

Sztuka splątywania mile widziana



MAREK ŻUKOWSKI

Instytut Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki
Uniwersytet Gdański
marek.zukowski@univie.ac.at

Prof. Marek Żukowski jest dyrektorem IFTiA. W 2013 roku otrzymał tzw. polskiego Nobla, czyli Nagrodę Fundacji na rzecz Nauki Polskiej. PAN wyróżniła go zaś nagrodą Wydziału III Nauk Ścisłych i Nauk o Ziemi za cykl prac dotyczących podstaw mechaniki kwantowej i rozwój wielofotonowej kwantowej interferometrii. Niniejszy artykuł opisuje nagrodzone badania.

Teorię kwantów „odgadli” w 1925 roku niezależnie Werner Heisenberg i Erwin Schrödinger. Było to zwieńczenie 25 lat prób wielu badaczy. Jej interpretacja do dziś jest przedmiotem kontrowersji. Ale i źródłem inspiracji

Istotę teorii kwantów przeczuwał – w zasadzie intuicyjnie – tylko Niels Bohr, który w 1927 roku sformułował tzw. interpretację kopenhaską. Została ona powoli zaakceptowana przez większość fizyków zainteresowanych podstawami mechaniki kwantowej. Najbardziej pragmatyczni badacze przyjęli hasło „zamknij się i licz”, nie przejmując się zawiłościami możliwych interpretacji. Odkrycia sypały się jak z rękawa – teoria kwantów doskonale opisuje zjawiska mikroświata. Albert Einstein jednak interpretację Bohra kontestował.

Kwantowa nowomowa

Interpretacja kopenhaska z czasem ewoluowała. Stała się postawą kwantowej nowomowy. Przewidywania dotyczące układów kwantowych zależą od istniejącej tylko w teorii funkcji falowej (wektora stanu).

Zamiennie mówi się często o stanie układu, co jest skrótem wyrażenia „stan wiedzy o układzie”. Ale to, co mierzymy, to wielkości obserwowalne, a nie parametry układu. Tak zwany kolaps funkcji falowej spędza sceptykom sen z powiek: po pomiarze pierwotna funkcja falowa cząstki zostaje nagle zastąpiona nową, w pełni zgodną z nowym, zmierzonym wynikiem. Teoria daje przewidywania w formie prawdopodobieństw – jest fundamentalnie indeterministyczna.

Einstein zaprotestował: „Bóg nie gra w kości”. W 1935 roku jako argumentu użył tzw. splątania. Jest to cecha pewnych stanów kwantowych układów składających się z dwóch (lub więcej) osobnych podukładów. Przykładem takiego układu może być para fotonów. Stany maksymalnie splątane określają tylko łączne właściwości pewnych pomiarów na dwóch podukładach, natomiast wyniki pomiarów na pojedynczym podukładzie są całkowicie nieprzewidywalne. Na przykład dla tzw. singletu polaryzacyjnego pary fotonów wynik pomiaru dowolnej właściwości polaryzacji jednego z fotonów jest zupełnie przypadkowy, natomiast jeżeli wykonamy takie same pomiary na obu fotonach, wyniki będą zawsze przeciwne i to bez względu na odległość fotonów.

Einstein sądził, że mechanika kwantowa nie jest zupełna – musi być uzupełniana dodatkowymi „elementami rzeczywistości”. Weźmy dwa fotony w polaryzacyjnym singleticie i sprawdźmy, czy ich polaryzacje są prawo- czy lewoskrętne – wyniki zawsze będą odwrotne. Gdy pierwszy wykaże lewoskrętność, drugi już musi być prawoskrętny. Ponieważ ten drugi foton może być dowolnie daleko od pierwszego, pomiar wykonany na pierwszym nie może go w żaden sposób zaburzyć (bo zaburzenia mogą się rozchodzić co najwyżej z prędkością światła). Ten drugi zatem musiał być według Einsteina już wcześniej prawoskrętny. Pojawia się tu element rzeczywistości wyrażający ukryty determinizm.

