

Eksperyment Macha-Zendera, o którym opowiadałem w poprzednim odcinku początkującym fizykom, otwiera oczy na zupełnie nową klasę zjawisk zachodzących w mikroświecie. Pokazuje on, że na zachowanie obiektów kwantowych (w tym przypadku fotonu) znajdujących się w pewnym obszarze przestrzeni olbrzymi wpływ ma to, co dzieje się w miejscu, gdzie cząstka na pewno się nie znajduje. Z jednej strony prowadzi to do zdumiewających paradoksów myślowych. Z drugiej okazuje się bardzo pożyteczne...



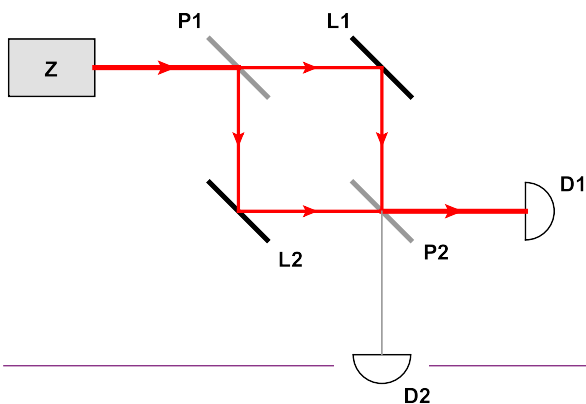
Tomasz Sowiński jest asystentem w Centrum Fizyki Teoretycznej PAN. W 2005 roku skończył z wyróżnieniem studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w zakresie fizyki teoretycznej, a trzy lata później uzyskał tam stopień naukowy doktora. Od lat zajmuje się popularyzacją nauk przyrodniczych. W roku 2008 otrzymał tytuł Mistrza Popularyzacji Nauki „Złoty Umysł” w konkursie Prezesa Polskiej Akademii Nauk.

Tajemne zdolności fotonu cz. II

Tomasz Sowiński

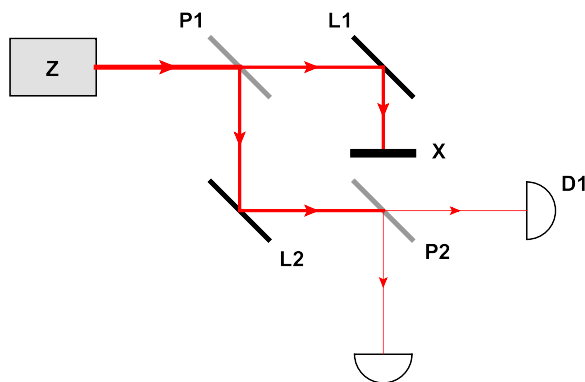
EKSPERYMENT MACHA-ZENDERA RAZ JESZCZE

Dla porządku przypomnijmy krótko, na czym polega ekperyment Macha-Zendera. W tym celu posłużmy się schematem, który już wcześniej omawialiśmy w szczegółach:



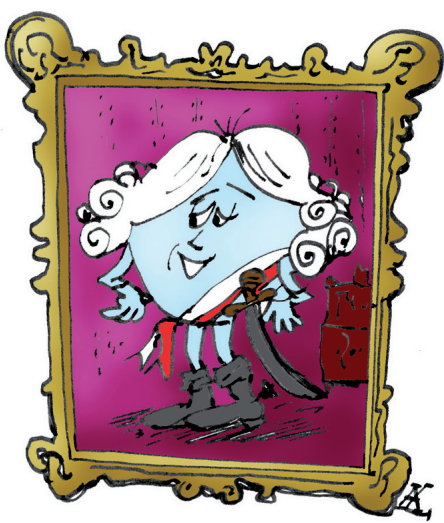
W tym eksperymencie światło laserowe wysyłane jest ze źródła Z i na płytce światłodzielącej P1 jest rozszczepiane na dwa promienie – jeden odbija się od płytki i leci „dolną” trajektorią, a drugi przechodzi na drugą stronę i leci „górną” trajektorią. Następnie oba promienie są odbijane od lusterek (odpowiednio L1 i L2) i trafiają na tę samą płytkę światłodzielącą P2. Jak pamiętamy z poprzednich rozważań, jeśli tylko wszystkie ramiona interferometru Macha-Zendera są równe, to w wyniku takiego eksperymentu całe światło trafia do detektora D1.

