

Skuteczność i niedosyt, czyli o problemie interpretacji mechaniki kwantowej¹

Krzysztof Maślanka

Instytut Historii Nauki PAN, Warszawa–Kraków

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)

0. Po tym przewrotnym, ale dającym do myślenia zdaniu, użytym tu jako motto, jeszcze trzy cytaty, które ilustrują niepokojący stan rzeczy związany ze zrozumieniem mechaniki kwantowej:

Rozmowa zesła na pewnego młodego teoretyka, który jako doktorant Philipa [Candelasa] wydawał się bardzo obiecujący, a później jakoś zniknął z oczu. Spytałem Philipa, co przeszkodziło w naukowym rozwoju jego byłego studenta. Phil tylko pokręcił głową ze smutkiem i powiedział: – Próbował zrozumieć mechanikę kwantową².

Czuję się nieco niezręcznie, przez całe życie korzystając z teorii, której nikt w pełni nie rozumiał³.

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 Bella⁴.

1. 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 zmagania intelektualnego giganta; druga jest wspólnym dziełem 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 począt-

¹ Artykuł jest znaczną modyfikacją tekstu, który ukazał się w PAUzie Akademickiej, nr 208–209, 2013.

² Steven Weinberg, *Sen o teorii ostatecznej*, Zysk i S-ka, 1997.

³ Ibidem.

⁴ Andrzej Staruszkiewicz, *Foton* nr 100, Wiosna 2008, 18–23.

ku 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”⁵. Trzeba dodać, że Einstein, który sam siebie określił paradoksalnym zestawieniem słów: „głęboko wierzący ateista”⁶, mówiąc o fizyce, miał osobliwy zwyczaj częstego powoływania się na Boga, choć ten jego „Bóg” niewiele miał wspólnego z Bogiem judaizmu i chrześcijaństwa⁷.

W oparciu o Ogólną Teorię Względności Einstein odniósł swój kolejny, pośmiertny sukces: dzięki serii bardzo subtelnych pomiarów odkryto ostatnio fale grawitacyjne – poruszające się z prędkością światła zmarszczki czasoprzestrzeni. Zaobserwowane skrajnie słabe sygnały dobrze pasują do modelu zderzenia dwu masywnych czarnych dziur – zderzenia, które nastąpiło kilka miliardów lat temu⁸. Warto podkreślić, że sam Einstein był bardzo sceptyczny co do możliwości praktycznego zaobserwowania fal grawitacyjnych. Zdawał sobie sprawę jak słabe są to efekty. Ale nie był, i nie mógł być, świadomy dostępnych nam zdobyczy technicznych, które umożliwiają detekcję tak słabych sygnałów z głębi czasu i przestrzeni.

2. 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 próby pogodzenia stanowią tak trudne wyzwanie. Niewątpliwie trzeba tu jakiejś radykalnie nowej idei wiodą-

⁵ *Einstein w cytatach*. Zebrała Alice Calaprice, Prószyński i S-ka, Warszawa 1997, 173.

⁶ *Ibidem*, s. 165.

⁷ 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.

⁸ Odkrycie to zostało uhonorowane ostatnią Nagrodą Nobla z fizyki. Otrzymali ją: Rainer Weiss, Barry C. Barish i Kip S. Thorne za swój „zdecydowany wkład w detektor LIGO oraz za obserwację fal grawitacyjnych”. Por. np. <https://www.scientificamerican.com/report/the-discovery-of-gravitational-waves/>. Nie mogę się tu powstrzymać od przytoczenia osobliwego komentarza do tegorocznych Nagród Nobla w „Gazecie Wyborczej”: „Znowu nagrody dostała grupka starszych, białych mężczyzn”.

cej, która mogłaby doprowadzić do postępu oraz do powszechnie zaakceptowanej teorii kwantowej grawitacji.

