



## WIESŁAW LASKOWSKI

---

### Filozofia stosowana, czyli parę słów o fizyce kwantowej informacji

Chciałbym przybliżyć pewne aspekty badania fundamentów mechaniki kwantowej z perspektywy przedstawiciela trzeciego pokolenia fizyków pracujących na Uniwersytecie Gdańskim. Badanie podstaw jakiegokolwiek dziedziny nauki przyrodniczej przypomina próbę odgadnięcia zasad nieznaney gry poprzez obserwację jej przebiegu. Mechanika kwantowa jest teorią, która opisuje reguły obowiązujące w mikroświecie. To obszar, gdzie dominują rozmiary odpowiadające podstawowym składnikom materii, takim jak atomy czy cząstki elementarne. Skalę możemy wyobrazić sobie w następujący sposób – jeśli powiększylibyśmy jabłko do wielkości Ziemi, to atomy takiego jabłka byłyby porównywalne ze zwykłymi jabłkami. Teoria kwantów została wielokrotnie potwierdzona eksperymentalnie z dużą dokładnością. Z badań nad jej podstawami wyrosła stosunkowo młoda gałąź fizyki zwana informacją kwantową. Zajmuje się ona zastosowaniem reguł kwantowych w przetwarzaniu informacji.

W tej chwili jesteśmy świadkami rewolucji. Już nie tylko chcemy wykorzystać fizykę kwantową do tego, by ulepszyć technologie, ale dążymy do stworzenia zupełnie nowych, które nie są dostępne na gruncie fizyki klasycznej. Za przykład może służyć kryptografia kwantowa, do której urządzenia dostępne są już na rynku, czy będący wciąż w fazie marzeń komputer kwantowy. Wkład Uniwersytetu Gdańskiego, wiodącego ośrodka w Polsce i znaczącego na świecie, w powstanie i rozwój teorii technologii kwantowych jest nie do pominięcia.

## Dwa filary teorii kwantów – splątanie i superpozycja

Dwa elementarne pojęcia, wokół których koncentruje się niezwykłość mechaniki kwantowej, to splątanie i superpozycja kwantowa. Oba odnoszą się do zjawisk występujących jedynie w mikroświecie i niemających swoich odpowiedników w świecie makro, który znany jest nam z codziennych doświadczeń, bardzo dobrze opisywanych przez fizykę klasyczną. Czym zatem jest splątanie kwantowe, które zostało nazwane przez Erwina Rudolfa Schrödingera sercem mechaniki kwantowej? Jego ideę znakomicie wyrażają słowa Alana Alexandra Milne'a z książki pt. *Kubuś Puchatek. Chatka Puchatka*:

*Puchatek spojrzął na obydwie łapki. Wiedział, że jedna z nich jest prawa, i wiedział jeszcze, że kiedy już się ustaliło, która z nich jest prawa, to druga była lewą, ale nigdy nie wiedział, jak zacząć.*

Aby mówić o splątaniu, musimy mieć przynajmniej dwa obiekty – nazwijmy je cząstkami. Ich splątanie będzie przejawiało się tym, że są określone tylko ich łączne własności. Powyższy przykład spełnia tę regułę. Ręce Kubusia są przeciwne – jedna jest lewa, a druga prawa. To jest ich łączna własność. Jednocześnie nie mają własności indywidualnych, gdyż Kubuś nie może zapamiętać, która z nich jest która.



**Mówiąc teraz bardziej poważnie, możemy przedstawić zjawisko splątania kwantowego na przykładzie pewnej cechy światła, zwanej polaryzacją. Doświadczył jej każdy, kto był w kinie 3D, gdzie nowoczesne okulary mają filtry polaryzacyjne, które przepuszczają światło tylko o pewnej wybranej polaryzacji.**



Podobne filtry są również używane w aparatach fotograficznych czy okularach przeciwsłonecznych, zwykle po to, by likwidować odbłaski (światło odbite jest spolaryzowane – szansa, że nasz filtr przepuści właśnie tę polaryzację jest znikoma). Mówiąc bardziej formalnie, światło można opisywać jako falę. Każda fala jest rozchodzącym się zaburzeniem, fala morska – cząsteczek wody, fala dźwiękowa – powietrza. Fala świetlna jest zaburzeniem pola elektromagnetycznego składającego się z przenikających się pól – elektrycznego i magnetycznego. Kierunek drgań tego pierwszego nazywamy polaryzacją.

