

Skuteczna, lecz niezbyt ładna

KRZYSZTOF MAŚLANKA

Bohr był nielogiczny, a jego tezy niejasne i uporczywie mętne. Ale miał rację. Einstein był konsekwentny, a jego tezy jasne i realistyczne. Ale nie miał racji.

John S. Bell (1928–1990)

W lutym 2013 roku minęło 100 lat od chwili, gdy 28-letni wówczas Niels Bohr usłyszał o formule Balmera, opisującej fragment widma atomu wodoru w zakresie widzialnym. Formuła ta, *odgadnięta* w 1884 roku przez Johanna Balmera, nauczyciela z Bazylei, stała się dla Bohra punktem wyjścia przy konstrukcji jego modelu atomu wodoru.

1. Tytuł tego artykułu powinien brzmieć: *O problemie interpretacji mechaniki kwantowej*. Ale wtedy zorientowani humanistycznie czytelnicy odłożyliby go natychmiast z niechęcią jako „trudny” albo wręcz „nudny”, wraz z dodatkową wymówką: „Nie znam się na tym”. Jest dla mnie zagadką, dlaczego to ostatnie zdanie traktowane jest zwykle jako wygodny pretekst do postawy chłodnej obojętności wobec spraw nieznanych, choć ciekawych i ważnych. Przecież równie dobrze mogłaby to być skuteczna zachęta, aby jednak poświęcić im chociaż parę chwil.

Na wstępie przypomnę pewien mało znany, ale dający do myślenia – i na pewno powszechnie zrozumiały – fakt, który powinien zachęcić do przebrnięcia przez niniejszy tekst: Aż 30% dochodu narodowego brutto Stanów Zjednoczonych oparte jest na wynalazkach wynikających z zastosowań mechaniki kwantowej¹.

2. Współczesna fizyka opiera się na dwóch głównych filarach, dwu teoriach odkrytych na początku XX wieku. Są to: teoria grawitacji Einsteina, zwana tradycyjnie, choć trochę myląco, ogólną teorią względności (1915), oraz teoria opisująca obiekty mikroświata, m.in. atomy i ich składniki, czyli właśnie wspomniana mechanika kwantowa (1925–1927).

Ta pierwsza stanowi efekt kilku lat samotnych zmagañ intelektualnego giganta; druga jest wspólnym dzie-

łem kilku, na ogół bardzo młodych fizyków – młodszych od Einsteina o jedno pokolenie. Mentorem tych ostatnich oraz gorliwym obrońcą, niemal „głównym ideologiem” mechaniki kwantowej, stał się duński fizyk Niels Bohr (1885–1962).

Tymczasem teoria Einsteina nigdy nie potrzebowała takiego „advokata z urzędu”: zawsze skutecznie broniła się sama. Także jej twórca był od początku spokojny o swe dzieło. Na pytanie, co by zrobił, gdyby w roku 1919 wyprawa naukowa Eddingtona nie odkryła przewidzianego przez jego teorię zakrzywienia promieni światła gwiazd w pobliżu Słońca, odparł po prostu: „Byłoby mi żal dobrego Pana Boga, bo teoria jest w porządku”². Trzeba dodać, że Einstein, który sam siebie określił paradoksalnym zestawieniem słów: „głęboko wierzący ateista”³, mówiąc o fizyce, miał osobliwy zwyczaj częstego powoływania się na Boga, choć ten jego „Bóg” niewiele miał wspólnego z Bogiem judaizmu i chrześcijaństwa⁴.

3. Po odkryciu obu wspomnianych wyżej teorii prawie od razu pojawiły się problemy natury filozoficznej. Podświadome przekonanie, wręcz wiara w możliwość jednego, estetycznego oraz spójnego opisu całej rzeczywistości skłoniła fizyków do prób ich uzgodnienia, połączenia, czyli „unifikacji”. Ale nie udało się to do dzisiaj. Podjęto wprawdzie kilka różnych, ambitnych prób rozwiązania tego problemu, jednak nie są one w pełni zadowalające.

