

Nagroda FNP 2008 dla Ryszarda Horodeckiego

Nagrodę Fundacji na rzecz Nauki Polskiej w dziedzinie nauk ścisłych otrzymał w roku 2008 prof. Ryszard Horodecki z Instytutu Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki Uniwersytetu Gdańskiego. Nagrodę przyznano za „wkład laureata w stworzenie podstaw teoretycznych informatyki kwantowej, a w szczególności za wypracowanie podstaw praktycznej detekcji kwantowego splątania i odkrycie splątania związanego”. Za osiągnięcia w tej dziedzinie Ryszard Horodecki wraz ze swymi synami Pawłem i Michałem otrzymał w roku 2004 nagrodę im. Wojciecha Rubinowicza przyznaną przez Polskie Towarzystwo Fizyczne.



Ryszard Horodecki

Ryszard Horodecki urodził się w 1943 r. w Kowlu na Wołyniu. W roku 1944 jego rodzina uchodzi do Częstochowy, a w roku 1949 przenosi się do Sopotu. Od tego czasu przyszły laureat nagrody FNP pozostaje wierny Trójmiastu. Tu kończy studia na wydziale Elektroniki Politechniki Gdańskiej, a następnie doktoryzuje się z fizyki teoretycznej i rozpoczyna pracę w Instytucie Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki Uniwersytetu Gdańskiego. W roku 1997 habilituje się na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu, a jego rozprawa dotycząca korelacji pomiędzy układami kwantowymi stanowi ważny wkład w analizę własności stanów splątanych i rozwój podstaw teorii informacji kwantowej.

Korelacje kwantowe oraz stany splątane

Stany splątane zostały wprowadzone do mechaniki kwantowej przez Schrödingera we wczesnej fazie rozwoju

mechaniki kwantowej, lecz zostały spopularyzowane dopiero w słynnym artykule Einsteina, Podolskiego i Rosena [1] z roku 1935. W tej pracy pokazano, że mechanika kwantowa pozwala na istnienie stanu dwóch podukładów o dziwnych, nieklasycznych własnościach, w którym pomiar jednego podukładu fizycznego determinuje wynik pomiaru uzyskany w drugim podukładzie. To stwierdzenie, świadczące o nielokalności teorii kwantowej, nazwano *paradoksem EPR* i traktowano jako eksperyment myślowy, którego nie będzie łatwo potwierdzić w doświadczeniu. Badanie zjawisk nielokalności kwantowej zostało spopularyzowane w latach sześćdziesiątych dzięki pracom Johna Bella i jego nierówności [2], a istnienie stanów splątanych wykazali eksperymentalnie w roku 1982 Aspect, Dalibard i Roger [3].

Z punktu widzenia teorii ważne jest rozróżnienie pomiędzy kwantowym układem izolowanym a bardziej ogólnym przypadkiem układu oddziaływanego z otoczeniem. W pierwszym przypadku układ opisywać można poprzez stan czysty $|\varphi\rangle$, traktowany jako element przestrzeni Hilberta, podczas gdy w przypadku ogólnym stan układu opisuje się przez macierz gęstości ρ . Jeżeli układ złożony z dwóch podukładów A i B opisujemy poprzez stan czysty $|\psi\rangle$, to wystarczy rozróżnić dwa przypadki:

1) układ nie wykazuje żadnych korelacji i można go opisać stanem iloczynowym

$$|\psi\rangle = |\varphi_A\rangle \otimes |\varphi_B\rangle, \quad (1)$$

2) układ opisywany jest stanem, którego nie da się zapisać w postaci (1). Taki stan przedstawia korelacje kwantowe pomiędzy obydwoma podukładami i zwany jest *stanem splątany*m. Najbardziej znanym przypadkiem jest *stan Bella*

$$|\psi^+\rangle = (|0\rangle \otimes |0\rangle + |1\rangle \otimes |1\rangle) / \sqrt{2}. \quad (2)$$

Używając ogólniejszego formalizmu macierzy gęstości, stany mieszane dzieli się na trzy klasy:

Ia) stany nieskorelowane (iloczynowe)

$$\rho_A \otimes \rho_B, \quad (3)$$

gdzie ρ_A i ρ_B opisują odpowiednio stany podukładów A oraz B,

Ib) stany skorelowane klasycznie (kombinacje wypukłe stanów iloczynowych)

$$\rho = \sum_i p_i (\rho_A)_i \otimes (\rho_B)_i, \quad (4)$$

gdzie $p_i > 0$ oraz $\sum_i p_i = 1$,

II) wszystkie inne stany, których nie da się przedstawić w postaci (4).