W roku akademickim 1962/63 Richard Feynman prowadził w swym macierzystym California Institute of Technology ambitny wykład z grawitacji, a jednocześnie intensywnie pracował nad problemem teorii kwantowej i mniej więcej w tym samym czasie prowadził też swe znane i sławne wykłady z fizyki dla początkujących studentów. Próbował zastosować do teorii Einsteina metody, które znakomicie sprawdziły się w innych sytuacjach, w szczególności w elektrodynamice kwantowej. Wykłady te były spisywane przez dwu słuchaczy tego kursu, a niektóre potem autoryzowane przez Feynmana. Po latach zostały one zebrane w książkę i wydane, także po polsku – z szacunku dla niepowtarzalnej osobowości Feynmana i jego głębokich dygresji⁹. Jednak w trakcie tego kursu widać narastającą frustrację genialnego fizyka: nadzieja, którą najwyraźniej miał na początku kursu, że pod jego koniec zreferuje jakąś spójną koncepcję kwantowej grawitacji, zanikła z czasem.

3. Teoria Einsteina, choć matematycznie trudna, jest estetyczna i spójna logicznie. Dostarczyła kilku raptem, niemniej bardzo przekonujących i efektownych testów doświadczalnych, które potwierdziły jej wyższość nad starą teorią grawitacji Newtona. Jednak stosowanie jej w życiu codziennym byłoby na ogół zbyt zbytnią 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 po prostu: źródłem grawitacji jest wszystko, nawet ona sama, a nie tylko masa, jak w teorii Newtona. Według Einsteina „gravitacja grawituje”. To właśnie sprawia, że skuteczne i ogólne rozwiązywanie równań tej teorii jest sprawą bardzo trudną.

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, GPSów i innych atrybutów nowoczesności... Strach pomyśleć, jakie rozmiary przybrałaby powszechna frustracja. A przecież jeszcze ćwierć wieku temu ludzie żyli i skutecznie pracowali bez tego wszystkiego¹⁰...

⁹ Richard P. Feynman, *Wykłady z grawitacji*, Prószyński i S-ka, 2006.

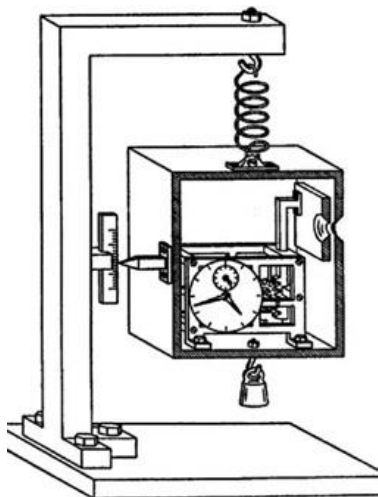
¹⁰ Aż 30% dochodu narodowego brutto Stanów Zjednoczonych oparte jest na wynalazkach wynikających z zastosowań mechaniki kwantowej. Por. Max Tegmark i John Archibald Wheeler, *100 Years of Quantum Mysteries*, „Scientific American”, February 2001, 68–75.

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 amerykański fizyk rosyjskiego pochodzenia, 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 zapomniał 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



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

nieoznaczonością czasu, h to fundamentalna stała przyrody Plancka. Pudełko z gazem cząstek światła, fotonów, zawieszono 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 ubytkowi masy. 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. Przewidywany 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 poddał 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.



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)

4. Warto podkreślić, że mechanika kwantowa jest jedyną teorią, której matematyczny formalizm przetrwa zapewne w niezmienionej postaci wszelkie przyszłe zmiany w fizyce¹¹. Stwierdzenie podejrzenie 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”.

¹¹ Tak uważa m.in. współczesny amerykański fizyk teoretyk Steven Weinberg; por. jego *Sen o teorii ostatecznej*, Zysk i S-ka, 1997, 76–78.

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.

5. 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 dobranej formalizmu matematycznego.