Na światło możemy patrzeć również jak na cząstki. Nazywamy je fotonami. Potrafimy wytworzyć parę fotonów w specyficznym stanie, w którym określimy tylko ich łączną własność – niech ich polaryzacje będą przeciwne. Jeśli polaryzacja pierwszego fotonu będzie, powiedzmy, pionowa, to drugiego musi być pozioma lub odwrotnie. Gdy jednak będziemy obserwować polaryzację tylko jednego z nich, to nie będzie ona określona. Otrzymamy losowe wyniki. Takie polaryzacyjnie splątane pary otrzymujemy w tzw. zjawisku parametrycznego podziału częstości, które stanowi obecnie podstawową metodę generowania splątania kwantowego.

## **Bellologia, czyli badanie konfliktu klasycznego z kwantowym**

Stany splątane mają bardzo dużo ciekawych własności przez to, że nie posiadają swoich klasycznych analogów. Pierwszy pokazał to John Bell w 1964 r., wyprowadzając pewną nierówność, dziś znaną jako nierówność Bella. Każda nierówność dzieli przestrzeń na dwie części – tę, której elementy ją spełniają



i tę, której elementy jej nie spełniają, czyli łamią. Nierówność Bella jest tak skonstruowana, że spełniają ją przewidywania teorii klasycznej, podczas gdy jest łamana przez przewidywania teorii kwantowej. Bell jako pierwszy pokazał teoretycznie takie łamanie, wykorzystując w tym celu przedstawione wyżej stany splątane. Pokazał, że istnieją korelacje kwantowe, które nie są opisywalne na gruncie fizyki klasycznej za pomocą tzw. lokalnych zmiennych ukrytych, swoistych genów, które zawierają instrukcje, jak cząstka powinna zachować się w momencie pomiaru. Co ciekawe, korelacje te w żaden sposób nie zależą od odległości. Można nawet sobie wyobrazić, że splątane cząstki umieszczamy na przeciwległych ramionach galaktyki. Na razie skutecznie dowiedziono nieklasyczności w sytuacji, gdy lokalne laboratoria były odległe o 1200 km, wykorzystując źródło splątanych par fotonów umieszczone na satelicie przez grupę naukowców z Hefei w 2017 r.

Jedną z najbardziej elementarnych nierówności typu Bella jest nierówność CHSH. Akronim pochodzi od nazwisk jej twórców – Johna F. Clausera, Michaela A. Horne’a, Abnera Shimony’ego i Richarda A. Holta. Jest bardzo prosta w wyprowadzeniu i to od niej zaczęła się moja przygoda ze światem kwantów i nauką w ogóle. Dwadzieścia lat temu, gdy byłem na trzecim roku studiów, uczestniczyłem w seminarium prowadzonym przez profesora Marka Żukowskiego. Wyprowadzał wtedy na tablicy wspomnianą przeze mnie nierówność. Zakłada się następujący scenariusz. Źródło emituje pary splątanych fotonów. Fotony z pary wysyłane są do dwóch przestrzennie odseparowanych laboratoriów. Obserwatorzy, zwyczajowo Alicja i Bob, wykonują pomiary polaryzacji, w wyniku których otrzymują jeden z dwóch możliwych wyników, którym przypisujemy wartości „+1” lub „-1”. Za każdym razem wybierają oni jedno z dwóch dostępnych komplementarnych ustawień aparatury (kierunków polaryzacji). Pomiary są powtarzane dla każdej kolejnej splątanej pary fotonów. Na koniec Alicja i Bob spotykają się i wymieniają wynikami. Sprawdzają, w ilu przypadkach uzyskali takie same wyniki (korelacje), a w ilu przeciwne (antykorrelacje). Na koniec zadajemy pytanie, czy gdyby zamienić źródło splątanych par na klasyczny komputer, który mógłby być wyposażony w dowolnie przygotowane oprogramowanie i byłby sprzężony z komputerami Alicji i Boba symulującymi pomiary, to można by było odtworzyć wyniki przepro-