Sytuacja dramatycznie się zmienia, jeśli tylko w jednym z ramion interferometru postawimy przeszkodę X pochłaniającą padające na nią światło. Wtedy sytuacja wygląda tak jak na poniższym schemacie:



Ekperyment pokazuje, że w takiej sytuacji połowa światła zostaje zaabsorbowana przez przeszkodę. Pozostała część światła dokładnie po połowie dzieli się pomiędzy detektory D1 i D2.

Szczegółowy opis, dlaczego tak się dzieje, zawarty był w poprzednim odcinku (MT 08/2009) i zainteresowanego Czytelnika zachęcam do lektury. W tym miejscu chciałbym tylko przypomnieć konkluzję, do jakiej doszliśmy. Otóż, jeśli próbujemy wytłumaczyć wynik tych eksperymentów na podstawie ziarnistej natury promieniowania (obraz fotonowy), to dochodzimy do wniosku, że pojedynczy foton, który na płytce P1 odbija się i poleci „dolną” drogą (prawdopodobieństwo tego zdarzenia jest równe 1/2), uzależnia swój dalszy los od tego, czy na „górną” trajektorii jest przeszkoda, czy jej nie ma. Jeśli przeszkody nie ma, to zawsze przelatuje na drugą stronę płytki P2 do detektora D1. Jeśli przeszkoda jest, to na płytce P2 losu-

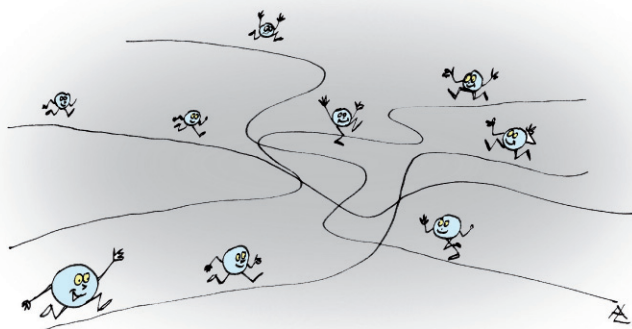


obraz fotonowy

RÓWNOCZEŚNIE WIELOMA DROGAMI

Wynik eksperymentu Macha-Zendera, a właściwie próba wyjaśnienia go za pomocą ziarnistej natury promieniowania, jest bardzo zaskakujący. Niektórzy fizycy próbowali forsować tezę, że jest to bezpośredni dowód na to, że pojęcie klasycznej trajektorii fotonu jest pozbawione sensu. Rzeczywiście, jeśli odrzucimy choćby na chwilę myśl, że foton w każdej sytuacji jest w konkretnym miejscu, a przyjmiemy, że może poruszać się wszystkimi możliwymi ścieżkami równocześnie, to sprawa troszkę się rozwiązuje sama. Wtedy rzeczywiście foton, jako obiekt, którego „trajektoria” jest bardzo rozmyta, ma szansę sam sprawdzić drożność wszystkich możliwych dróg klasycznych i tym samym sam zdecydować, jak dalej postąpić.

W takim opisie foton traci oczywiście tę fundamentalną cechę, jaką ma cząstka – położenie. Zysk jest jednak wielki, bo rozwiązuje ten, wydawałoby się nierozwiązywalny, paradoks logiczny. Dzięki temu, że foton porusza się wszystkimi ścieżkami równocześnie, może sprawdzić, jaka jest sytuacja w poszczególnych ramionach interferometru.



