

Przykład perkolacji na plastrze miodu.  
Woda płynie przez pola ciemne.

perkolacje są interesującym modelem. W naszej analizie badaliśmy „oddzielnie” ścieżki długości  $n$ , tymczasem wiele z nich się pokrywa. Mimo że przedstawione argumenty można poprawić, uzyskanie wartości  $p_c$  wymagało znacznie bardziej zaawansowanych metod, których opracowanie trwało 20 lat i zostało uwieńczone dowodem Harrego Kestena pokazującym, że  $p_c = 1/2$ .

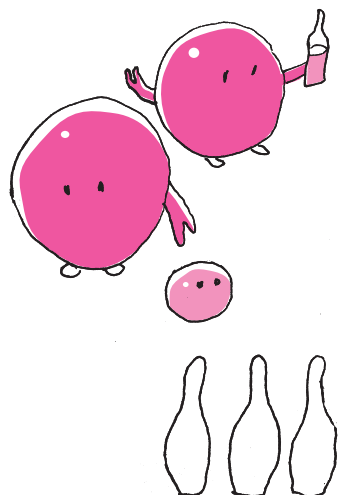
Uzyskanie dokładnych wartości prawdopodobieństwa krytycznego dla innych grafów często jest niemożliwe. Zaskakująco nie przeszkadza to w badaniu zachowania perkolacji w punkcie krytycznym. Jest to najbardziej aktywne pole rozwoju teorii (te zagadnienia były badane przez Smirnowa). Mimo że wykazano to ściśle w małej ilości przypadków, spodziewamy się, że zachowanie w dużej skali w tym punkcie zależy głównie od wymiaru grafu (na przykład zachowanie perkolacji na „kartce w kratkę” będzie podobne jak na „plastrze miodu”). Fenomen ten, zwany uniwersalnością, jest przedmiotem intensywnych badań, poprzez swoje związki z innymi dziedzinami matematyki. Zapewne w najbliższych latach doprowadzi do nowych fascynujących wyników.

## Interpretacje teorii kwantów

Jan CHWEDEŃCZUK\*

\*Instytut Fizyki Teoretycznej, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

Drobne pęknięcia fundamentów mechaniki klasycznej i klasycznej elektrodynamiki, które objawiły się w drugiej połowie XIX wieku, doprowadziły do niewyobrażalnego przełomu naukowego i technologicznego. Narodziła się mechanika kwantowa, a opowieść o jej sformułowaniu i zaprzęgnięciu do realizacji naszych potrzeb to historia triumfu ludzkiego umysłu – narządu, który pierwotnie służył przede wszystkim do gonienia mamuta. Trudno wymienić wszystkie korzyści, jakie na co dzień czerpiemy ze znajomości tej teorii. Układy scalone w każdym komputerze czy telefonie komórkowym oparte są na tranzystorach półprzewodnikowych, których konstrukcja wymaga znajomości kwantowej teorii ciała stałego. Tenże telefon prawdopodobnie umożliwia komunikację w ramach systemu GPS, który działa dzięki precyzyjnej znajomości jednostki czasu. Kiedyś sekundę definiowało się jako ułamek doby ziemskiej, współczesna sekunda to 9 192 631 770 okresów oscylacji elektronu w wyniku przejścia między dwoma poziomami energetycznymi w atomie cezu 133 [1]. W przyszłości jednostka czasu oparta będzie na jeszcze bardziej egzotycznym zjawisku kwantowym – okresowy sygnał pochodzić będzie od przejścia między dwoma poziomami energetycznymi w samym jądrze atomowym, tym razem atomu toru 229 [2]. Oscylacje takie wzbudza się laserem, który stanowi jeszcze jeden przykład spożytkowania zjawisk kwantowych. Laser znajduje zastosowanie w medycynie, odtwarzaczach płyt CD czy w laboratoriach badawczych. Wszystko wskazuje na to, że najbliższe lata przyniosą rozkwit technologii kwantowych, o ile tylko globalny konflikt bądź dramatyczne zmiany klimatyczne nie zahamują rozwoju cywilizacyjnego. Grafen, fuzja jądrowa, czy nano-technologie – przyszłość rysuje się kwantowo.



Oprócz zastosowań technologicznych ważny jest filozoficzny aspekt teorii kwantów i jej wpływ na nasze rozumienie otaczającego świata. W klasycznym ujęciu cząstka (na przykład elektron albo piłka tenisowa) porusza się po trajektorii zdeterminowanej przez działające nań siły. Mechanika kwantowa nie dopuszcza istnienia dokładnie określonych trajektorii. W zamian opisuje cząstki za pomocą funkcji falowej, która pozwala na „współistnienie” wielu położen i pędów naraz. To tak, jakby rysować tor cząstki na kartce grubym flamastrem, a nie cienkopisem. Teoria kwantów określa, jak gruba jest kreska i po jakiej krzywej podąża, ale nie dopuszcza, by flamaster był nieskończenie cienki, jak to ma miejsce w przypadku klasycznym.