Przyczyny braku powodzenia można poniekąd zrozumieć. Obydwa filary współczesnej fizyki są dramatycznie różne. Różnią się także obszary ich zastosowań: z jednej strony mikroświat atomów i cząstek elementarnych, gdzie grawitacja jest bez znaczenia; z drugiej np. rządony grawitacją Układ Słoneczny, gdzie z kolei nie widać efektów kwantowych. Stąd właśnie wszelkie

¹ Max Tegmark i John Archibald Wheeler, *100 Years of Quantum Mysteries*, „Scientific American”, February 2001, s. 68–75.

² *Einstein w cytatach*. Zebrała Alice Calaprice, Prószyński i Ska, Warszawa 1997, str. 173.

³ Ibidem, str. 165.

⁴ Krzysztof Maślanka, *Refleksje na temat wybranych epizodów z dziejów relacji nauka–wiara*, [w:] Materiały z konferencji *Astronomia: Nauka i Wiara*, 26–28 XI 2009, Akademia Jana Długosza, Częstochowa, 2011.

► próby pogodzenia stanowią tak trudne wyzwanie. Niewątpliwie trzeba tu jakiejs radykalnie nowej idei wiodącej, która mogłaby doprowadzić do postępu. Jak dotąd, mamy tylko nazwę: „kwantowa teoria grawitacji” – i niewiele więcej...

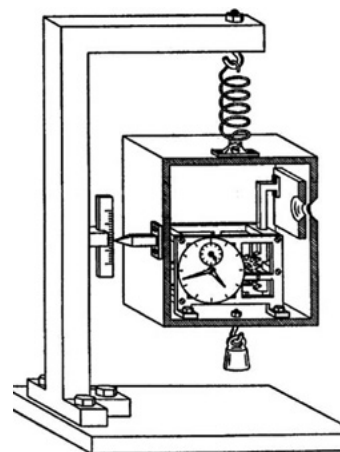
Teoria Einsteina, choć matematycznie trudna, jest estetyczna i spójna logicznie. Dostarczyła kilku raptem, niemniej bardzo przekonujących i efektywnych testów doświadczalnych, które potwierdziły jej wyższość nad starą teorią grawitacji Newtona. Jednak stosowanie jej w życiu codziennym byłoby na ogół zbyt ciężką pedanterią. Umożliwiła natomiast wolny od sprzeczności opis Wszechświata jako całości oraz jego ewolucji, dając przez to początek nowoczesnej kosmologii (1917). I jeszcze jeden aspekt, bardziej subtelny: teoria Einsteina jest z natury „nieliniowa”. Mówiąc zwyczajnie: źródłem grawitacji jest wszystko, nawet ona sama, a nie tylko masa, jak w teorii Newtona. Według Einsteina „gravitacja gravituje”. To właśnie sprawia, że skuteczne i ogólne rozwiązywanie równań tej teorii jest sprawą bardzo trudną.

4. Mechanika kwantowa jest jakościowo odmienna. W szczególności liczba jej zastosowań praktycznych jest doprawdy zdumiewająca. Większość ludzi nie ma o tym pojęcia, ale to właśnie mechanika kwantowa, zwłaszcza w swym elektronicznym wcieleniu, obdarowała współczesną cywilizację mnóstwem nieoczekiwanych wynalazków: czasem bardzo pożytecznych (np. magnetyczny rezonans jądrowy w medycynie), znacznie częściej zniewalających, a niekiedy po prostu irytujących. Swoją drogą, gdyby tak nagle zabrakło wszystkich tych komputerów, laserów, telefonów komórkowych, odtwarzaczy DVD, „empetrójek” i innych atrybutów nowoczesności... Strach pomyśleć, jakie rozmiary przybrałaby powszechna frustracja. A przecież jeszcze ćwierć wieku temu ludzie żyli i skutecznie pracowali bez tego wszystkiego...