foton porusza się wszystkimi ścieżkami równocześnie

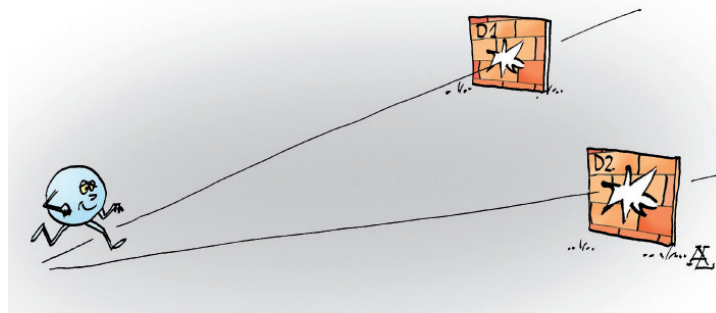
JEDNĄ DROGĄ, ALE NIE WIADOMO, KTÓRA

Można też eksperyment Macha-Zendera zinterpretować troszkę mniej restrykcyjnie. Oto można powiedzieć, że foton za każdym razem wybiera jedną konkretną trajektorię – od źródła, aż po detektory wykonujące pomiar. Cała trajektoria jest jakby wybiera-

je swój wybór i z prawdopodobieństwem $1/2$ trafia do detektora D1 lub detektora D2. Wygląda to zatem tak, jakby czuł na odległość, jaka jest sytuacja w miejscu, do którego nie ma dostępu – w miejscu, gdzie może być ustawiona przeszkoda.

na już na samym początku, gdy eksperyment dopiero się rozpoczyna. Foton nie decyduje na każdej płycie światłodzielącej, co zrobić, dopiero jak do niej dotrze, ale już od samego początku jest to zdeterminowane. Jedyne, czego nie wiadomo, to którą ścieżkę foton w danej realizacji eksperymentu wybierze. To, co jest wiadome, to prawdopodobieństwo wybrania każdej ze ścieżek. Ono jest bowiem wyznaczone przez sam układ doświadczalny.

Jeśli zatem przeszkody nie ma, to układ eksperymentalny wyznacza prawdopodobieństwo „górną” i „dolną” ścieżki na 50%. Jest tak jednak tylko wtedy, gdy każda z tych ścieżek prowadzi do detektora D1. Gdy prowadzi do detektora D2, to prawdopodobieństwo ustala na 0.



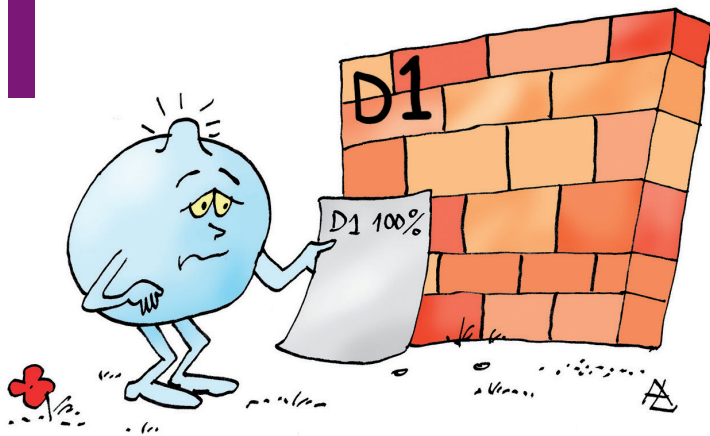
prawdopodobieństwo „górną” i „dolną” ścieżki 50%

Jeśli natomiast przeszkoda jest ustawiona, to „górną” ścieżka dostaje prawdopodobieństwo 50%, a dolne prowadzące do D1 i do D2 po 25%. W momencie wysłania fotonu jest po prostu wybierana jedna z tych ścieżek z odpowiednim prawdopodobieństwem. W tej interpretacji mechaniki kwantowej w każdym pojedynczym eksperymencie trajektoria fotonu jest ściśle określona, ale nie jest wiadome, która w danej sytuacji jest realizowana. Jest natomiast od samego początku wiadome, które ścieżki są wykluczone, a które mniej lub bardziej prawdopodobne. Bo to wyznacza sam układ doświadczalny.

