogóle zrezygnować z zadawania pytań dotyczących zachowania obiektów kwantowych w czasie trwania eksperymentu (pomiędzy źródłem i detektorem), ponieważ niczego sensownego na ten temat po prostu nie można powiedzieć. Standardowa interpretacja mechaniki kwantowej wyklucza sytuację, w której daje się precyzyjnie ustalić trajektorię cząstki, a zatem pytanie o to, którą (którą szczeliną) biegła cząstka, jest pytaniem niepoprawnie zadaniem. Sensownie można mówić jedynie o wynikach obserwacji, a nie o tym, co dzieje się z obiektem kwantowym przed momentem pomiaru. Czołowy przedstawiciel szkoły kopenhaskiej, Werner Heisenberg, wyrażał tę intuicję następująco: „Przejsie od »tego co możliwe« do »tego co rzeczywiste« dokonuje się pod-

czas aktu obserwacji. Jeśli chcemy opisać przebieg zdarzenia w świecie atomów, musimy zdać sobie sprawę z tego, że słowo »zachodzi« może dotyczyć tylko aktu obserwacji, nie zaś sytuacji między dwiema obserwacjami⁹. Jak widać, rozwiązanie to w rzeczywistości nie dostarcza żadnego wyjaśnienia dyskutowanego problemu; zawiera jedynie – *nota bene* mało przekonujący – argument za tym, że wyjaśnienia w ogóle nie należy poszukiwać. Pod adresem tego typu filozofii, która nie przypisuje żadnej „fizycznej rzeczywistości” obiektom kwantowym przed momentem pomiaru, swoje krytyczne uwagi od dawna wypowiadało bardzo wielu autorów; dla porządku warto w tym miejscu przywołać wymowną opinię jednego z nich – Rogera Penrose’a – który pisze na ten temat: „Uważam, że w mechanice kwantowej zagadnienie »rzeczywistości« musi zostać podjęte – szczególnie w sytuacji, gdy wielu fizyków raczej uważa, iż formalizm kwantowy znajduje uniwersalne zastosowanie w całej fizyce – albowiem gdyby nie istniała rzeczywistość kwantowa, wówczas w ogóle nie można by mówić o rzeczywistości na jakimkolwiek poziomie. Według mnie negowanie rzeczywistości w taki sposób pozbawione byłoby sensu”¹⁰.

Wydaje się, że spośród wielu alternatywnych – względem stanowiska szkoły kopenhaskiej – prób wyjaśnienia wyniku

⁹ W. Heisenberg, *Physics and Philosophy. The Revolution in Modern Science*, Penguin Books, London 2000.

¹⁰ R. Penrose, *Droga do rzeczywistości. Wyczerpujący przewodnik po prawach rządzących Wszechświatem*, przeł. J. Przystawa, Prószyński i S-ka, Warszawa 2006.

eksperymentu z podwójną szczeliną na szczególną uwagę zasługuje rozwiązanie zaproponowane pierwotnie przed Louisa de Broglie'a, a następnie rozwinięte przez Davida Bohma¹¹. Rozwiązanie to stanowi jedną z teorii ukrytych parametrów, i jest powszechnie znane pod nazwą teorii fali pilotującej. Nie odmawia ono fizycznej realności obiektom kwantowym i pozwala przy opisie diskutowanego doświadczenia do minimum zredukować wyrażenia ujęte w cudzysłowie – co oznacza, że „jedyna tajemnica” mechaniki kwantowej zyskuje w tym przypadku naturalną, a może nawet zdroworoządkową interpretację. Z godnie z koncepcją de Broglie'a-Bohma z każdym obiektem kwantowym jest związana fala pilotująca, która stanowi pole fizyczne będące hybrydą klasycznego pola potencjalnego i tzw. potencjału kwantowego. Stowarzyszona z cząstką fala zawsze przechodzi przez obydwie szczeliny przesłony (jak to jest w naturze fali), natomiast cząstka zawsze przechodzi przez tylko jedną szczelinę (jak to jest w naturze cząstki). Podstawowe zadanie potencjału kwantowego polega w tym przypadku na „pilotowaniu” cząstki do tych miejsc ekranu, w których prawdopodobieństwo określone przez kwadrat modułu funkcji falowej jest duże, i utrzymywania z daleka od tych miejsc, w których $|\psi|^2$ jest małe. Spełnianie tej funkcji jest możliwe dlatego, że potencjał kwantowy cząstki zależy od całościowej (holistycznej) struktury układu, to znaczy zawiera informacje o otwartych

¹¹ D. Bohm, *A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables*, „Physical Review” 1952, 85, s. 166–193.

szczelinach, obecnych w układzie detektorach, itp. To właśnie dzięki temu każda pojedyncza cząstka wnosi swój własny wkład do wzoru interferencyjnego na ekranie detektora. Co istotne, każda cząstka podąża w stronę ekranu precyzyjnie określoną trajektorią, którą można wyliczyć, a wszystkie trajektorie układają się za otworami przesłony w taki sposób, że w zespole statystycznym powstaje wzór interferencyjny¹².

