



Nieustępliwość problemu interpretacji mechaniki kwantowej¹

Andrzej Staruszkiewicz

Instytut Fizyki UJ

Streszczenie

Autor uważa, że problem interpretacji mechaniki kwantowej jest realnym problemem naukowym. Jako taki jest problemem bez precedensu w historii nauki: 80 lat wysiłków wielu wybitnych uczonych nawet nie napoczęło tego problemu. Współczesne dyskusje często dotyczą problemów wielokrotnie dyskutowanych w przeszłości. Autor zastanawia się, jak mogłoby wyglądać rozwiązanie tego niezwykłego i uciążliwego problemu.

Historia i natura problemu

Niedawno minęło 80 lat od chwili gdy Erwin Schrödinger napisał równanie różniczkowe cząstkowe zwane od tego czasu równaniem Schrödingera. Równanie to jest ładząco proste, opisuje ruch fal zwanych od tego czasu falami materii. Fale materii są pod wieloma względami podobne do innych fal badanych przez fizykę, np. fal elektromagnetycznych lub akustycznych. W szczególności, przy spotkaniu z granicą dwu ośrodków, fala materii, tak jak fala elektromagnetyczna lub akustyczna, dzieli się na dwie części, falę, która wchodzi do drugiego ośrodka i falę odbitą. W przypadku fal elektromagnetycznych lub akustycznych oznacza to także podział energii: energia fali pierwotnej dzieli się na energię fali wchodzącej do drugiego ośrodka i energię fali odbitej. Tymczasem zupełnie niewątpliwe doświadczenia pokazują, że energia cząstek elementarnych takich jak elektron, nigdy nie dzieli się na granicy dwu ośrodków, tylko albo w całości przechodzi do drugiego ośrodka, albo w całości odbija się. Otóż, tego zupełnie niewątpliwego faktu doświadczalnego nie da się wywnioskować z równania Schrödingera. Przeciwnie, ktoś znający zasady fizyki teoretycznej, np. XIX wieczny fizyk taki jak Helmholtz lub lord Rayleigh, po przestudiowaniu równania Schrödingera byłby przekonany, że energia fali opisanej przez to równanie dzieli się na granicy ośrodków na energię wchodzącą i energię odbitą. Można by powiedzieć, że równanie Schrödingera po prostu nie opisuje prawidłowo ruchu fal materii, gdyby nie dodatkowa, zdumiewająca okoliczność: równanie Schrödingera pozwala, przy pomocy przepisu podanego przez Borna, obliczyć prawdopodobieństwo tego, że w pojedynczym akcie rozproszenia

¹ Artykuł został wygłoszony: na posiedzeniu Komisji Filozofii Nauki PAU kierowanej przez prof. Jerzego Janika oraz na seminarium „Nauka, Religia, Dzieje” zorganizowanym przez prof. Jerzego Janika pod protektoratem J.E. ks. Arcybiskupa Józefa Życińskiego.

cząstka bądź przejdzie do drugiego ośrodka, bądź zostanie odbita. Oznacza to, że między rozwiązaniami równania Schrödingera a rzeczywistością, której to równanie dotyczy, istnieje związek zupełnie nowego typu, nie mający precedensu w dotychczas znanych teoriach fizyki matematycznej.

O co naprawdę chodziło Einsteinowi w jego dyskusjach z Bohrem?

Niezwykły charakter związku między strukturą matematyczną, jaką jest równanie Schrödingera a rzeczywistością fizyczną ujawnianą przez doświadczenia z falami materii, dał powód do dyskusji, która na dobrą sprawę trwa po dzień [1]. Najbardziej znanym fragmentem tej dyskusji były dyskusje Bohra i Einsteina. Gdy ja byłem studentem, tzn. 50 lat temu, przeważał pogląd, że problemu naukowego nie ma, a Einstein reprezentuje rodzaj naukowego konserwatyizmu, który jest nie do utrzymania w fizyce kwantowej. Obecnie, na początku XXI wieku zdaje się przeważać pogląd, że jakiś problem jednak jest, aczkolwiek różni Autorzy różnie postrzegają naturę tego problemu.