MÓWIĆ O TYM, CO SIĘ WIE NA PEWNO

Takie podejście jest chyba bardziej rozsądne od poprzedniego. Nadal jednak nie potrafimy rozstrzygnąć, którą ścieżką leciał foton. Skoro w eksperymencie bez przeszkody trafia on zawsze do detektora D1, niezależnie którą ścieżką leciał, to nie mamy żadnej możliwości sprawdzenia, którą drogą podążał. Każda bowiem próba ustawienia detektora na ścieżce sprawia, że zmienia się sytuacja na eksperymencie z przeszkodą i tym samym zmieniają się prawdopodobieństwa.

Dlatego naturalną konsekwencją takiego podejścia jest pójść jeszcze dalej i zupełnie zrezygnować z pojęcia trajektorii. Skoro i tak jest ona niewykrywalna, to nie ma żadnego uzasadnionego powodu, dla którego mielibyśmy kreować taki byt. W konsekwencji dochodzimy do tzw. minimalistycznej interpretacji mechaniki kwantowej. Według niej jedyną rzeczą mierzalną jest to, co pokazują detektory. Wiemy, że



uderzenie w detektor D1 = 100%, uderzenie w D2 = 0%

foton wyleciał ze źródła i że dotarł do konkretnego detektora lub uderzył w przeszkodę. Wiemy to, bo potrafimy to zmierzyć. Układ doświadczalny zaś determinuje, jakie jest prawdopodobieństwo, że foton wystrzelony ze źródła Z uderzy w detektor D1 czy D2. Nie ma tu ani słowa o trajektorii. Postępujemy się tylko tym, co wiemy na pewno. Jeśli zatem nie ma przeszkody, to prawdopodobieństwo ustalone jest wg reguły: uderzenie w detektor D1 = 100%, uderzenie w D2 = 0%. Jeśli przeszkoda jest ustawiona, to mamy: uderzenie w D1 = 25%, w D2 = 25%, a w przeszkodę = 50%. I już! Nic więcej...

Podejście opisane wyżej wydaje mi się najbardziej rozsądne. Bazuje ono tylko na tych rzeczach, które są obserwowalne i nie wdaje się w dywagacje na temat rzeczy niesprawdzalnych. Sugeruje ono przy tym, że budując układ eksperymentalny, zadajemy w pewien sposób pytanie Przyrodzie. Ona „patrzy” na to, co zmontowaliśmy i odpowiada nam odpowiednim ustaleniem prawdopodobieństw dla konkretnych detektorów. My te prawdopodobieństwa możemy zmierzyć i na tej podstawie możemy próbować tworzyć teorię, która wyjaśni, skąd te prawdopodobieństwa się biorą. I dziś już taką teorię mamy. To mechanika kwantowa! W ramach jej formalizmu, o którym na razie nic nie mówiliśmy, jesteśmy w stanie określić, jakie są prawdopodobieństwa zarejestrowania cząstek na konkretnych detektorach dla ustalonej konfiguracji doświadczalnej. I prawdopodobieństwa wyliczone w ten sposób są dokładnie takie same jak te, które otrzymujemy, wykonując eksperyment. Mechanika kwantowa jest zatem teorią, która ma moc przewidywania – jest deterministyczna. Pozwala jednoznacznie przewidzieć prawdopodobieństwa konkretnych wyników, jakie uzyskamy w doświadczeniu.

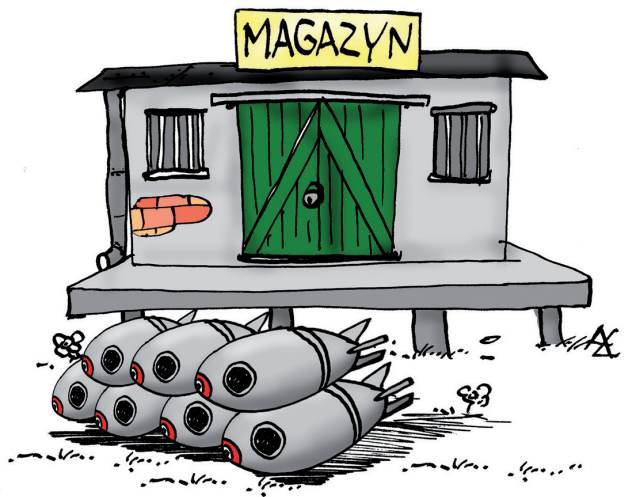
BOMBOWA WŁASNOŚĆ MECHANIKI KWANTOWEJ

Niezależnie od tego, która z interpretacji mechaniki kwantowej jest nam bliższa musimy przyjąć jako punkt wyjścia eksperyment. Skupmy się zatem na doświadczeniu Macha-Zendera. Zauważmy, że tylko w jednej sytuacji wysłany ze źródła foton może do