4. Zamiast podsumowania

Czy teoria fali pilotującej de Broglie’a-Bohma faktycznie dostarcza satysfakcjonującego wyjaśnienia „jedynej tajemnicy” mechaniki kwantowej? Żeby się o tym przekonać, należałoby zapewne przeprowadzić ankietę podobną do tej, która została wspomniana na początku tego artykułu, ale wiele wskazuje na to, że sceptycyzm wobec teorii ukrytych parametrów, w której na dodatek występują oddziaływania nielocalne, zdecydowałby o tym, iż niewielu fizyków przychyliłoby się do twierdzącej odpowiedzi na to pytanie. John S. Bell – gorący zwolennik tej interpretacji mechaniki kwantowej – zauważa jednakże z przekąsem, że brak zainteresowania świata naukowego teorią de Broglie’a-Bohma jest tajemnicą równie wielką jak wynik doświadczenia z podwójną szczeliną: „Ta idea

¹² C. Philippidis, C. Dewdney, B.J. Hiley, *Quantum Interference and the Quantum Potential*, „Nuovo Cimento” 1979, 52B, s. 15–28.

wyduje mi się mi tak naturalna i prosta, i w tak jasny zwyczajny sposób wydaje się rozwiązywać dylemat korpuskularno-falowy, że jest dla mnie ogromną tajemnicą to, że została ona tak powszechnie zignorowana”¹³.

Dobrym zwyczajem jest spoglądanie okiem chłodnego sceptyka na dyskusje dotyczące interpretacyjnych problemów współczesnej nauki, w których pojawia się słowo „tajemnica”. Pojęcie to nosi wszelkie znamiona „wtrętu metafizycznego”, który nie powinien się pojawiać w nauce, a w szczególności w fizyce. To, że pojawia się ono w samym sercu mechaniki kwantowej, będącej jedną z dwóch fundamentalnych teorii fizycznych, zakrawa na ironię. Motywem przewodnim tego opracowania była wypowiedź Richarda Feynmana i warto na zakończenie przywołać jeszcze jeden argument tego autora zawierający istotną rację, dla której warto było dokładnie przeanalizować doświadczenie z podwójną szczeliną: „Rozważamy tylko ten jeden eksperyment, który został zaprojektowany w taki sposób, aby zawrzeć w sobie całą tajemnicę mechaniki kwantowej (...). Każdą inną trudność tej teorii można zawsze wyjaśnić, mówiąc »Pamiętacie przypadek eksperymentu z podwójną szczeliną? Tu chodzi dokładnie o to samo«.”¹⁴.

¹³ J.S. Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics. Collected Papers on Quantum Philosophy*, Cambridge University Press, Cambridge 2004.

¹⁴ R. Feynman, *The Character of Physical Law*, The MIT Press, Cambridge–London 1985.

Bibliografia

- J.S. Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics. Collected Papers on Quantum Philosophy*, Cambridge University Press, Cambridge 2004.
- D. Bohm, *A suggested interpretation of the quantum theory in terms of 'hidden' variables*, „Physical Review” 1952, 85, s. 166–193.
- R. Colella, A. W. Overhauser, S. A. Werner, *Observation of Gravitationally Induced Quantum Interference*, „Physical Review Letters” 1975, 34, s. 1472–1474.
- R.P. Crease, *The most beautiful experiment*, „Physics World”, September 2002, s. 19–20.
- O. Donati, G. F. Missiroli, G. Pozzi, *An Experiment on Electron Interference*, „American Journal of Physics” 1973, 41, s. 639–644.
- I. Estermann, O. Stern, *Beugung von Molekularstrahlen*, „Zeitschrift für Physik” 1930, 61, s. 95–125.
- R.P. Feynman, *The Character of Physical Law*, The M.I.T. Press, Cambridge – London 1985.
- R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, vol. 3, Addison-Wesley, Reading MA 1963.
- R.P. Feynman, *QED: The Strange Theory of Light and Matter*, Princeton University Press, Princeton 1988.
- W. Heisenberg, *Physics and Philosophy. The Revolution in Modern Science*, Penguin Books, London 2000.

- C. Jönsson, *Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten*, „Zeitschrift für Physik” 1961, 161, s. 454–474; w przekładzie na j. angielski: *Electron Diffraction at Multiple Slits*, „American Journal of Physics” 1974, 42, s. 4–11.
- F.P. Miller, A.F. Vandome, J. McBrewster, *Double-Slit Experiment*, Alphascript Publishing 2009.
- C. Moskowicz, *Largest Molecules Yet Behave Like Waves in Quantum Double-Slit Experiment*, „LiveScience”, <http://www.livescience.com/19268-quantum-double-slit-experiment-largest-molecules.html>, (dostęp: 25.03.2012).
- O. Nairz, M. Arndt, A. Zeilinger, *Quantum interference experiments with large molecules*, „American Journal of Physics” 2003, 71, s. 319–325.
- R. Penrose, *Droga do rzeczywistości. Wyczerpujący przewodnik po prawach rządzących Wszechświatem*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2006.
- C. Philippidis, C. Dewdney, B.J. Hiley, *Quantum interference and the quantum potential*, „Nuovo Cimento” 1979, 52B, s. 15–28.
- A. Tonomura, J. Endo, T. Matsuda, T. Kawasaki, *Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern*, „American Journal of Physics” 1989, 57, s. 117–120.
- T. Young, *Experiments and calculations relative to physical optics*, „Philosophical Transactions of the Royal Society of London” 1804, 94, s. 1–16.
- T. Young, *On the theory of light and colours*, „Philosophical Transactions of the Royal Society of London” 1802, 92, s. 12–48.