Stany z klasy Ia i Ib nazywamy separowalnymi, gdyż wykazują brak korelacji lub co najwyżej korelacje klasyczne. Natomiast stany z grupy II wykazują korelacje kwantowe i noszą nazwę stanów splątanych, gdyż stanowią uogólnienie klasy 2) na stany mieszane. Zauważmy, że powyższa definicja pochodząca od Wernera [4] jest elegancka matematycznie, ale mało przyjazna w użyciu, gdyż dla danej macierzy gęstości ρ trudno zobaczyć, czy postać (4) istnieje.

Kryteria kwantowej separowalności

W pracy [5] opublikowanej w roku 1994 Ryszard Horodecki przedstawił warunek konieczny, aby dany stan mieszany ρ był separowalny. Warto dodać, że już wtedy do współpracy nad problemem separowalności wciągnął swego najstarszego syna Pawła, wówczas studenta fizyki. Dalszy postęp w analizie problemu zawdzięczamy Peresowi, który zauważył [6], że każdy stan separowalny ma własność PPT (positive partial transpose), co oznacza

$$(\mathbb{1} \otimes T)\rho \geq 0, \quad (5)$$

gdzie T oznacza transpozycję macierzy, a $\mathbb{1}$ to operacja jednostkowa.

Kluczowym osiągnięciem Ryszarda Horodeckiego, dokonany nieco później wraz z synami Pawłem i Michałem [7], było udowodnienie twierdzenia odwrotnego, które pozwala na sformułowanie warunku koniecznego i wystarczającego na separowalność dowolnej macierzy gęstości ρ o wymiarze $d = 4$:

ρ jest separowalne wtedy i tylko wtedy, gdy ma własność PPT.

A więc macierz gęstości ρ przedstawia stan splątany układu dwóch kubitów, gdy częściowo transponowana macierz $(\mathbb{1} \otimes T)\rho$ nie jest dodatnio określona, co łatwo sprawdzić poprzez jej diagonalizację. Ten wynik wszedł do literatury światowej pod nazwą kryterium PPT Peresa–Horodeckich. Miło jest dodać, że wynik Horodeckich opiera się na własności rozkładalności odwzorowania dodatniego działającego na macierze gęstości o wymiarze dwa, udowodnioną już w roku 1973 przez prof. Stanisława Woronowicza [8] z Katedry Metod Matematycznych Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

Kolejnym ważnym rezultatem laureata było wykazanie, że dla układów opisywanych w wyżej wymiarowych przestrzeniach Hilberta ($d \geq 8$) istnieją stany spełniające własność (5), a mimo to należące do stanów splątanych. Jednocześnie udowodniono, że takich stanów nie da się lokalnie przekształcić do postaci stanów Bella (2), a więc zjawisko to nazwano splątaniem związanym (*bound entanglement*). Takie nietypowe stany mogą być jednak przydatne w niektórych protokołach przetwarzania informacji kwantowej [9].

