



**prof. dr hab.
Jan Chwedeńczuk**

Jest profesorem nadzwyczajnym na Uniwersytecie Warszawskim na Wydziale Fizyki, gdzie obronił doktorat poświęcony gazom kwantowym, po czym spędził dwa lata na stażu w Trydencie, gdzie zajmował się metrologią kwantową. Obecnie prowadzi badania i wykłada na Wydziale Fizyki UW. Specjalizuje się w podstawach mechaniki kwantowej, kwantowej nielokalności i metrologii kwantowej.
jan.chwedeniczuk@fuw.edu.pl

W POGONI ZA ŚWIATŁEM

Długość, szerokość i głębokość.
Znajomość tych trzech parametrów pozwala oszacować, czy stół zmieści się w jadalni, a łóżko w sypialni. Posługując się trzema wymiarami do opisu przestrzeni, w której żyjemy, rzadko zadajemy sobie pytanie o jej naturę.



Gdy w drugiej połowie XIX wieku sformułowano kompletną teorię fizyczną opisującą klasyczne zjawiska elektromagnetyczne (takie jak przepływ prądu w miedzianych drutach czy działanie kompasu), stało się jasne, że światło rozchodzi się pod postacią fali. Teoria przewidywała, że prędkość światła wynosi około 300 tys. km na sekundę (bardzo dużo), nie precyzując, względem czego ta prędkość jest określona. Gdy mówimy, że auto jedzie z prędkością 100 km na godzinę, w domyśle wiadomo, że wielkość ta jest określona względem powierzchni Ziemi i znajdujących się na niej miast i wsi. Lecz dlaczego teoria elektromagnetyzmu nie mówi o tym, względem czego określona jest prędkość światła?

By uporać się z tym problemem, przywołano pojęcie eteru – enigmatycznej substancji, która wypełnia Wszechświat i wyznacza absolutny układ odniesienia. Ostatecznie to względem niej, argumentowano, określony jest wszelki ruch. Co za tym idzie, te 300 tys. km na sekundę to prędkość, z którą światło porusza się względem eteru. Rzecz w tym, że doświadczenia (przede wszystkim słynny eksperyment Michelsona-Morleya), obalały w ramach osiągalnej na przełomie wieków precyzji hipotezę istnienia eteru. Pytanie o układ odniesienia, a zatem o to, względem czego określa się prędkość dla fal świetlnych, pozostawało otwarte.

Na początku XX wieku na scenę wkracza Albert Einstein i formułuje następującą tezę: bez względu na to, z jaką (stałą) prędkością będziemy gonić falę świetlną bądź przed nią uciekać, mierzona przez nas jej prędkość zawsze będzie taka sama i będzie wynosić tyle, ile przewiduje teoria elektromagnetyzmu. Innymi słowy, we wszystkich układach, które poruszają się względem siebie ze stałą prędkością (mówimy o nich, że są układami inercyjnymi), prędkość światła jest stała. Jest to stwierdzenie zdumiewające i niezgodne z codziennym doświadczeniem. Przecież gdy ktoś nam ucieka, to im szybciej będziemy go gonić, tym wolniej się od nas oddala; gdy będziemy biec w przeciwnym kierunku, prędkość, z którą się oddalamy, będzie rosła. Tymczasem Einstein sformułował postulat stałej prędkości światła i wykazał, że niesie on za sobą poważne konsekwencje dla postrzegania przestrzeni fizycznej i upływu czasu.

Układ odniesienia

By spełnić postulat stałości prędkości światła we wszystkich układach inercyjnych, trzy wymiary przestrzenne trzeba połączyć z czwartym, związanym

z upływem czasu. W ten sposób powstaje czterowymiarowa *czasoprzestrzeń*. Rozmiary obiektów fizycznych i czas, który im upływa, stają się zależne zarówno od siebie nawzajem, jak i od tego, z jaką prędkością porusza się osoba obserwująca dany przedmiot. Czas i przestrzeń nie są pojęciami absolutnymi, lecz należy za każdym razem precyzować, względem jakiego układu są mierzone. Stąd mówimy o (szczegółnej) teorii względności Einsteina.