Od EPR do GHZ

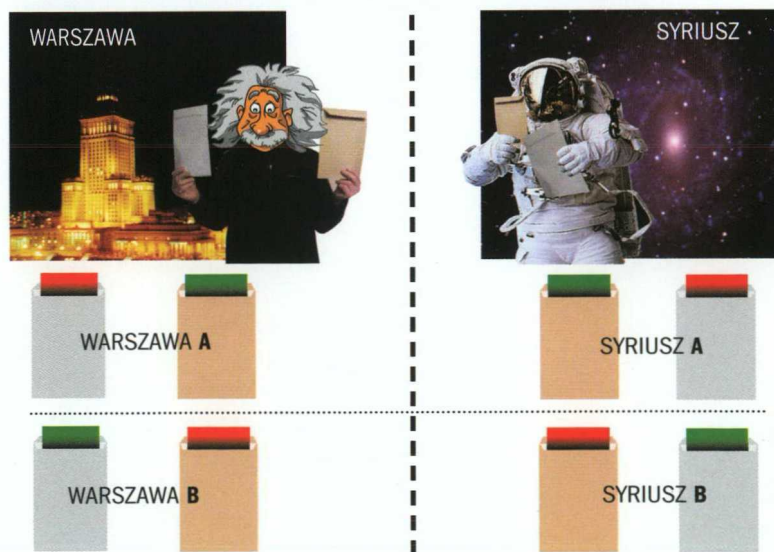
Takie tezy zawiera praca Einsteina, Borysa Podolskiego i Nathana Rosena, w której przedstawiono rozumowanie, które dziś nazywa się od nazwisk autorów paradoksem EPR. W 1964 roku John Bell wykazał, że rozumowanie EPR, gdy rozważymy szerszą klasę pomiarów, prowadzi do sprzeczności

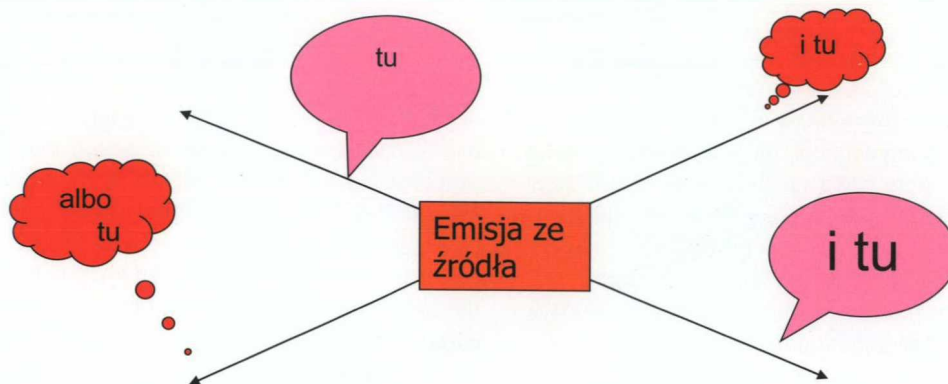
typu „jeden plus jeden równa się zero”. Twierdzenie Bella wyklucza jakiegokolwiek uzupełnienie mechaniki kwantowej zgodne z lokalną przyczynowością, która zakłada, że zdarzenia są zdeterminowane przez przyczyny, a te zasięg oddziaływania mają ograniczony poprzez zasady rozchodzenia się zaburzeń zgodne z teorią względności. Oznacza to, że moje kichnięcie w Gdyni nie może doprowadzić do natychmiastowego rozlania mleka u mojego kuzyna w Australii, ale już w mojej kuchni może. Natomiast jeżeli kichnę, rozmawiając z kuzynem przez telefon, to gdy odgłos dojdzie do niego, jemu również może wypaść kubek z ręki...

Nie możemy symulować komputerowo polaryzacji pojedynczego fotonu z singletowej pary. Jeżeli zastąpimy oba fotony dwoma superkomputerami i załadujemy do nich dowolnie skomplikowane programy, to nie odtworzymy kwantowych korelacji związanych z singletem polaryzacyjnym. Moglibyśmy to uzyskać, tylko pozwalając komputerom na wymianę informacji przez cały czas. Ale, zgodnie z teorią względności, odległe fotony pędzące w przeciwnych kierunkach nie mogą wymieniać między sobą informacji. Co najwyżej mogą nieść jakąś informację pochodzącą ze wspólnego źródła („oprogramowanie”).