Panuje też przekonanie, że mechanika kwantowa jest najbardziej udaną teorią całej fizyki. W bardzo precyzyjnym sensie. Na przykład nikomu – nawet Einsteinowi – nie udało się zaprojektować eksperymentu, który by przeczył jej przewidywaniom. A natrudził się przy tym niemało. Niejeden też raz doprowadził do irytacji swego godnego adwersarza, Nielsa Bohra. Ale był w tym konsekwentny i uczciwy: bezgranicznie ufał swej fenomenalnej intuicji, która wcześniej tyle razy naprowadziła go na właściwy trop.

Pewnego razu, w roku 1930 podczas VI Konferencji Solvaya w Brukseli, Einsteinowi już się zdawało, że okpił i teorię kwantów, i jej głównego ideologa, Bohra. Zaprojektował pomysłowy przyrząd, który jakoby miał zmierzyć *jednocześnie i dokładnie* zarówno energię fotonu, jak i czas jego emisji – wbrew tzw. zasadzie nieoznaczoności Heisenberga. Urządzenie to, składające się m.in. z wagi sprężynowej oraz zegara, można w zasadzie wykonać. (W celu dydaktycznym uczynił to później George Gamow).

Jednak po bezsennej nocy Bohr znalazł, jak zresztą zawsze dotąd, błąd w rozumowaniu Einsteina. Co więcej, pokonał go jego własną bronią. Pokazał, że Einstein zapominał o pewnym drobnym efekcie, wynikającym z jego własnej ogólnej teorii względności! Po uwzględnieniu tego efektu okazało się, że wszystko zgadza się idealnie z przewidywaniami teorii kwantowej.



Zaprojektowany przez Einsteina przyrząd mający obalić zasadę nieoznaczoności Heisenberga w wersji $\Delta E \cdot \Delta t > h$, gdzie ΔE jest nieoznaczonością energii, Δt jest nieoznaczonością czasu, h to fundamentalna stała przyrody Plancka. Pudełko z gazem cząstek światła, fotonów, zawieszono jest na wadze sprężynowej w polu grawitacyjnym. Mechanizm zegarowy otwiera na moment szczelinę po prawej. Jeden foton ucieka w chwili, którą *dokładnie* rejestruje zegar. Foton ten unosi energię, która – zgodnie ze sławnym $E = mc^2$ – jest równoważna ubytkowej masie. Wskutek tego pudełko staje się odpowiednio lżejsze, co *dokładnie* rejestruje wskazanie podziałki wagi. Zatem obie nieoznaczoności ΔE oraz Δt mogą być dowolnie małe, wbrew zasadzie Heisenberga. Tyle Einstein.

Bohr zwrócił uwagę na to, że po ucieczce fotonu lżejsze pudełko z zegarem przesunie się w górę w polu grawitacyjnym. Przewidziany przez teorię Einsteina efekt mówi, że tempo chodu zegara zmieni się proporcjonalnie do tego przesunięcia, powstanie zatem nieoznaczoność pomiaru czasu. Po uwzględnieniu tego dostajemy, że jednak $\Delta E \cdot \Delta t > h$.

Mimo tego dramatycznego epizodu uparty Einstein nie podał się. Dotąd twierdził, że mechanika kwantowa jest niespójna (*inconsistent*); teraz zmienił kierunek ataku: owszem, jest ona, z jakichś powodów, poprawna, ale jest niepełna (*incomplete*). Pięć lat później (1935 r.), przy współpracy z Borisem Podolskim i Nathanem Rosenem, Einstein przypuścił bardziej subtelny atak na mechanikę kwantową, który na wiele lat dał fizykom do myślenia.

