

Przedmowa

W XX wieku mieliśmy to szczęście, że byliśmy świadkami *dwóch* wielkich rewolucji, które odmieniły nasz fizyczny obraz świata. Pierwsza spowodowała całkowitą zmianę poglądów na czas i przestrzeń – wielkości te zostały połączone i wspólnie tworzą tak zwaną czasoprzestrzeń; na dodatek owa czasoprzestrzeń jest delikatnie zakrzywiona w taki sposób, że wytwarza znane od dawna, wszechobecne, lecz tajemnicze zjawisko grawitacji. Druga z tych rewolucji doprowadziła do radykalnej rewizji naszych zapatrywań na naturę materii i promieniowania. Zgodnie z nowym obrazem fizycznej rzeczywistości cząstki zachowują się jak fale, fale jak cząstki, dobrze znane pojęcia fizyczne stają się nieokreślone, a pojedyncze obiekty fizyczne mogą się przejawiać równocześnie w wielu różnych miejscach. Pierwsze z tych rewolucyjnych odkryć przyjęło się określać mianem teorii względności, drugie – teorii kwantowej. Obie teorie zostały potwierdzone obserwacyjnie z dokładnością nie mającą precedensu w historii nauki.

Uważam, że tylko trzy wcześniejsze rewolucje w naszych poglądach na fizyczną rzeczywistość zasługują na porównanie z tymi dwoma. Pierwsza z nich nastąpiła w starożytnej Grecji, gdy powstała geometria Euklidesa i podstawy statyki ciał sztywnych. W tym czasie po raz pierwszy zrozumiano, jak zasadniczą rolę w badaniach natury odgrywa matematyka. Na drugą rewolucję przyszło czekać aż do XVII wieku, kiedy Galileusz i Newton nauczyli nas, jak można wyjaśnić ruch ciał ważkich, odwołując się do sił działających między cząstkami, z których są one zbudowane, oraz śle-

dząc przyspieszenie powodowane przez te siły. Do trzeciej rewolucji doszło w XIX wieku, gdy Faraday i Maxwell wykazali, że do opisu natury nie wystarcza pojęcie cząstek – trzeba jeszcze uwzględnić istnienie ciągłych pól przenikających przestrzeń, które są równie realne jak cząstki. Pola elektryczne i magnetyczne tworzą wspólnie jedno pole elektromagnetyczne, a właściwości i zachowanie światła można w piękny sposób opisać, przyjmując, że światło to rozchodzące się w przestrzeni oscylacje tego pola.

W ten sposób dochodzimy do XX wieku. Szczególnie godne uwagi jest to, że fundamenty obu rewolucji naukowych tego stulecia stworzył samodzielnie w ciągu zaledwie roku jeden fizyk – Albert Einstein, uczony obdarzony niezwykłą zdolnością głębokiego rozumienia zasad działania natury. Ale to nie wszystko. W tym samym 1905 roku Einstein dokonał ważnych odkryć w dwóch innych dziedzinach: w swej rozprawie doktorskiej zaproponował nową metodę wyznaczania rozmiarów cząsteczek, a następnie opublikował przełomową analizę ruchów Browna. Ta ostatnia praca zapewniłaby mu miejsce w historii nauki, nawet gdyby nie dokonał niczego więcej. W pracy o ruchach Browna (podobne wyniki uzyskał niezależnie Marian Smoluchowski) Einstein wprowadził wiele ważnych koncepcji fizyki statystycznej, które znalazły bardzo liczne zastosowania w innych dziedzinach.

W niniejszej książce przedstawiamy pięć prac, które Einstein opublikował w tym niezwykłym roku. Pierwsza to jego rozprawa doktorska o rozmiarach molekuł, której rozwinięciem jest druga praca o ruchach Browna. Następne dwa artykuły dotyczą szczególnej teorii względności. Pierwszy zainicjował rewolucję relatywistyczną, polegającą na odrzuceniu koncepcji absolutnego czasu – do czego dziś przywykli już wszyscy fizycy (a słyszeli o tym niemal wszyscy). Drugi to krótka notatka zawierająca wyprowadzenie słynnego wzoru Einsteina $E = mc^2$. W ostatniej pracy – jedynej, którą sam Einstein określał jako rewolucyjną – dowodzi on, że mu-

simy w pewnym sensie powrócić do (newtonowskiej) koncepcji światła złożonego z korpuskuł. Einstein wysunął tę tezę wkrótce po tym, jak fizycy przywykli do pomysłu, że światło to fala elektromagnetyczna. Z tego pozornego paradoksu narodził się ważny składnik mechaniki kwantowej. John Stachel opatrzył każdą z tych prac fascynującym i pouczającym wstępem, ukazującym osiągnięcia Einsteina we właściwym kontekście historycznym.