Świadczenie splątania kwantowego

Kryterium dodatniości (5) jest wygodne do zbadania separowalności macierzy gęstości wypisanej na tablicy, lecz częściowej transpozycji nie da się przeprowa-

dzić w laboratorium. Ryszard Horodecki wraz ze starszymi synami opracował też alternatywne kryterium separowalności o wielkim znaczeniu praktycznym. Dla każdego stanu splątanego ρ istnieje operator hermitowski W , zwany świadkiem splątania, taki że

$$\text{Tr}(W\rho) < 0, \quad (6)$$

podczas gdy dla każdego stanu separowalnego σ zachodzi relacja $\text{Tr}(W\sigma) \geq 0$. Ciekawym zbiegiem okoliczności ten wynik oparty jest na własnościach odwzorowań dodatnich oraz operatorów blokowo dodatnich badanych w pracy innego polskiego fizyka, prof. Andrzeja Jamiołkowskiego, w latach siedemdziesiątych [10]. W praktyce operator W można traktować jako obserwabłę, a więc mierząc ją w stanie ρ otrzymujemy kryterium realizowane doświadczalnie: ujemny wynik pomiaru dowodzi splątania badanego stanu. Pewnym wyzwaniem pozostaje odszukanie świadka W , odpowiedniego dla analizowanego stanu ρ oraz przedstawienie go w postaci kombinacji wielkości mierzalnych. Te problemy da się jednak rozwiązać w praktyce, np. w doświadczeniach optycznych ze skorelowanymi fotonami [11].

Dorobek Laureata zawiera też wiele innych ważnych wyników dotyczących nieintuicyjnych własności stanów splątanych oraz możliwości ich wykorzystania w informacji kwantowej. Najciekawszym przykładem jest znalezienie przypadków, w których poprawnie zdefiniowana matematycznie informacja kwantowa może być ujemna, oraz wyjaśnienie tego zjawiska za pomocą stanów splątanych. Wieloletnie badania Laureata w tej dziedzinie zostały podsumowane w pracy przeglądowej „Quantum entanglement” [12], przyjętej do druku w prestiżowym czasopiśmie *Reviews of Modern Physics*. Warto podkreślić, że autorem tego artykułu, który już jako preprint znany był w środowisku pod nazwą H^4 , jest Ryszard Horodecki wraz z pełnym zbiorem swoich synów: Pawłem, Michałem oraz Karolem.

Krajowe Centrum Informatyki Kwantowej

Od roku 2007 Ryszard Horodecki jest profesorem zwyczajnym nauk fizycznych na Uniwersytecie w Gdańsku. Był inicjatorem powstania Krajowego Centrum Informatyki Kwantowej (KCIK), które w roku 2007 powstało w Trójmieście na mocy porozumienia siedmiu polskich uczelni oraz Polskiej Akademii Nauk. Aktualnie laureat nagrody FNP kieruje działalnością Centrum. Dzięki wynikom uzyskanym w ciągu ostatniej dekady przez prof. Horodeckiego oraz jego współpracowników Gdańsk jest powszechnie postrzegany jako jeden z czołowych na świecie ośrodków badań nad teorią przetwarzania informacji kwantowej.

Już od kilku lat w praktyce realizuje się kwantowe protokoły szyfrowania informacji, a w wielu ośrodkach trwają prace nad konstrukcją nowych algorytmów kwantowych oraz badania nad doświadczalną realizacją coraz bardziej złożonych bramek kwantowych. Jednakże do zbudowania komputera kwantowego, który rozwiązałaby jakiś konkretny problem szybciej niż komputery klasyczne,

droga jeszcze daleka. Dzięki powstaniu KCIK w Gdańsku możemy jednak mieć nadzieję, że do powstania nowej techniki obliczeń kwantowych swoją cegiełkę dorzucą także uczeni z Polski.

Sum ergo cogito

Ryszard Horodecki jest autorem 66 artykułów opublikowanych w czasopismach z listy filadelfijskiej, które łącznie były cytowane prawie 3000 razy. Od roku 1999 kierował na Uniwersytecie Gdańskim czterema programami ramowymi UE dotyczącymi teorii informacji kwantowej. Uprawianie fizyki teoretycznej na prawdziwie światowym poziomie nie przeszkodziło mu w kontynuowaniu swego młodzieńczego zainteresowania filozofią oraz poezją. W roku 2003 opublikował tomik poezji [13], w którym doświadczenia egzystencjalne zostają powiązane z pragnieniem przenikania tajemnic przyrody.

- [1] A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, *Phys. Rev.* **47**, 777 (1935).
 [2] J.S. Bell, *Physics* **1**, 195 (1964).