wadzonego eksperymentu. Odpowiedź na to pytanie jest negatywna, a dowodem wspomniana nierówność CHSH. Jest ona złamana przez przewidywania użytego stanu kwantowego, który wykazuje ponadklasyczne korelacje. Żadna klasyczna teoria nie jest w stanie wytłumaczyć wyników tego eksperymentu, nie istnieje ich łączny rozkład prawdopodobieństwa. Oznacza to, że podstawowe założenia teorii klasycznej – *realizm* (układ fizyczny niesie ze sobą informacje o rezultatach wszystkich możliwych pomiarów, które mogą być na nim przeprowadzone) i *lokalność* (na obiekt wpływa bezpośrednio tylko jego bezpośrednie otoczenie) nie tłumaczą całej przyrody. Co ciekawe, aby wyprowadzić nierówność CHSH, trzeba tylko umieć dodawać i mnożyć liczby „+1” i „-1”. Gdy pierwszy raz to zobaczyłem, wszystko wyglądało bardzo podejrzanie. Jak tak prosta matematyka może rozstrzygać o tak fundamentalnych cechach przyrody?

**Nierówności są wciąż ciekawym polem badań dla wielu naukowców. Poza swoim fundamentalnym znaczeniem dla rozumienia otaczającego świata mogą być użyte jako swoiste certyfikaty bezpieczeństwa w kryptografii kwantowej. Dzięki nim można zweryfikować, czy przekazanie klucza kryptograficznego nastąpiło w sposób bezpieczny. Tak zabezpieczone szyfrowanie jest w pełni zaufane, a jego bezpieczeństwo gwarantują prawa przyrody. Bardzo rzadko mamy do czynienia z tak bliskim połączeniem fundamentalnych kwestii dotyczących charakteru zdarzeń w przyrodzie z praktycznymi aplikacjami. Czasami żartujemy sobie, że uprawiamy filozofię stosowaną.**

Jednym z problemów, którym zajęliśmy się później podczas studiów doktorskich, była próba znalezienia nierówności typu Bella dla wszystkich możliwych konfiguracji eksperymentalnych. Razem z moim przyjacielem Tomkiem Paterkiem napisaliśmy algorytm, który w najprostszym przypadku (powyższej omówionej nierówności CHSH) zadziałał perfekcyjnie. W kilkanaście sekund otrzymaliśmy pełen zestaw nierówności dla tej sytuacji eksperymentalnej.

Ucieszeni tym faktem, uruchomiliśmy program dla kolejnego w skali trudności przypadku (po jednym ustawieniu więcej u każdego z dwóch obserwatorów) i udaliśmy się na obiad do ówczesnej stołówki uniwersyteckiej.

Już widzieliśmy tytuł przyszłej publikacji – *Wszystkie nierówności Bella*, opublikowanej w najlepszym czasopiśmie fizycznym. Jakież było nasze zdziwienie, gdy po powrocie z obiadu program wciąż działał bez zwrócenia żadnego wyniku. Gdy później oszacowaliśmy czas trwania, okazało się, że chociaż w najprostszym przypadku działał tylko kilkanaście sekund, to na przeanalizowanie kolejnego w skali trudności przypadku będzie potrzebował 150 lat. Problem pozostał otwarty do dzisiaj.

Na marginesie, z Tomkiem Paterkiem wiąże się jeszcze jedna niezmiernie ciekawa historia. Niestety, obiecałem zachować ją w tajemnicy, dopóki informacja o niej stanie się publiczna. Wydarzy się to we wrześniu 2019 r. Czytelnikom, którzy czytają właśnie ten tekst, polecam zrobić przerwę i wpisać w wyszukiwarkę frazę „Tomasz Paterek cockroaches”.

Kończąc temat nierówności Bella, warto wspomnieć, że niedawno, w 2015 r. zostały przeprowadzone eksperymenty przez grupy z Delf, Gaithersburga, Wiednia i Monachium, w których ostatecznie zademonstrowano łamanie nierówności Bella. Ta ostatnia to grupa Haralda Weinfurtera, z którym od wielu lat utrzymujemy regularny kontakt.

**W naszej pracy zawsze ważny był eksperyment. Wynikało to pewnie z tego, że od samego początku wzrastaliśmy naukowo nie tylko w środowisku teoretyków, ale także eksperymentatorów. To bardzo uczy pokory w formułowaniu wniosków z badań.**

Pamiętam, gdy podczas jednego z pierwszych pobytów u Haralda przedstawiłem wyniki naszej pracy, gdzie pokazaliśmy nowy rodzaj nierówności Bella, która silniej wykrywała nieklasyczne własności stanu. Silniej o 3 promile. Byliśmy bardzo dumni z tego wyniku. Dostaliśmy zimny prysznic, bo uszło naszej uwadze, że takie polepszenie jest poza zakresem eksperymentu. Dla pocieszenia można dodać, że wspomniana praca zawierała jeszcze inne wyniki.