trzeć do detektora D2. Jest tak wtedy, gdy w ramieniu górnym ustawiona jest przeszkoda. Wtedy szansa na zarejestrowanie fotonu przez detektor D2 jest równa 1/4. Ta niby skromna i dość trywialna obserwacja może być w zdumiewający sposób wykorzystana! Najbardziej znany jest przykład, który podali w 1993 roku izraelscy fizycy Avshalom Elitzur i Lev Vaidman.

Wyobraźmy sobie, że mamy w magazynie zbiór bardzo nowoczesnych bomb z małym okienkiem, których zasada działania jest następująca. Jeśli przez okienko wpadnie odrobina światła, to zostanie uruchomiony zapalnik i bomba wybuchła. Zapalnik jest przy tym bardzo czuły i wystarczy pochłonięcie pojedynczego fotonu, aby doprowadzić do eksplozji.

Niestety bomby leżały bardzo długo w magazynie i część z nich uległa uszkodzeniu, tzn. wlatujący foton nie jest pochłaniany i nie uruchamia zapalnika



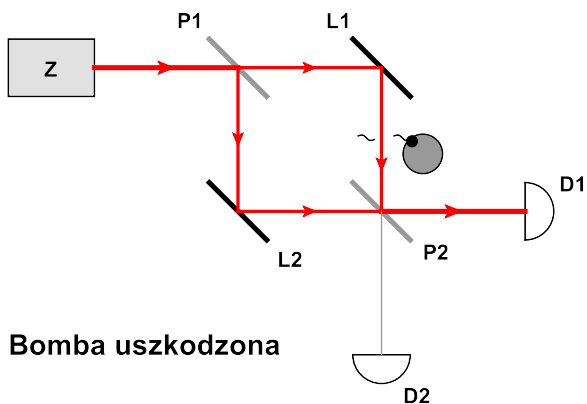
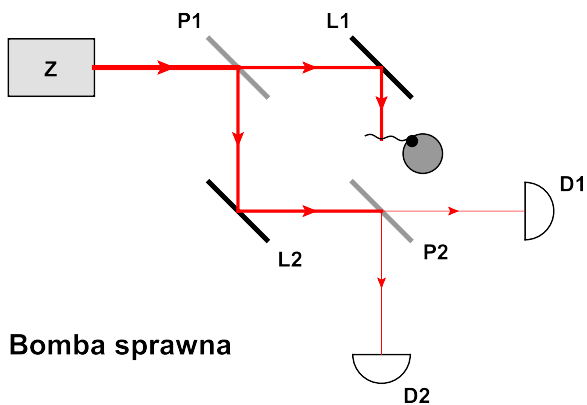
zbiór bomb z małym okienkiem

bomby, tylko wylatuje okienkiem po drugiej stronie. Nasze zadanie polega na wyselekcjonowaniu bomb, które nadają się jeszcze do użytku.

Postawione zadanie jest piekielnie trudne i wydaje się, że jest niewykonalne. Na pierwszy rzut oka, jedyny sposób sprawdzenia, czy bomba jest sprawna, czy uszkodzona, to branie kolejno każdej bomby i świecenie na nią światłem. Jeśli bomba nie wybuchnie, to znaczy, że jest uszkodzona. Jeśli wybuchnie, to znaczy, że była sprawna. Problem polega na tym, że po wykonaniu takiego testu sprawnej bomby nie możemy wykorzystać, bo właśnie została „zużyta”. Na końcu zostaniemy po prostu tylko ze zbiorem bomb uszkodzonych. Jest to oczywiście jakaś selekcja, ale nie o to nam przecież chodziło.