Ja sam widzę ten problem następująco. Problemem jest to, że interpretacja Borna równania Schrödingera nie jest w sposób konieczny związana z samym tym równaniem. Równanie Schrödingera można by interpretować jako klasyczne równanie falowe. Tak właśnie zinterpretowałby je XIX-wieczny fizyk, np. Helmholtz. Tyle, że z interpretacji tej wynika, że na granicy dwu ośrodków energia fali dzieli się na energię wchodzącą i odbitą, co nigdy nie zachodzi dla fal materii. Zatem klasyczna interpretacja równania Schrödingera jest logicznie możliwa lecz bezużyteczna, bo przewiduje zjawiska, które nigdy nie zachodzą. Warto w tym miejscu przytoczyć dwa postulaty epistemologiczne Einsteina.

(1) Teoria fizyczna powinna zawierać w sobie swoją interpretację.

(2) Między teorią fizyczną a rzeczywistością powinien istnieć związek, ale nie taki, jaki istnieje między mięsem a rosołem zrobionym z tego mięsa, ale raczej taki, jaki istnieje między numerkiem płaszcza zostawionego w szatni a samym płaszczem. (Drugi postulat jest odrzuceniem naiwnego Arystotelizmu i wyjaśniania przy pomocy jakości.) Oba te postulaty nie są, rzecz jasna, oczywiste. Jeżeli jednak przyjąć je, a ja je przyjmuję jako bardzo trafne, to trzeba zgodzić się z tym, że mechanika kwantowa ich nie spełnia, aczkolwiek istnieje ogromny obszar zastosowań mechaniki kwantowej, w których oba te postulaty są spełnione. Warto zdawać sobie sprawę z tego, że równanie Schrödingera jest obecnie podstawowym narzędziem chemii kwantowej i związanej z nią technologii. Jednym z zastosowań chemii kwantowej są rachunki *ab initio*, których celem jest ustalenie rozmiarów i kształtów molekuł o zadanym składzie chemicznym. Otóż, jeżeli stan podstawowy molekuły jest nie zdegenerowany, to nikt nie ma cienia wątpliwości jak stosować równanie Schrödingera, po prostu oblicza się stan o najniższej energii. Jest to klasyczna procedura, doskonale znana fizykom XIX wieku. Mamy tu sytuację pełnej klarowności, w której oba postulaty epistemologiczne Einsteina są spełnione, a sama mechanika kwanto-

wa ujawnia swą niesamowitą siłę i moc predyktywną. Może się jednak zdarzyć, że stan podstawowy molekuly jest zdegenerowany, np. wskutek istnienia prawej i lewej wersji molekuly. Powstaje wówczas trudny problem, dlaczego w przyrodzie występują tylko prawe i lewe wersje molekuł a nie ich liniowe superpozycje, które też są rozwiązaniami równania Schrödingera. Degeneracja stanu podstawowego może być wynikiem współdziałania bardzo wielu niezależnych okoliczności i w tym sensie czystym przypadkiem. Jest coś głęboko niepokojącego w tym, że taki czysty przypadek zmienia wspólną teorię stanów stacjonarnych równania Schrödingera w teorię, w której istnieją filozoficzne wątpliwości co do samej zasady jej stosowania. Np. niewystępowanie superpozycji stanów makroskopowo rozróżnialnych tłumaczy się czasem przy pomocy tzw. teorii dekoherencji. Trzeba jednak zgodzić się z tym, że w fizyce teoretycznej istnieje coś takiego jak hierarchia wartości i że w tej hierarchii teoria dekoherencji stoi znacznie niżej niż teoria stanów stacjonarnych równania Schrödingera.