Wspominałem wcześniej o dwóch niezwykłych rewolucjach w fizyce, które zdarzyły się w XX wieku. Należy jednak jasno stwierdzić, że choć prace Einsteina z 1905 roku miały fundamentalne znaczenie, nie były pierwszymi salwami obu tych rewolucji ani też nie opisywały w sposób ostateczny nowych porządków natury.

Rewolucyjne zmiany w naszych wyobrażeniach o czasie i przestrzeni, jakie spowodowały prace Einsteina z 1905 roku, związane były tylko ze szczególną teorią względności. Dopiero dziesięć lat później Einstein podał pełne sformułowanie ogólnej teorii względności, według której grawitacja stanowi wynik zakrzywienia czasoprzestrzeni. Więcej nawet, wspaniałe pomysły, które przedstawił Einstein w 1905 roku, doprowadziły do zbudowania teorii, która nie była w pełni jego oryginalnym dziełem, gdyż wywodziła się z wcześniejszych koncepcji, zwłaszcza Lorentza i Poincarégo. Ponadto w teorii Einsteina z 1905 roku wciąż brakowało ważnego pojęcia czasoprzestrzeni, które wprowadził Hermann Minkowski trzy lata później. Einstein szybko zaakceptował jego koncepcję czterowymiarowej czasoprzestrzeni, która stała się ważnym elementem ogólnej teorii względności, będącej ukoronowaniem całego dzieła uczonego.

Pierwsze salwy rewolucji kwantowej padły za sprawą Maxa Plancka, który w pracach opublikowanych w 1900 roku wprowadził słynny wzór $E = h\nu$, oznaczający, że energia promieniowania elektromagnetycznego jest emitowana w postaci porcji, a energia każdej takiej porcji jest proporcjonalna do częstości promieniowania ν . Jednakże pomysły Plancka trud-

no było zrozumieć w ramach ówczesnej fizyki i – jak się wydaje – tylko Einstein po pewnym czasie zdał sobie sprawę z ich fundamentalnego znaczenia. Minęło wiele lat, nim pojawiło się właściwe sformułowanie teorii kwantów, a zasadnicze koncepcje nowej teorii zawdzięczamy nie Einsteinowi, lecz innym fizykom, przede wszystkim Bohrowi, Heisenbergowi, Schrödingerowi, Diracowi i Feynmanowi.

Niektóre zdumiewające aspekty stosunku Einsteina do teorii kwantów wydają się niemal paradoksalne. Najwcześniejszy i zapewne najbardziej uderzający z paradoksów wiąże się z tym, że pierwsze, rewolucyjne prace Einsteina o szczególnej teorii względności (praca 3) i teorii kwantów (praca 5) pozornie wychodzą od wzajemnie wykluczających się poglądów na temat elektromagnetycznej teorii Maxwella, wyjaśniającej naturę światła. W piątej pracy Einstein *explicitie* odrzuca pogląd, że równania Maxwella wystarczają do opisanie światła (jako fal pola elektromagnetycznego), i tworzy model, zgodnie z którym światło zachowuje się tak, jakby składało się z cząstek. Mimo to w chronologicznie późniejszej trzeciej pracy sformułował on szczególną teorię względności, wychodząc z założenia, że teoria Maxwella jest u swych podstaw prawdziwa – Einstein skonstruował nową teorię tak, aby równania Maxwella pozostały nienaruszone. Co więcej, Einstein na początku piątej pracy, w której przedstawił korpuskularną teorię światła, sprzeczną z teorią Maxwella, napisał o tej ostatniej (falowej) teorii, że „zapewne nigdy nie zostanie zastąpiona inną”. Ta sprzeczność jest tym bardziej uderzająca, że niezwykła siła Einsteina jako fizyka polegała na głębokim zrozumieniu mechanizmów natury. Można sobie bez trudu wyobrazić, jak uczonego mniejszego kalibru „wypróbowuje” jeden model po drugim (powszechna praktyka wśród współczesnych fizyków), a sprzeczności między dwoma zaproponowanymi punktami widzenia nie budzą jego specjalnego niepokoju, gdyż żadnego z nich nie traktuje szczególnie poważnie. Inaczej rzecz się ma z Einsteinem. Wydaje się, że żywił on bardzo wyraźne i głębokie przekonania w kwestii tego, jaka „naprawdę jest” natu-

ra na poziomie trudno dostępnym innym fizykom. Zdolność Einsteina do postrzegania fizycznej rzeczywistości była jedną z najważniejszych cech jego geniuszu. Moim zdaniem, trudno sobie wyobrazić, by mógł on opublikować w ciągu jednego roku dwie prace, uznając, że odwołuje się w nich do sprzecznych poglądów na naturę. Z pewnością uważał (słusznie, jak się później okazało), że „na najgłębszym poziomie” nie ma żadnej sprzeczności między ścisłością a w istocie „prawdziwością” falowej teorii Maxwella i alternatywnego, kwantowego, korpuskularnego poglądu, który przedstawił w pracy piątej.