- [3] A. Aspect, J. Dalibard, G. Roger, *Phys. Rev. Lett.* **49**, 1804 (1982).
 [4] R.F. Werner, *Phys. Rev.* **A40**, 4277 (1989).
 [5] Ryszard i Paweł Horodeccy, *Phys. Lett.* **A197**, 147 (1994).
 [6] A. Peres, *Phys. Rev. Lett.* **77**, 1413 (1996).
 [7] Michał, Paweł oraz Ryszard Horodeccy, *Phys. Lett.* **A223**, 1 (1996).
 [8] S. Woronowicz, *Commun. Math. Phys.* **51**, 243, (1976).
 [9] Paweł, Michał oraz Ryszard Horodeccy, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 1056 (1999).
 [10] A. Jamiołkowski, *Rep. Math. Phys.* **3**, 275 (1972).
 [11] M. Barbieri i in., *Phys. Rev. Lett.* **91**, 227901 (2003).
 [12] Ryszard, Paweł, Michał i Karol Horodeccy, preprint quant-ph/0702225; *Rev. Mod. Phys.* (2009), w druku.
 [13] R. Horodecki, *Sum ergo cogito* (Wydawnictwo Marpress, Gdańsk 2003).

Karol Życzkowski

Instytut Fizyki UJ

Kraków

oraz Centrum Fizyki Teoretycznej PAN

Warszawa

PTF



Oddział Łódzki

15 grudnia 2008 r. na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Łódzkiego odbyło się zebranie sprawozdawczo-wyborcze członków Oddziału. Po udzieleniu absolutorium dotychczasowemu Zarządowi w tajnym głosowaniu wyłoniono nowy Zarząd w składzie: Tadeusz Wibig – przewodniczący, Magdalena Zych – sekretarz, Paweł Barczyński – skarbnik, Jolanta Prywer (z Instytutu Fizyki Politechniki Łódzkiej) oraz Anna Piotrowska (XXIV LO im. Marii Skłodowskiej-Curie w Łodzi) – członkowie. Korespondentem Oddziału jest autor tej notki (z WFILS UŁ). W okresie sprawozdawczym (od 12 grudnia 2006 r. do 15 grudnia 2008 r.) liczba członków PTF w Oddziale Łódzkim zwiększyła się i wynosi aktualnie 103 osoby. Oddział organizował zebrania Zarządu zgodnie z wymogami statutu oraz prowadził inne formy działalności.

W gmachu WFILS Uniwersytetu Łódzkiego zostało wygłoszonych 8 tzw. referatów plenarnych. W ramach dzia-

łalności popularyzatorskiej wygłoszono w Łódzkim Domu Kultury 13 referatów dla młodzieży i mieszkańców Łodzi. Tradycyjnie (dwukrotnie, tj. w latach 2007 i 2008) Oddział ufundował nagrody książkowe dla najlepszych zawodników Olimpiady Fizycznej naszego regionu, a przewodniczący Oddziału brał udział w uroczystym zakończeniu i podsumowaniu zawodów II stopnia.

12 czerwca 2007 r. w Auli WFILS Uniwersytetu Łódzkiego odbył się III konkurs szkolny z fizyki pt. Fizyka da się lubić. W roku akademickim 2007/08 oraz 2008/09 Oddział wspólnie z Łódzkim Centrum Doskonalenia Nauczycieli i Kształcenia Praktycznego w Łodzi organizował (i organizuje) warsztaty dla nauczycieli, na których zajęcia prowadzili (i prowadzą) nauczyciele akademicy, w tym także członkowie naszego Oddziału.

Na zakończenie należy wspomnieć o intensyfikacji kontaktów ze szkołami, o czym świadczy udział przedstawicieli Oddziału w 5 imprezach ogólnoszkolnych poza terenem uczelni i organizowanych przez samych nauczycieli.

Michał Tadeusz Szanecki



Nowy Zarząd Oddziału Łódzkiego; od lewej Anna Piotrowska, Magdalena Zych, Tadeusz Wibig, Jolanta Prywer oraz Paweł Barczyński (fot. autor notki)