Dalsze argumenty za tym, że jakiś problem istnieje

Kartezjusz [2] wypowiedział niezwykle trafną myśl, że gdy dwu ludzi nie zgadza się ze sobą, to przypuszczalnie obaj nie wiedzą co mówią, gdyby bowiem jeden z nich pojmował swoją rzecz jasno i wyraźnie, to wytłumaczyłby to drugiemu, a ten zrozumiałby to. Gdyby Bohr był w posiadaniu prawdy, to nie mógłby znaleźć bardziej pojętego słuchacza niż Einstein i *vice versa*. Samo zaistnienie dyskusji Bohra z Einsteinem jest sygnałem braku jasności pojmowania u obu adwersarzy. Nikt nigdy nie prowadził takich dyskusji na temat np. ogólnej teorii względności, mimo, że teoria ta często prowadzi do wniosków bardzo trudnych dla intuicji i potocznego rozumienia. Jest tak dlatego, że ogólna teoria względności spełnia oba postulaty epistemologiczne Einsteina. Problem interpretacji mechaniki kwantowej dał początek ogromnej i stale tworzonej literaturze, którą można określić tylko jako dziennikarstwo udające fizykę teoretyczną. Np. koncepcja „wielu światów”, którą zainicjował znany fizyk John Archibald Wheeler, a zaakceptowało wielu innych też bardzo znanych fizyków, ludzi, którzy, wydawałoby się, powinni wiedzieć, co to jest fizyka teoretyczna, jest czystym nonsensem, który polega na tym, że nie zmieniając niczego w samej zasadzie stosowania równania Schrödingera, dorabia się do tej zasady bezsensowną ontologię o charakterze czysto werbalnym, bez żadnych następstw rachunkowych. Do tej samej kategorii dziennikarstwa udającego fizykę teoretyczną należy idea udziału świadomości obserwatora w akcie redukcji pakietu falowego, wypowiedziana przez laureata nagrody Nobla z fizyki Wignera. Wszystkie współczesne doświadczenia z zakresu fizyki atomowej, jądrowej lub fizyki wysokich energii odbywają się bez udziału świadomego obserwatora. Ich wynikiem są wydruki komputerowe, które od początku stanowią obiekty klasyczne, zupełnie niezależnie od tego, czy ktoś zechce je odczytać, czy nie. Uważam za oczywiste, że jeżeli skądinąd rozumni ludzie mówią

głupstwa, to, po pierwsze, jest to problem *per se*, po drugie, jest to najprawdopodobniej manifestacja innego, bardziej zasadniczego problemu, którym w tym wypadku jest brak jasności pojmowania naukowego. Uważam też, że jeżeli za dwieście lub trzysta lat ktoś napisze filozoficzną historię fizyki teoretycznej, to uzna zarówno koncepcję wielu światów, jak i koncepcję partycypacji świadomości za symptomy choroby a nie za osiągnięcia fizyki teoretycznej.

Co musiałoby się stać, żeby ten uciążliwy problem przestał wreszcie być tematem stale produkowanej i przeważnie bezwartościowej literatury?