Z wizytą u Haralda wiąże się jeszcze jedno niesamowite zdarzenie. Takie, które pamięta się do końca życia. To było 4 października 2005 r. Również miałem prezentację na spotkaniu grupy. Tym razem nie mówiłem o otrzymanych wynikach, a raczej o pomysłach na dalsze badania. W pewnym momencie na korytarzu zrobiło się głośno. Ludzie wychodzili z pokoi, krzyczeli, bili brawo. Jak się okazało, Theodor Hänsch właśnie dowiedział się, że otrzymał Nagrodę Nobla. Była to nagroda z fizyki za wkład w rozwój precyzyjnej spektroskopii laserowej (razem z Royem Glauberem i Johnem Hallem), w tym za wymyślenie tzw. optycznego grzebienia częstości.

## Kot Schrödingera

W tym momencie możemy przejść do drugiego pojęcia, które chciałbym przedstawić, czyli do *kwantowej superpozycji*. Wyobraźmy sobie prosty eksperyment polegający na rzucie zwykłą monetą. Gdy rzut powtórzymy wiele razy, to w połowie wyników otrzymamy orła, w drugiej połowie reszkę. W przypadku pojedynczego rzutu nie potrafimy przewidzieć wyniku, ale wiemy, że z równym prawdopodobieństwem może być to orzeł albo reszka. Gdy po dokonaniu rzutu zasłonimy monetę ręką, to sam proces podnoszenia ręki i obserwacji monety nie będzie miał wpływu na wynik. Jeśli zobaczymy orła, to oznacza tyle, że moneta pod naszą dłoń leżała orłem do góry. Wynik pomiaru został zdeterminowany jeszcze przed samym aktem pomiaru, czyli obserwacją monety. Taki pogląd jest w pełni zgodny z naszymi codziennymi obserwacjami. Stół ma określoną długość, zanim go zmierzymy, a my ważymy określoną liczbę kilogramów, nawet jeśli nie wejdziemy na wagę.



Ta sytuacja ulega całkowitej zmianie, jeśli przeniesiemy się do mikroświata. W takim świecie możemy również sformułować analog gry w monetę. Rolę monety odegra tym razem foton – cząstka światła, którą wpuścimy na płytkę światłodzielną. Jeśli oświetlimy ją całym strumieniem fotonów, np. ze wskaźnika laserowego, to strumień podzieli się na wiązki o równej intensywności, tak jak w przypadku wielu rzutów monetą. Połowa wiązki przejdzie przez płytkę, a połowa zostanie odbita. A co stanie się, jeśli na płytkę trafi jeden foton? Nie może się przecież podzielić. „Dokona” takiego wyboru jak moneta, w tym wypadku przejdzie lub odbije się z prawdopodobieństwem 50%. Jest jednak pewna zasadnicza różnica. Jeśli zapytamy, w jakim stanie jest foton po przejściu przez płytkę światłodzielną, to odpowiedź nie będzie już taka oczywista. Dopóki nie podejrzemy fotonu poprzez ustawienie detektorów, będzie on w superpozycji dwóch stanów – „przejdzie” i „odbije się”. Można powiedzieć, że będzie w obu ścieżkach na raz. To dokładnie tak, jak w paradoksie kota Schrödingera, który miałby być jednocześnie żywy i martwy.

### Kwantowa interferencja – użytek z niewiedzy

Takie zachowanie się cząstek w mikroświecie umożliwia wystąpienie zjawiska kwantowej interferencji. Zachodzi ona wtedy, gdy dany proces może dokonać się na więcej niż jeden sposób i nie mamy żadnej informacji o tym, który sposób został wybrany. To chyba jedyny przypadek, kiedy z niewiedzy możemy zrobić użytek. Zjawisko kwantowej interferencji jest wykorzystywane w urządzeniach zwanych interferometrami. Składają się one z ramion, którymi mogą być transmitowane fotony. Wybór ramienia, którym będzie podróżował foton, odbywa się kompletnie losowo, co zapewnia spełnienie zasady koniecznej do zajścia interferencji. Interferometry cechuje bardzo wysoka czułość. Niewielkie zmiany różnicy długości ramion interferometru powodują znaczące zmiany obrazu interferencyjnego. Dzięki nim możliwe było obalenie koncepcji eteru czy na przykład bardzo aktualne wykrycie fal grawitacyjnych (w pierwszym przypadku użyto klasycznej interferencji).