Czy można jakoś sprawdzić, czy bomba jest sprawna bez niszczenia jej? Wydaje się, że nie. Bo jedyny sposób sprawdzenia polega przecież na poświeceniu na nią światłem. Ale wtedy sprawna bomba wybuchnie.

W tym momencie z pomocą przychodzi eksperyment Macha-Zendera. Okazuje się, że możemy go wykorzystać tak, aby przynajmniej część sprawnych bomb wyselekcjonować bez ich niszczenia. W tym celu należy zamiast przeszkody umieszczać kolejne bomby. Tak jak na poniższych dwóch rysunkach:



Na pierwszym rysunku pokazane jest to, co dzieje się ze światłem, jeśli bomba jest sprawna. Wtedy sytuacja wygląda tak jak w eksperymencie Macha-Zendera z przeszkodą. Światło może trafić do detektorów D1 i D2. Może też trafić na zapalnik bomby.

Gdy bomba jest uszkodzona, to zgodnie z naszymi założeniami przepuszcza ona na drugą stronę całe padające na nią światło. Sytuacja jest zatem taka jak w klasycznym eksperymencie Macha-Zendera. Światło zawsze trafia do detektora D1.

Wyobraźmy sobie teraz, że wybieramy losowo bombę z naszego magazynu (nie wiemy zatem, czy jest sprawna, czy uszkodzona) i wstawiamy w górne ramię interferometru. Puszczamy foton ze źródła i sprawdzamy, gdzie on doleci. Możliwe są oczywiście następujące możliwości:

1. bomba wybuchnie – to oznacza, że foton poleciał „górną” ścieżką, a bomba była sprawna; foton został tam pochłonięty przez zapalnik i wywołał eksplozję;
2. bomba nie wybuchła, foton zarejestrowany przez D1 – to oznacza, że foton leciał „dolną” ścieżką; nie wiemy, czy bomba jest sprawna, czy uszkodzona;
3. bomba nie wybuchła, foton zarejestrowany przez D2 – to oznacza, że foton leciał „dolną” ścieżką; bomba jest **NA PEWNO SPRAWNA!**

Oczywiście trzecia możliwość jest dla nas najbardziej interesująca. Jeśli foton został zarejestrowany przez D2, to, jak wynika z powyższych schematów, bomba na pewno jest sprawna. Tylko bowiem wtedy foton miał w ogóle możliwość trafić do D2.

Wykryliśmy zatem sprawną bombę bez niszczenia jej.

Faktem jest, że nie możemy w ten sposób wykryć wszystkich sprawnych bomb. Wszak szansa na to, że przy sprawnej bombie foton akurat poleci

dołem i trafi do D2, jest równa tylko 1/4. Pojedynczym pomiarem możemy zatem wykryć tylko 1/4 sprawnych bomb. Ale to i tak sporo. Przypomnijmy, że wcześniej wydawało nam się, że żadnej bomby sprawnej nie da się wykryć bez jej niszczenia.

Wynik możemy jeszcze poprawić, wykorzystując obserwację, że sytuacja druga może zachodzić zarówno, gdy bomba jest uszkodzona, jak i wtedy, gdy jest sprawna. Skoro ta sytuacja nie rozstrzyga, jaka jest bomba, to eksperyment możemy powtórzyć dla wybranej przez nas bomby. Jeśli bomba jest uszkodzona, to sytuacja znów się powtórzy. Jeśli jest sprawna, to może zająć każda z trzech możliwości. Być może zdarzy się, że akurat teraz foton trafi do D2. Wtedy mamy znów pewność, że bomba jest sprawna, tylko że za pierwszym razem foton akurat trafił do D1 (przy sprawnej bombie jest to też możliwe). Jakie jest prawdopodobieństwo tego, że dla sprawnej bomby w pierwszym pomiarze foton trafił do D1, a w drugim do D2? Oczywiście $1/4 \cdot 1/4$, czyli $1/16$. Łączne prawdopodobieństwo, że wykryjemy bombę w pierwszym lub drugim pomiarze bez jej niszczenia, jest zatem równe $1/4 + 1/16$, czyli $5/16$. Trochę więcej niż $1/4$. Powtarzając zatem eksperyment za każdym razem gdy foton trafi do D1, możemy zwiększyć szansę na wykrycie sprawnej bomby. Oczywiście jeśli dla konkretnej bomby 1000 razy powtórzymy eksperyment i zawsze foton trafi do D1, możemy mieć niemal pewność, że bomba jest uszkodzona. Bo tylko wtedy fotony zawsze trafiają do tego detektora. Jeśli bomba jest sprawna, to wcześniej czy później albo ona wybuchnie (foton poleci „górną” ścieżką), albo w końcu ją wykryjemy (foton trafi do D2).