Fizyka teoretyczna od samego początku tzn. od powstania *Principiów* Newtona posługuje się metodą, dla której w gruncie rzeczy nie ma alternatywy. Metoda ta polega na wyizolowaniu, bądź fizycznym, bądź tylko mentalnym, z całości Wszechświata pewnej jego części, która jest na tyle dobrze odseparowana od reszty Wszechświata, że badanie jej jako układu izolowanego ma sens. Przykładem może być wahadło matematyczne, od badania którego to wszystko się zaczęło. Jest jasne, że ruch Księżyca i innych ciał niebieskich ma wpływ na ruch wahadła. Wpływ ten można jednak oszacować ilościowo i zdecydować, że jest on „mały”. „Mały” znaczy tyle, że trzeba by bardzo długo czekać, żeby wpływ Księżyca zmienił fazę wahadła o 180 stopni. Dla krótkich czasów, rzędu setek czy tysięcy cykli, wpływ ten można zaniedbać. Otóż mechanika kwantowa ujawnia, że ta procedura dzielenia Wszechświata na układ w założeniu izolowany i resztę Wszechświata ma zupełnie nowe i nieoczekiwane ograniczenia. Wynika to np. z zasady nierozróżnialności cząstek elementarnych. Dwa elektrony, jeden tutaj a drugi na Księżycu, są identyczne, co znaczy, że istnieje między nimi korelacja zupełnie niezależna od odległości i siły oddziaływania między nimi. Przypuszczam, że wszystkie trudności interpretacyjne mechaniki kwantowej mają jedno wspólne źródło, a mianowicie to, że z całości Wszechświata został wyizolowany pewien układ, po czym okazuje się, że dokonana w ten sposób idealizacja była niedopuszczalna. Fundamentalna niemożność podzielenia Wszechświata na badany układ i resztę, o której można zapomnieć, ma od początku swój wyraz w strukturze matematycznej równania Schrödingera. Mianowicie, w fizyce teoretycznej istnieje tradycja opisywania układów fizycznych przy pomocy tzw. działania Hamiltona. Jest to funkcjonal o tej własności, że równania ruchu badanego układu są równaniami Lagrange’a-Eulera dla działania Hamiltona. Otóż dla dwu układów, między którymi nie działają żadne siły, działanie Hamiltona w mechanice klasycznej jest sumą działań obu tych układów, co znaczy, że ich ruchy są niezależne od siebie. Tymczasem w mechanice kwantowej tak nie jest, co znaczy, że sama tylko obecność drugiego układu ma wpływ na ruch pierwszego, mimo, że z założenia nie działają między nimi żadne siły. Jasne jest, że w takiej sytuacji uprawianie fizyki teoretycznej jest bardzo trudnym i ryzykownym przedsięwzięciem. Być może konieczna jest umiejętność enumeracji a priori tych warunków, które muszą być

spełnione, żeby dany układ mógł być uważany za izolowany. Same tylko sukcesy mechaniki kwantowej w fizyce atomowej i chemii kwantowej pokazują, że może się tak zdarzyć i często faktycznie tak się zdarza, że uważając dany układ za izolowany nie popełniamy błędu. Chodziło by zatem o to, żeby warunki stosowalności tego przybliżenia wysłowić a priori i w sposób uniwersalny tzn. ważny dla każdego układu. Roger Penrose [3] należy do tych Autorów, którzy zgadzają się z tezą, że jakiś problem istnieje. Jeżeli dobrze rozumiem Penrose'a, to jest on zdania, że w równaniu Schrödingera zawarte jest uproszczenie polegające na pominięciu drobnej nieliniowej poprawki, przypuszczalnie pochodzenia grawitacyjnego. Uproszczenie to nie ma znaczenia dla krótkich czasów i stanów stacjonarnych, natomiast zmienia jakościowo ewolucję funkcji falowej dla długich czasów. Przykłady tego typu zachowań są istotnie znane w fizyce matematycznej. Np. rozwiązania równania Kortewega-de Vriesa dla długich czasów ewolucji rozpadają się na przestrzennie izolowane solitony i to niezależnie od tego jak zostały wybrane dane początkowe Cauchy'ego. Gdyby komuś udało się skonstruować nieliniową wersję równania Schrödingera o własnościach postulowanych przez Penrose'a, to być może byłoby to coś mającego szansę akceptacji. Rudolf Haag [4] uważa, że „musimy rozróżnić między możliwościami, które są zapisane w pojęciu stanu kwantowego i faktami, które są wynikiem wyboru między różnymi alternatywami”. To jest niewątpliwie prawda, tylko Haag nie podaje jak to zrobić. Fizyka teoretyczna jest sztuką budowania modeli matematycznych rzeczywistości fizycznej. Nikomu dotychczas nie udało się uchwycić środkami fizyki teoretycznej intuicyjnie oczywistej różnicy między dokonaną i zamkniętą przeszłością a niedokonaną i otwartą przyszłością, a teoria względności wniosła do tego zagadnienia nowe i bardzo poważne trudności. Bert Schroer, niemiecki teoretyk ze szkoły Haaga, wypowiada myśl, że „relatywistyczna kwantowa teoria pola zawiera w sobie swoją własną interpretację”. Oznaczałoby to, że relatywistyczna kwantowa teoria pola, w przeciwieństwie do nierelatywistycznej mechaniki kwantowej, spełnia epistemologiczne postulaty Einsteina.