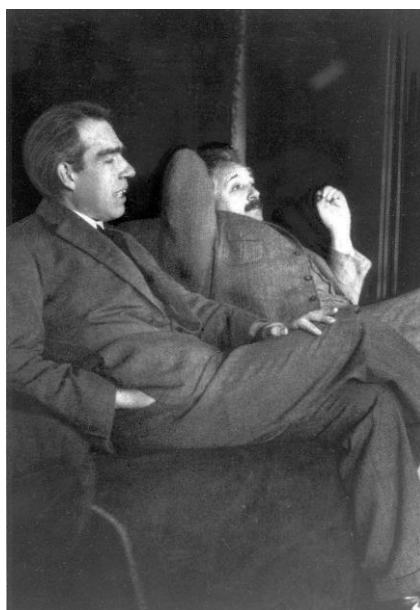
Ale nigdy nie naruszyły klasycznej koncepcji *zrozumienia*. Co więcej, naucając tych teorii możemy się wciąż odwoływać do poglądowych, dydaktycznych analogii. Na przykład: mówiąc o czasoprzestrzeni i jej krzywiznie możemy, ignorując jeden wymiar przestrzenny, z powodzeniem myśleć o giętkiej, cienkiej, 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 kompromis 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 Cor-

ry¹². 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.

W sposób radykalny (i niewątpliwie szokujący) wyraził to Niels Bohr: „Świat kwantowy nie istnieje. Jest tylko jego abstrakcyjny kwantowy opis”.



Bohr i Einstein, koniec lat 20. XX w., podczas jednej ze swych sławnych dyskusji na temat mechaniki kwantowej. Zdjęcie wykonał fizyk Paul Ehrenfest. Przyjaźnił się z Einsteinem, ale stanął po stronie poglądów Bohra. By fakt ten jakoś złagodzić przed przyjacielem napisał mu podczas jednej z konferencji żartobliwy liścik: „W czyścicu jest specjalny oddział dla profesorów teorii kwantowej, gdzie będą zmuszeni do słuchania wykładów fizyki klasycznej przez dziesięć godzin dziennie”¹³

6. 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

¹² *The Princeton Companion to Mathematics*, Princeton University Press, 2008, s. 130.

¹³ Manjit Kumar, *Kwantowy Świat. Einstein, Bohr i wielki spór o naturę rzeczywistości*, Prószyński i S-ka, 2012.

którego, z konieczności, kształtujemy od dzieciństwa 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 *przyzwyczajaj*. 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 waszym filozofom”.

Jedną z takich rzeczy jest niewątpliwe – bo potwierdzone przez eksperyment – istnienie tzw. stanów splątanych (ang. *entanglement*). Koncepcji tej do końca życia żywiłowo przeciwstawiał się Einstein. Chodzi o układ np. dwu fotonów, wykreowanych w pewnym procesie, które potem oddalają się od siebie w przeciwnych kierunkach. Zgodnie z mechaniką kwantową orientacja spinu każdego z tych fotonów jest, do chwili pomiaru, absolutnie nieokreślona. Jednak po pomiarze jednego spinu mamy pewność, że spin drugiego fotonu jest przeciwny do tego, który stwierdziliśmy u pierwszego fotonu. Ale skąd ten drugi foton o tym „wie”? Zgodnie z ironicznym stwierdzeniem Einsteina, wymagałoby to *natychmiastowego „upiornego działania na odległość” (spooky action at a distance)* – wbrew Szczególnej Teorii Względności. Ale jest to fakt doświadczalny, stwierdzony w serii pomysłowych eksperymentów wykonanych m.in. przez Alaina Aspecta i Antona Zeilingera, którzy opierali się na genialnych pracach teoretycznych cytowanego na wstępie, przedwcześnie zmarłego irlandzkiego fizyka Johna S. Bella¹⁴. Wbrew zdrowemu rozsądkowi stan układu jest tu lepiej określony niż stan jego części składowych! Na pocieszenie Einsteina można jedynie dodać, że takie upiorne działanie na odległość *nie* może być użyte do przekazywania sygnałów lub informacji z nadświetlną prędkością. Bo to oznaczałoby też podróże pod prąd strzałki czasu i – koniec znanej nam fizyki.

¹⁴ Znakomite wprowadzenie do tych fascynujących kwestii zawiera książka: Jim Baggott, *Pożegnanie z rzeczywistością*, Prószyński i S-ka, 2013. Książka ta jest też pełna gorzkich – i nader trafnych – refleksji nad tym, w którą stronę zmierza obecnie fizyka, o czym wymownie świadczy jej podtytuł: *Jak współczesna fizyka odchodzi od poszukiwania naukowej prawdy*.