Na zakończenie sprawdzimy, ile maksymalnie sprawnych bomb możemy wykryć bez ich niszczenia. W tym celu musimy dodać prawdopodobieństwo, że wykryjemy ją w pierwszym eksperymencie ($1/4$), że wykryjemy ją w drugim eksperymencie ($1/4 \cdot 1/4$), że wykryjemy ją w trzecim eksperymencie ($1/4 \cdot 1/4 \cdot 1/4$), ..., itd. Jest to suma szeregu geometrycznego z ilorzazem $q=1/4$. Sumowanie nieskończonego szeregu umie zapewne wykonać każdy maturzysta:

$$P = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{4} + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{4}\right)^n = \frac{1}{3}$$

To oczywiście oznacza, że maksymalnie możemy wykryć $1/3$ sprawnych bomb. Reszta ulegnie eksplozji na skutek tego, że foton w którymś kroku naszego iterowanego eksperymentu poleci po prostu „górną” ścieżką.

POMIAR BEZ ODDZIAŁYWANIA

Czyż to nie jest niesamowite? Oto wykonując odpowiednio przygotowany eksperyment, możemy dokonać pomiaru sprawności bomby nie wykonując na niej pomiaru! Wcześniej mówiłem, że w mikroświecie nie da się wykonać pomiaru w taki sposób, aby nie zaburzyć układu mierzzonego. Jak widać, nie jest to do końca prawdą! Mechanika kwantowa dopuszcza takie eksperymenty, na skutek których mierzymy pewną własność układu, zupełnie z nim nie oddziałując. Mechanika kwantowa jest zatem dużo bardziej



miar sprawności bomby, bez wykonania pomiaru na niej

ciekawa, niż nam się to wcześniej wydawało. Jej magia zaczyna nam się teraz odsłaniać zupełnie z innej strony. I właśnie dlatego jest ona tak ciekawa...

POTWIERDZENIE EKSPERYMENTALNE

Na zakończenie warto postawić kropkę nad „i” i odnieść się do doświadczenia. Wszak na razie opisaliśmy tylko eksperyment myślowy. W roku 1994 grupa eksperymentatorów pod kierownictwem austriackiego fizyka Antona Zeilingera (specjalisty

od testowania różnych aspektów mechaniki kwantowej) wykonała serię doświadczeń analogicznych do eksperymentu myślowego Elitzura–Vaidmana i całkowicie potwierdziła słuszność wniosków, jakie zostały wyciągnięte. Przewidywania mechaniki kwantowej co do możliwości sprawdzania pewnych własności układów bez oddziaływania z nimi zostały bezspornie potwierdzone w doświadczeniu. Oczywiście Zeilinger nie używał w swoich eksperymentach prawdziwych bomb. Zastąpił je zwykłymi detektorami, z których niektóre losowo były uszkodzone. Gdy detektor był sprawny i padł na niego foton, to zapalała się czerwona lampka sygnalizująca „wybuch bomby”. Detektor uszkodzony przepuszczał padające światło na drugą stronę.

O profesorze Zeilingerze będę wspominał jeszcze wielokrotnie. Po pierwsze dlatego, że jego zapierające dech w piersiach eksperymenty wielokrotnie testowały przewidywania mechaniki kwantowej i na pewno będą bardzo dobrą ilustracją naszych opowieści. Po drugie dlatego, że od kilku lat jest on wymieniany jako kandydat do Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki. Niektórzy twierdzą, że nie dostał jej do tej pory tylko dlatego, że Komitet Noblowski ma problem z wybraniem eksperymentu, za który przyznać mu nagrodę. ●