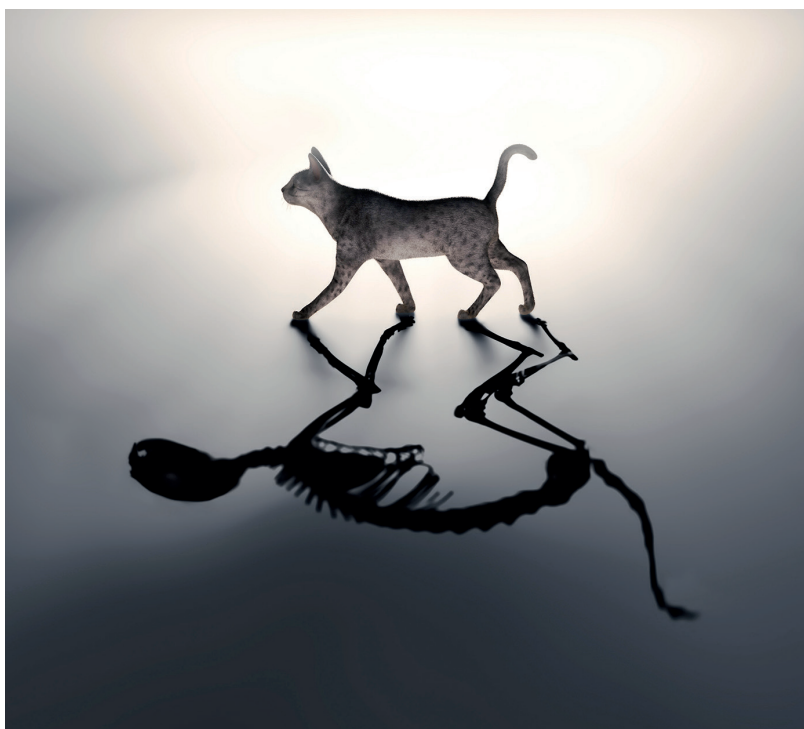
Rewolucyjne wnioski płynące ze szczególnej teorii względności zostały potwierdzone w licznych doświadczeniach, a Albert Einstein kontynuował prace, formułując ostatecznie ogólną teorię względności. Wynika z niej, że *czasoprzestrzeń*, nie dość że czterowymiarowa, to ma jeszcze skomplikowaną strukturę, a na jej kształt wpływa obecność masywnych obiektów, takich jak planety czy gwiazdy. Im bliżej przyciągającego grawitacyjnie ciała niebieskiego, tym czas płynie wolniej (względem układu oddalonego od tego ciężkiego obiektu). Porównanie wskazań zegarków znajdujących się na powierzchni Ziemi i tych, które są umieszczone na pokładach satelitów tworzących system nawigacji GPS, pokazuje, że różnice wskazań, choć minimalne, są na tyle istotne, że gdybyśmy, nie znając ogólnej teorii względności, nie byli ich świadomi i nie brali na nie poprawki, system nawigacji satelitarnej byłby na tyle niedokładny, że bezużyteczny. Deformacja *czasoprzestrzeni* może być tak drastyczna (w pobliżu bardzo masywnego obiektu), że powstaje obszar „wylączony” z otaczającego Wszechświata – taki, z którego nic nie może się wydostać. Jest to czarna dziura, której tajemnicze własności stanowią inspirację dla świata nauki i kultury.

Równoległe z rozwojem obu teorii względności na świat przyszła mechanika kwantowa. Już w ostatnich latach XIX wieku i na początku wieku XX pojawiły się pierwsze wyniki wskazujące na to, że klasyczna teoria elektromagnetyzmu niepoprawnie opisuje niektóre zjawiska i nie dostarcza odpowiedzi np. na pytanie, dlaczego atomy – rozumiane jako dodatnio naładowane jądra atomowe, wokół których krążą elektrony – nie zapadają się w sobie w ułamku sekundy. Gdyby tak było, materia – ta, która nas otacza, i ta, z której się składamy – byłaby niestabilna, a świat, który znamy, nie mógłby istnieć. Ta ewidentna sprzeczność między przewidywaniami teorii a stanem faktycznym wymagała wyjaśnienia, którego nie mogła doświadczyć „stara” fizyka.

Kot Schrödingera

Proces narodzin mechaniki kwantowej, tłumaczącej zagadkę stabilności atomów i mnóstwo innych zjawisk zachodzących w skali mikro, był rozłożony w czasie. W latach 20. XX wieku teoria zdawała się gotowa – Erwin Schrödinger sformułował podstawowe równanie i zaproponowano interpretację jego rozwiązań.

ACADEMIA PREZENTACJE Fizyka



MOPIC/SHUTTERSTOCK.COM

Kot Schrödingera
– martwy i żywy

Tyle że interpretacja ta prowadzi do wniosków tak odbiegających od doświadczeń życia codziennego, że do dziś trwają spory o jej słuszność.