Muszę przyznać, że nie rozumiem tej wypowiedzi, podejrzewam nawet, że coś takiego nie może być prawdą. Niemniej zgadzam się, że zaangażowanie od początku relatywistycznej kwantowej teorii pola zamiast nierelatywistycznej mechaniki kwantowej, do której ogranicza się większość Autorów, stanowi krok we właściwym kierunku. Samo bowiem wypisanie i stosowanie jednocząstkowego równania Schrödingera zawiera w sobie „ontological commitment” (ontologiczny postulat – od red.), który może nas niebezpiecznie oddalać od rzeczywistości. Jednocząstkowe równanie Schrödingera w oczywisty sposób zakłada możliwość kontrolowania tożsamości cząstki w czasie, która to możliwość nie istnieje w rzeczywistości. Jak już wspomniałem, wszystkie elektrony we Wszechświecie są identyczne, co ma ten skutek, że skupienie uwagi na jednym z nich z pominięciem całej reszty zawiera w sobie niedopuszczalną idealizację.

zając, a mianowicie założenie, że jest możliwe kontrolowanie tożsamości elektronu w czasie. Rozważmy np. klasyczny eksperyment rozpraszania elektronu na dwu szczelinach. Problemem jest tutaj, jaki obraz czasoprzestrzenny i jaką sekwencję zdarzeń można by związać z tym co jest niewątpliwe, a mianowicie z faktem, że elektron na początku objawia się jako coś na tyle rozciągniętego i miękkiego, że przechodzi przez obie szczeliny jednocześnie a na końcu objawia się jako coś zlokalizowanego w bardzo małym fragmencie a priori dostępnej przestrzeni. Użycie do opisu tego zjawiska jednocząstkowego równania Schrödingera w oczywisty sposób zakłada, że ten sam elektron najpierw uległ dyfrakcji a potem został zarejestrowany przez licznik. Tymczasem jedyną rzeczą, którą możemy z uzasadnieniem twierdzić, jest to, że zarejestrowany został elektron taki sam jak ten, który uległ dyfrakcji.

Nierówności Bella

Olbrzymia i stale produkowana literatura na temat probabilistycznej interpretacji mechaniki kwantowej budzi przygnębienie. W tym morzu dziennikarstwa, literatury i kiepskiej filozofii jest chyba tylko jeden jasny punkt: nierówności Bella [5]. Powszechny entuzjazm z jakim przyjęto prace Bella potwierdza tę ocenę. Nierówności Bella, potwierdzone przez szereg niezależnych doświadczeń, pokazują, że fundamentalna niemożność odseparowania rozważanego układu od „reszty Wszechświata” jest faktem empirycznym a nie artefaktem wynikającym z przybliżonego charakteru równania Schrödingera. Nie należy więc łudzić się, że problem ma jakieś proste, dotychczas nie zauważone rozwiązanie.

Literatura

- [1] Por. np. Mara Beller, *Quantum Dialogue*, The University of Chicago Press, 1999.
David Wick, *The Infamous Boundary*, Seven Decades of Controversy in Quantum Physics, Birkhauser 1995.
Franco Selleri, *Wielkie Spory w Fizyce Kwantowej*, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego 1999.
- [2] Descartes, *Prawidła Kierowania Umysłem*, PWN 1958.
- [3] Roger Penrose, *Droga do Rzeczywistości*, Prószyński i S-ka 2006.
- [4] Rudolf Haag, *An Evolutionary Picture for Quantum Physics*, Communications In Mathematical Physics 180(1996)733. Patrz także tegoż *Trying to Divide the Universe*, kontrybucja z okazji 75 rocznicy urodzin prof. Jana Łopuszańskiego.
- [5] J.S. Bell, *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press 1993.

Prof. dr hab. Andrzej Staruszkiewicz emerytowany profesor IF UJ, były kierownik Zakładu Teorii Względności i Astrofizyki, członek korespondent PAN i czynny członek PAU. Od dekad wygrywa wszystkie ankiety studenckie jako najlepszy wykładowca w Instytucie Fizyki UJ.