Na tym opiera się koncepcja metrologii kwantowej, kolejnej dynamicznie rozwijającej się gałęzi fizyki, w której środowisko naszego Uniwersytetu ma również udział. Z jedną pracą wiąże się niewiarygodna, a nawet dramatyczna historia. Gdy kończyliśmy jeden z projektów i byliśmy już w fazie pisania manuskryptu, okazało się zupełnie przypadkiem, że nasz kolega z Uniwersytetu w Bilbao pracuje nad tym samym zagadnieniem. Postanowiliśmy wymienić się manuskryptami. Okazało się, że 80% zawartości obu prac jest taka sama. Dodam, że nie kontaktowaliśmy się wcześniej, a szpiegostwo naukowe nie wchodziło w grę. Zdecydowaliśmy się opublikować obie prace w tym samym czasopiśmie obok siebie.

### Bomba Elitzura–Vaidmanna

Ciekawy pomysł wykorzystania interferencji z fabułą godną filmu sensacyjnego zaproponowali Elitzur i Vaidmann w 1993 r. Zresztą Dagomir Kaszlikowski, pierwszy wypromowany doktorant profesora Marka Żukowskiego, a obecnie profesor w Centre of Quantum Technologies w National University of Singapore wyreżyserował na ten temat 15-minutowy thriller pt. *Seeing Without Looking*. Dzięki temu schematowi możliwe jest wykrycie obiektu (w oryginale – bomby) bez oddziaływania z nim. Stoi to w sprzeczności z podstawową regułą, że aby stwierdzić obecność czegoś, trzeba z tym w jakiś sposób oddziaływać. Gdy w jednym z ramion interferometru umieścimy bombę, psuje ona interferencję. Ramię zostaje zablokowane, więc gdy foton przejdzie, możemy stwierdzić, którym ramieniem przyszedł. Przystaje być więc spełniony podstawowy warunek interferencji – niepewność co do drogi, jaką zaszło zjawisko.

### Terażniejszość i przyszłość


W praktyce każdy eksperyment wykorzystujący splątane pary fotonów jest jakiegoś rodzaju interferometrem. Sytuacja komplikuje się, ale zarazem staje się ciekawsza, gdy zamiast par będziemy rozważać stany wielofotonowe.

Splątanie w takich układach jest silniejsze i bardziej odporne na zakłócenia. Dziś stoimy przed wyzwaniem i to jest naszym najbliższym celem, jak dobrze charakteryzować splątanie w układach złożonych z wielu części. Moja grupa zajmuje się w tej chwili opracowywaniem nowych metod wykrywania i mierzenia splątania w takich układach. Interesują nas sytuacje, w których obecny jest niekontrolowany szum oraz istnieją ograniczone możliwości synchronizowania układów odniesienia pomiędzy obserwatorami. Odkryliśmy m.in., że w takich sytuacjach pomocne staje się wykonywanie pomiarów polaryzacji w kompletnie losowych kierunkach zamiast w ściśle określonych (tak jak w omawianym scenariuszu CHSH). Odkryte teoretyczne narzędzia testujemy w laboratorium Haralda Weinfurtera w Monachium.



**Informacja kwantowa zawdzięcza swój sukces dużej integracji międzynarodowego środowiska. Współpraca jest czymś naturalnym, a grupy projektowe powstają czasami dość spontanicznie, np. podczas warsztatów czy konferencji naukowych. Bywa, że trudno nadążyć za tym, kto z kim i nad czym pracuje. W tej chwili na Uniwersytecie Gdańskim powstaje Międzynarodowe Centrum Teorii Technologii Kwantowych kierowane przez Marka Żukowskiego, a ufundowane przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej. Mijmy nadzieję, że będzie kolejnym katalizatorem rozwoju.**





W naszej pracy zawsze ważny był eksperyment. Wynikało to pewnie z tego, że od samego początku wzrastaliśmy naukowo nie tylko w środowisku teoretyków, ale także eksperymentatorów. To bardzo uczy pokory w formułowaniu wniosków z badań.

*Wiesław Laskowski*