Opis świata jako zbioru obiektów bytujących w trójwymiarowej przestrzeni z dodatkowym parametrem, którym jest czas (tradycyjna fizyka newtonowska), bądź w czterowymiarowej czasoprzestrzeni (teorii Einsteina) w mechanice kwantowej jest zastąpiony przez abstrakcyjne pojęcie stanu (będącego obiektem zawierającym pełną informację o układzie), który ewoluuje w wielowymiarowej (nawet nieskończenie wymiarowej) przestrzeni, zwanej przestrzenią Hilberta. Ta różnica w opisie niesie za sobą zasadnicze konsekwencje – nie jest to zatem techniczne zagadnienie, ważne tylko dla osób zajmujących się fizyką. W przestrzeni Hilberta nawet pojedynczy elektron może bytować w nieskończenie wielu przeciwstawnych stanach naraz, np. w wielu różnych miejscach równocześnie. Takie współbytovanie nazywamy superpozycją, czyli właśnie złożeniem wielu (co najmniej dwu) możliwości. Tyle że nikt nigdy nie widział elektronu czy jakiegokolwiek innego obiektu będącego w wielu miejscach równocześnie. Jak zatem wyjaśnić tę pozorną sprzeczność?

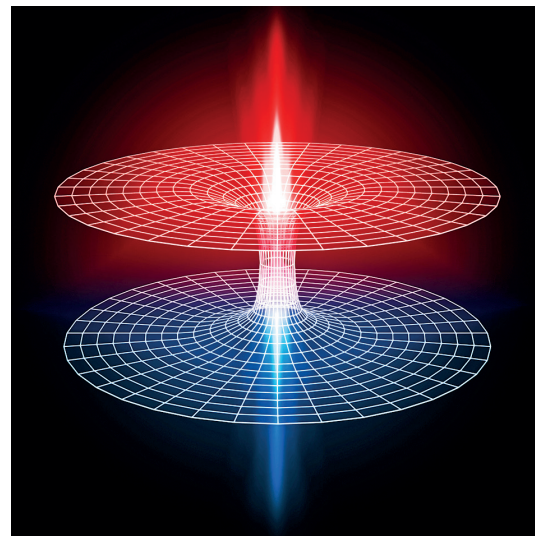
Ojcowie założyciele mechaniki kwantowej interpretowali superpozycję w sposób następujący: współbytovanie układów fizycznych w przeciwstawnych stanach należy traktować jako nieuniknioną własność obiektów kwantowych. Akt pomiaru – włączenie kamery, czujnika, spojrzenie osoby wykonującej doświadczenie – nieuchronnie niszczy tę superpozycję. Obiekt z wszelkich dostępnych możliwości „losuje”

jedną. Proces ten jest naprawdę losowy – nie da się w żaden sposób przewidzieć wyniku pojedynczego aktu obserwacji, można jedynie powiedzieć, które rezultaty są bardziej, a które mniej prawdopodobne. Na mocy tej interpretacji, żaden obserwator nie ma dostępu do „czystego” obiektu, tj. takiego, który zamieszkuje przestrzeń Hilberta z jej bogactwem możliwości. Obserwacja sprawia, że układ się zapada do tylko jednej z nich. Możemy mu wtedy przez krótką chwilę przypisać klasyczne własności, np. trzy współrzędne opisujące jego położenie w „tradycyjnej” przestrzeni, którą zamieszkujemy. Pozostawiony bez opieki, obiekt kwantowy natychmiast wraca do swojego naturalnego stanu, w którym jawi się jako rozczłonkowany byt będący w niemożliwej do zrozumienia superpozycji wielu możliwości.

Zazwyczaj gdy opowiada się o superpozycji, przywołuje się doświadczenie myślowe Schrödingera, który argumentował, że gdyby konsekwentnie stosować reguły mechaniki kwantowej, można by przygotować superpozycję kota żywego i martwego. W jakim stanie jest kot naprawdę – tego nie wiemy, dopóki na niego nie popatrzymy, ale wtedy natychmiast enigmatyczny proces losowania wybierze którąś z możliwości i nigdy nie dowiemy się, co było przed tym, gdyśmy na niego spojrzeli.

Z powyższych rozważań wynika, że w klasycznej (czyli niekwantowej) fizyce pojęcie przestrzeni należy zastąpić przez czterowymiarową czasoprzestrzeń – tego wymagają od nas teorie względności Einsteina. W opisie kwantowym układy ewoluują w wielowymiarowej przestrzeni Hilberta, w której mogą współbytować w wielu przeciwstawnych możliwościach – czyli znajdować się w stanie superpozycji. Pozostaje nam uporać się zasadniczym zagadnieniem – czym właściwie jest przestrzeń. Odpowiedź na to pytanie jest prosta, niemniej nie zmieści się na marginesie tego tekstu. ■

Most Einsteina-Rosena
w tunelu czasoprzestrzennym



YURKOWAN/SHUTTERSTOCK.COM

Chcesz wiedzieć
więcej?

Dragan A., *Kwantechizm, czyli klatka na ludzi*, Warszawa 2019.

Kaku M., *Hiperprzestrzeń*, Warszawa 2021.

Penrose R., *Nowy umysł cesarza*, Poznań 2021.