Rysunek pochodzi z książki
Albert Einstein: *Philosopher-Scientist*,
Cambridge University Press, 1949, p. 227



Ostatni rysunek wykonany przez Bohra na tablicy kilka godzin przed śmiercią (18 XI 1962 r.). Jest to właśnie sławne pudełko Einsteina, *Clock in the Box*. Jak widać, Bohr do samego końca analizował ten problem.

AIP Emilio Segrè Visual Archives
(archiwum dostępne w Internecie)

5. Warto podkreślić, że mechanika kwantowa jest jedyną teorią, której matematyczny formalizm przetrwa zapewne w niezmiennionej postaci wszelkie przyszłe zmiany w fizyce⁵. Stwierdzenie podejrzanie radykalne, które jednak można jakościowo uzasadnić. Teoria ta jest bowiem bardzo „odporna” na potencjalne uogólnienia. Jakikolwiek próby – choćby drobnych – jej modyfikacji (np. przez wprowadzenie nieliniowych poprawek) prowadzą od razu do sprzeczności lub jawnych absurdów, w rodzaju np. ujemnych czy nieskończonych prawdopodobieństw dla rozmaitych zjawisk. Innymi słowy, mechanika kwantowa (w przeciwieństwie np. do ogólnej teorii względności) *nie wydaje się przypadkiem granicznym* jakiejś nieznannej jeszcze, bardziej uniwersalnej teorii. W opisie mikroświata stanowi ona najwyraźniej przysłowiowy „strzał w dziesiątkę”.

Jest jednocześnie prawdą, że od chwili swego powstania mechanika kwantowa budzi niedosyt. Jest jednocześnie i skuteczna, i – w pewnym sensie – po prostu niezbyt ładna. Wszystko jest dobrze, dopóki ktoś traktuje ją tylko jako pewien trafnie odgadnięty algorytm. Wtedy wszystkie przewidywania zgadzają się perfekcyjnie z pomiarami. Poziomy energetyczne atomów, ich widma, własności molekuł w chemii kwantowej itd.

Gdy jednak ktoś chce dogłębnie *zrozumieć*, wówczas zaczyna odczuwać niedosyt. Po prostu: mechanika kwantowa cierpi aż do dziś na dotkliwy brak zadowalającej interpretacji – „filozofii”. Ale tej nie należy się spodziewać ze strony zawodowych filozofów, a raczej ze strony filozofujących fizyków. Do tej hybrydowej kategorii uczonych zaliczali się, zwłaszcza pod koniec życia, wszyscy główni twórcy tej teorii.

6. Mój pogląd – nie twierdzę, że szczególnie odkrywczy – w tej kwestii jest następujący. Jak wiadomo, obie teorie względności Einsteina: szczególna (1905) i ogólna (1915), radykalnie zmieniły nasze klasyczne, zdroworozsądkowe wyobrażenia o czasie, jednoczesności, przestrzeni, świetle i grawitacji – czyli o pojęciach dobrze znanych z życia codziennego. Teorie te wprowadziły wysoki próg pojęciowy i nowy język matematyczny. Często gardziły zdrowym rozsądkiem, bardziej ceniąc logiczną spójność oraz nieuchronne wnioski płynące z trafnie dobranego formalizmu matematycznego.

Ale nigdy nie naruszyły klasycznej koncepcji *zrozumienia*. Co więcej, nauczając tych teorii, możemy się wciąż odwoływać do poglądowych, dydaktycznych analogii. Na przykład: mówiąc o czasoprzestrzeni i jej krzywiznie, możemy, ignorując jeden wymiar przestrzenny, z powodzeniem myśleć o giętkiej, cienkiej, gładkiej, dynamicznej płachcie i rysować na niej, przynajmniej w myśli, linie najkrótsze – trajektorie cząstek.