Ale czy ten paradoks ma obserwowalne konsekwencje? To pytanie zrodziło interferometrię dwufotonową. Jej szczytowym osiągnięciem były eksperymenty Alaina Aspecta (1981-1982). W 1989 roku zadano sobie wreszcie pytanie, co stanie się z trzema splątanymi fotonami. Wtedy już pracowałem

„Splątane koperty” w Warszawie i w układzie Syriusza. Jeśli otworzymy je z tej samej strony, zawsze znajdziemy w nich kartki tego samego koloru





Przykład stanu splątanego: dwa fotony, o których wiemy jedynie, że zostały wyemitowane w dwóch przeciwnych kierunkach (wspólna właściwość). Który z dwóch możliwych dla tych fotonów procesów zachodzi? Fundamentalnie nie da się tego ustalić bez dodatkowego pomiaru. Ale dodatkowy pomiar wyklucza jedną z możliwości! Nie ma po nim splątania

nad splątaniem. Daniel Greenberger, Michael Horne i Anton Zeilinger (GHZ) pokazali, że jeśli przejdziemy od zjawisk dwucząstkowych do trójcząstkowych (albo wyższego rzędu), to paradoksalne cechy splątania stają się jeszcze bardziej jaskrawe niż w przypadku EPR. Problemem był brak źródeł trójfotonowych, które można by efektywnie wykorzystać w eksperymentach.

Podczas mojego pierwszego pobytu w charakterze profesora wizytującego na Uniwersytecie w Innsbrucku w latach 1991-1993 postanowiliśmy z Antonem Zeilingerem znaleźć metodę obserwacji trójfotonowej interferencji GHZ.

Coś o interferencji

Dopóki sądzono, że światło to fala elektromagnetyczna, interferencję rozumiano jako efekt nakładania się fal. Tam, gdzie się spotykają dwie fale o „tej samej fazie” – grzbiet z grzbietem, dolina z doliną – następuje wzmocnienie oscylacji (duża intensywność światła), a gdzie spotykają się w przeciwfazie – doliny jednej z grzbietami drugiej – następuje wygaszenie (intensywność zero). Gdy mamy tylko pojedynczy foton, interferencję tłumaczymy w inny sposób. Możemy użyć funkcji stanu, która ma formę dwóch nakładających się fal. Z tego wynika, że są miejsca, w których nigdy nie znajdziemy fotonu (komponenty funkcji stanu się wygaszają) i miejsca o maksymalnym prawdopodobieństwie detekcji fotonu (komponenty są w fazie). Sytuacja jest niby taka sama, ale możemy zadać pytanie: z którą z tych dwóch fal był związany foton przed rejestracją? Przecież mieliśmy tylko jeden foton i jest on rejestrowany zawsze w całości. Teoria kwantów nic o tym nie mówi.

A jeśli ustawimy gdzieś urządzenia, które wykryją, z którą falą podróżuje foton? Niestety – każda taka próba kończy się zniszczeniem interferencji; to wynik teoretyczny, potwierdzony eksperymentalnie. Teoria kwantów przewiduje interferencję tylko wtedy, gdy dany stan końcowy (trafienie w detektor) może być osiągnięty przynajmniej dwiema „drogami”. Te drogi muszą być fundamentalnie niepoznawalne, foton nie może zostawić na nich żadnego śladu (nazywamy to „nierozróżnialnymi procesami kwantowymi”).

Interferencja dwufotonowa przejawia się w koincydencjach: poprzez zmiany prawdopodobieństwa zliczenia w tej samej chwili po fotonie w dwóch odległych od siebie detektorach. Jest ona maksymalna, gdy stan danej pary fotonów jest maksymalnie splątany. Wtedy możemy doprowadzić do zerowego prawdopodobieństwa koincydencji dla jakiejś pary detektorów. To też wynika z nierozróżnialności odpowiednich procesów kwantowych i już w żaden sposób nie da się opisać jako interferencja fal.

Splątanie fotonów

W sierpniu 1992 roku wymyśliliśmy sztuczkę umożliwiającą korelacje GHZ. Ale najpierw zastosowaliśmy ją do tzw. wymiany splątania. Jak to przebiega? Bierzemy dwa źródła splątanych par. Powstają dwie pary fotonów. Z każdej po jednym fotonie wysyłamy do dwóch bardzo odległych od siebie interferometrów. Pozostałe dwa fotony kierujemy do interferometru znajdującego się pomiędzy źródłami. Dzięki odpowiednim filtrom częstotliwości i detektorom o świetnej rozdzielczości czasowej w tym interferometrze fotony ztracają swoją rozróżnialność: jeżeli dwa detektory

zarejestrują po fotonie, informacja o tym, z którego źródła pochodził dany foton, jest nieodwracalnie stracona. Powiązany z tym kolaps stanu fotonów w odległych interferometrach zostawia je w stanie splątanim, chociaż wcześniej były kompletnie niezależne. Nauczyliśmy się splątywać fotony.