Skoro funkcja falowa jest „rozmyta”, to można by przyjąć, że mechanika kwantowa przewiduje, że cząstka jest w wielu miejscach naraz. I tu zaczynają się schody – albowiem takie stwierdzenie jest jawnie sprzeczne z wynikami obserwacji empirycznych. Ilekroć bowiem spojrzymy na obiekt fizyczny, jest on dobrze zlokalizowany w przestrzeni. Innymi słowy, elektron jest punkcikiem

zarejestrowanym przez detektor, a nie rozmytą obszerną plamą czy zbiorem rozsianych punktów. Stąd wniosek o fundamentalnym znaczeniu – zdaje się, że obserwator nie ma dostępu do funkcji falowej. A skoro tak, to jak rozumieć ten obiekt matematyczny?

Z pomocą przychodzą *interpretacje* mechaniki kwantowej [3]. Wśród nich prym wiedzie interpretacja kopenhaska [4], sformułowana w latach dwudziestych XX w. przez Nielsa Bohra i Wernera Heisenberga. Mówi ona, że funkcja falowa określa prawdopodobieństwo, z jakim można znaleźć cząstkę w danym miejscu i chwili czasu. Stąd jej rozmyty kształt, gdyż prawdopodobieństwo, w odróżnieniu od dobrze określonej trajektorii, może rozciągać się na całe obszary. Każdy akt obserwacji prowadzi do „kolapsu funkcji falowej” – cząstka lokalizuje się w pewnym punkcie. To, gdzie ją znajdziemy, jest zupełnie przypadkowe. Możemy jedynie określić, znając funkcję falową, z jakim prawdopodobieństwem wypadnie dany wynik.

Zauważmy, że w ramach tej interpretacji mechaniki kwantowej funkcja falowa nie opisuje realnego świata fizycznego, lecz jedynie dostarcza prawdopodobieństw zdarzeń w tym świecie. Interpretacja kopenhaska nie odpowiada na pytanie, jaki jest świat, gdy nikt nie patrzy i kim jest obserwator. Niemniej to podejście do teorii kwantów daje doskonałą zgodność z doświadczeniem – funkcja falowa w pełni opisuje wszystkie statystyczne własności układów kwantowych. Ponadto jest to najpowszechniejsza, budząca najmniej kontrowersji i najczęściej nauczana interpretacja mechaniki kwantowej.

#### Literatura

- [1] *Base unit definitions: Second – NIST*.
- [2] Lars von der Wense et al. *Nature*, 533(7601):47, 2016.
- [3] Wikipedia, „*Interpretations of quantum mechanics*”.
- [4] Wikipedia, „*Copenhagen interpretation*”.
- [5] Wikipedia, „*Many-worlds interpretation*”.
- [6] Wikipedia, „*De Broglie–Bohm theory*”.

A może w wyniku pomiaru nie dochodzi do kolapsu funkcji falowej? Może obserwator widzi cząstkę we wszystkich możliwych konfiguracjach naraz? Mówimy, że tworzy on z badanym obiektem stan splątany – koreluje się z wszelkimi wynikami dopuszczanymi przez funkcję falową i wchodzi w stan superpozycji. Dlaczego zatem obserwator nie jest świadomy współistnienia wielu wyników pomiaru, lecz wręcz przeciwnie – ma wrażenie, jakby realizowała się tylko jedna możliwość? Zwolennicy tego podejścia do mechaniki kwantowej, zwanego interpretacją wielu światów [5], argumentują, że ciężko jest zaobserwować superpozycję dużych obiektów (detektorów czy patrzących ludzi), lecz gdybyśmy mieli taką możliwość, powinniśmy dostrzec kamerę „naraz” widzącą badany obiekt w różnych położeniach. Interpretacja wielu światów rozwinięta została przez Hugh Everetta w roku 1957, jej orędownikiem jest wybitny polski fizyk Wojciech Żurek, do tego grona należał Stephen Hawking.

Wielu fizyków i filozofów głowiło się nad teorią kwantów, stąd też mnogość jej interpretacji. Warto tu wspomnieć o koncepcji Louisa de Broglie’a i Davida Bohma (interpretacja bohmowska [6]), nadającej funkcji falowej element realności. Są też podejścia zahaczające o mistycyzm, łączące mechanikę kwantową z buddyzmem, a nawet z okultyzmem. Jakakolwiek jest prawda, jedno jest niewątpliwe: nie ma zgody co do tego, jak interpretować teorię kwantów – fundamentalną teorię mikroświata.

## Rozróżnianie słów

Wojciech CZERWIŃSKI

Żeby przedstawić problem otwarty, o którym chcemy opowiedzieć, przypomnimy intuicję stojącą za pojęciem automatu skończonego, które zresztą niedawno pojawiło się w migawce informatycznej w *Delcie* 5/2018.

Deterministyczny automat skończony ma zbiór stanów  $Q$ , z których jeden jest początkowy, a niektóre są akceptujące. Taki automat czyta słowo wejściowe od lewej do prawej. Zaczyna przed pierwszą literą i jest wtedy w stanie początkowym. Następnie, w zależności od litery w słowie, którą aktualnie widzi i stanu, w którym jest, uaktualnia swój stan i przesuwa się w prawo po słowie. Jeśli po przeczytaniu ostatniej litery automat znajduje się w stanie akceptującym, to akceptuje słowo wejściowe, a w przeciwnym razie je odrzuca.

Przykładowo automat może akceptować słowa, których długość przystaje do 2 modulo 5. Wówczas naturalnym zbiorem stanów jest  $Q = \{0, \dots, 4\}$ , stan