Natomiast mechanika kwantowa nieodwracalnie zniszczyła nasze klasyczne, „rozsądne” wyobrażenia o mikroświecie i „zamieszkujących” go cząstkach. Pojawiła się ich rozmyta lokalizacja, zasadnicza nierozróżnialność oraz zagadkowy dualizm korpuskularno-falowy. Nieproszone wtargnęło prawdopodobieństwo – i to nie jak w klasycznej teorii, czyli jako wygodne uproszczenie, swoisty kom-

promis pomiędzy pełną, niemożliwą do ogarnięcia informacją a informacją najistotniejszą, choć w zasadzie wystarczającą. Z niezrozumiałych jak dotąd powodów, w osobliwym świecie kwantów prawdopodobieństwo ulokowało się najwyraźniej na poziomie fundamentalnym.

A co najgorsze, mechanika kwantowa dokonała też zamachu na dotychczasową koncepcję samego zrozumienia – i nie dostarczyła w zamian niczego nowego! Tu nie ma już żadnych poglądowych analogii. Jesteśmy zdani wyłącznie na czyste koncepcje matematyczne.

Nie twierdzę, że to mało. Matematyka (a przynajmniej arytmetyka i teoria zbiorów oraz oparte na nich dziedziny) to w końcu „bastion pewności i precyzji” – jak się wyraził matematyk Leo Corry⁶. Ale w fizyce mieliśmy, w każdym razie od czasów Newtona, nie tylko solidny matematyczny drogowskaz, ale i możliwość intuicyjnej kontroli problemu. Tymczasem w mechanice kwantowej fizyk przypomina poniekąd pilota, który prowadzi samolot we mgle i jest zdany wyłącznie na wskazania przyrządów.

7. Stąd właśnie ten przykry i przedłużający się niedosyt. To naprawdę dziwne, ale po raz pierwszy w dziejach fizyki teoretycznej człowiek odkrył (a właściwie: odgadł) niewątpliwie poprawne i najwyraźniej fundamentalne prawa, których potem sam nie był w stanie zrozumieć w zadowalający sposób. Jedno tylko wiemy na pewno: świat cząstek elementarnych *nie* jest miniaturyzacją, prostym przeskalowaniem świata makroskopowego, w którym żyjemy i na podstawie którego, z konieczności, kształtujemy naszą intuicję oraz tzw. zdrowy rozsądek. W szczególności złożone obiekty kwantowe nie są prostą sumą swych składników.

Jak to zwykle bywa, gdy problem jest nabrzmiały i nie rokuje szybkiego rozwiązania, można się odwołać do filozofii, wypisać morze atramentu – i nie zbliżyć się ani o krok w stronę zadowalającego rozwiązania. Ale można też przyjąć podejście pragmatyczne, które wprawdzie też nie zbliży do rozwiązania, ale przynajmniej oszczędzi mętnych i przegadanych wywodów oraz bólu głowy. W najbardziej lapidarny sposób uczynił to amerykański fizyk i matematyk John von Neumann (a może Richard Feynman? – zdania są podzielone), gdy zjawił się u niego pewien student uskarżający się na to, że nie rozumie mechaniki kwantowej. Praktyczna, a nie wątpię, że szczerza rada von Neumanna brzmiała: – Tego się nie rozumie, do tego się *przyzwyczajają*.

Patrząc na uporczywe, ale bezskuteczne wysiłki samych twórców mechaniki kwantowej można – miejmy nadzieję, że tylko chwilowo – przyjąć, że jest to jedyne rozsądne podejście. Można także przytoczyć mocno już wyświechtaną i, jak z powyższego wyraźnie widać, dość w końcu trywialną sentencję Hamleta: „Więcej jest rzeczy na niebie i na ziemi, Horacy, niż to się śniło naszym filozofom”.

KRZYSZTOF MAŚLANKA

Instytut Historii Nauki PAN, Warszawa–Kraków

⁵ Tak uważa m.in. współczesny amerykański fizyk teoretyk Steven Weinberg; por. jego *Sen o teorii ostatecznej*, Zysk i Ska, 1997, s. 76–78.

⁶ *The Princeton Companion to Mathematics*, Princeton University Press, 2008, p. 130.