Metoda ta wymaga wysokiej rozdzielczości czasowej detektorów. Jesienią 1993 roku zastąpiliśmy ten wymóg impulsowym wzbudzeniem źródeł. Dzięki temu grupie Antona udało się przeprowadzić w Innsbrucku pierwszą teleportację kwantową w 1997 roku, uzyskać korelacje GHZ i pierwszą wymianę splątania. Narodziła się eksperymentalna interferometria wielofotonowa. Obecnie możliwa jest nawet interferencja ośmiofotonowa!

Opracowaliśmy też (z grupami Haralda Weinfurtera i Jian-Wei Pana) eksperymenty umożliwiające interferencję czterofotonową o wysokim kontraście oraz interferencję sześciofotonową (z grupą Mohameda Bourennane). Dokonaliśmy pierwszej obserwacji interferencji fotonów pochodzących z całkowicie niezależnych źródeł (grupa Zeilingera).

W roku 2000 za pomocą metod numerycznych pokazaliśmy, że zjawiska nieklasyczne są silniejsze dla układów mogących dawać wiele wyników pomiarowych. Obaliło to mit głoszący, że istotne są tylko układy dające wyniki typu tak-nie. Wcześniej sformułowaliśmy operacyjne podstawy obserwacji takich zjawisk. W 2001 roku w artykule napisanym wraz z Haraldem Weinfurterem wyprowadziłem uniwersalną formę twierdzenia Bella. Można ją stosować w analizie eksperymentów interferencyjnych związanych z pomiarami polaryzacyjnymi na dowolnej liczbie fotonów.

Kwantowa informacja

W latach dziewięćdziesiątych rozpoczął się okres intensywnych badań nad splątaniem i nową gałęzią fizyki: kwantową informacją. Poszukuje się nowych nieklasycznych, paradoksalnych zjawisk kwantowych i sposobów ich wykorzystania w przekazie lub przetwarzaniu informacji. W ten sposób powstają nowe protokoły informacyjne, jak np. kwantowa teleportacja lub kwantowa kryptografia, które są niemożliwe, gdy używamy metod klasycznych.

Wykazaliśmy, że splątanie pozwala obniżyć wymianę informacji potrzebną do rozwiązania pewnej obszernej klasy problemów obliczeniowych. Wraz z grupą Weinfurtera przeprowadziliśmy eksperymentalny test tej metody. Ten sam układ eksperymentalny posłużył do demonstracji efektywnej metody kwantowego dzielenia się sekretem. Dwie osoby nie mogą użyć klucza kryptograficznego wygenerowanego kwantowo bez zgody trzeciej osoby, która ma klucz do ich klucza.

Nasza praca – której trzema pierwszymi autorami są moi doktoranci – opublikowana w 2009 roku w „Nature”, zawiera propozycję wprowadzenia nowej fundamentalnej zasady fizyki: „informacyjnej przyczynowości”: pokazujemy, iż oczywisty fakt, że wiadomość nie może otwierać dostępu do większej ilości informacji niż taka, jaka jest w niej zawarta (informację kwantyfikujemy poprzez liczbę bitów potrzebnych do jej zapisania), umożliwia określenie pewnej kluczowej właściwości stanów splątanych. Informacyjna przyczynowość może być jednym z elementów zbioru naturalnych zasad implikujących teorię kwantów. Teoria ta jak dotąd nie znalazła intuicyjnego uzasadnienia.

Badania splątania aż do początku lat 90. XX wieku były bardzo źle widziane. Stanowiły domenę przeciwników mechaniki kwantowej, takich jak sam Bell. Ale naszedł moment, w którym eksperymenty myślowe Einsteina i Bohra stały się wykonalne. Należałem do tych „mechaników kwantowych”, którzy interpretowali twierdzenie Bella jako silniejszy od zasady nieoznaczoności Heisenberga wyraz paradoksalnych cech świata kwantów. Dołączyłem do badań tuż przed eksperymentalnym i teoretycznym przełomem. ■

Chcesz wiedzieć więcej?

- Żukowski M., (2009). It ain't necessarily so. *Świat Nauki*, 4 (212), 32-33.
- Zeilinger A., (2013). *Od splątania cząstek do kwantowej teleportacji*. Tłum. Ewa Łokas i Bogumił Bieniok. Warszawa: Prószyński Media.
- Pan J.-W. et al. (2012). Multiphoton entanglement and interferometry. *Rev. Mod. Phys.* 84, 777.
- Gröblacher S., et al. (2007). *An experimental test of non-local realism*. *Nature* 446, 871-875.
- Żukowski M., et al. (1998). *Quest for GHZ states*. *Acta Phys. Pol.* 93, 187.
- Pawłowski M. et al. (2009). *Information causality as a physical principle*, *Nature* 461, 1101-1104.