Przypomina to wcześniejsze o 300 lat zmagania Newtona z zasadniczo tym samym problemem. Zaproponował on dziwną mieszaninę koncepcji falowych i korpuskularnych, aby w ten sposób wyjaśnić sprzeczne aspekty zachowania światła. W przypadku Newtona możemy zrozumieć jego upartą obronę teorii korpuskularnej, jeśli przyjmiemy (rozsądny) pogląd, że chodziło mu o ocalenie zasady względności. Argument ten jest jednak poprawny tylko wtedy, gdy uznajemy zasadę względności Galileusza (i Newtona). W przypadku Einsteina musimy odrzucić takie wyjaśnienie, ponieważ sformułował on *explicite* inną zasadę względności, taką, by teoria Maxwella nie wymagała żadnych zmian. Musimy zatem poszukać głębszego uzasadnienia niezwykle przekonania Einsteina, że choć falowa teoria Maxwella jest w pewnym sensie „prawdziwa” – a w 1905 roku była ona już powszechnie uznana – wymaga mimo wszystko zmian, oznaczających swoisty powrót do falowo-korpuskularnych poglądów Newtona sprzed trzech wieków.

Wydaje się, że jednym z istotnych czynników, które sprawiły, iż Einstein zajął takie stanowisko, była świadomość konfliktu między dyskretną naturą cząstek, z których są zbudowane ciała ważkie, a ciągłością pól Maxwella. Prace Einsteina z 1905 roku dobitnie dowodzą, że wiele myślał o tej sprzeczności. W pierwszych dwóch artykułach dążył przede wszystkim do poznania natury molekuł i innych drobin, z których składa się ciecz, a za-

tem „atomowa” budowa materii miała dla niego szczególne znaczenie. W pracach tych dowiódł swego mistrzostwa w stosowaniu metod fizyki statystycznej. W publikacji piątej Einstein wykorzystał swoje umiejętności, by identycznie potraktować pole elektromagnetyczne i wyjaśnić pewne zjawiska, których nie można wytłumaczyć na gruncie wyłącznie maxwellowskiej teorii światła. Einstein pokazał, że klasyczne podejście do tych zagadnień prowadzi do problemów, ponieważ koncepcja współlistnienia i wzajemnych oddziaływań dyskretnych cząstek i ciągłych pól jest fizycznie bezsensowna. W ten sposób wykonał on ważny krok w kierunku sformułowania współczesnej teorii kwantów, zgodnie z którą cząstki istotnie muszą mieć cechy fal, a pola – cząstek. Według teorii kwantowej cząstki i fale są tym samym obiektem fizycznym.

Często jest podnoszona kwestia, dotycząca innego paradoksu: skoro poglądy Einsteina na zjawiska kwantowe były w punkcie wyjścia znacznie dojrzałe od poglądów innych, dlaczego później, gdy teoria kwantów szybko się rozwijała, pozostał on daleko w tyle? W rzeczywistości Einstein nigdy w pełni nie zaakceptował mechaniki kwantowej, która została sformułowana w latach dwudziestych. Wielu komentatorów wyrażało opinię, że Einstein nie potrafił pokonać ograniczeń, wynikających z jego „staromodnego”, realistycznego światopoglądu, podczas gdy Niels Bohr mógł pójść dalej, po prostu negując istnienie czegoś takiego jak „fizyczna rzeczywistość” na kwantowym poziomie molekuł, atomów i cząstek elementarnych. Nie ulega jednak wątpliwości, że w 1905 roku Einstein był w stanie dokonać swoich przełomowych odkryć między innymi dzięki zdecydowanej wierze w realność fizycznych ciał na poziomie molekularnym i w jeszcze mniejszej skali. Dowodzą tego przekonująco prace przedstawione w tej książce.

Czy faktycznie Einstein tak bardzo nie miał racji, jak skłonni są twierdzić zwolennicy Bohra? Nie sądzę. Osobiście zdecydowanie podzielam przekonanie Einsteina o realności mikroświata i podobnie jak on uważam, że

współczesna mechanika kwantowa jest, pod pewnymi fundamentalnymi względami, teorią niekompletną. Uważam także, że to analiza głębokiego konfliktu między podstawowymi zasadami mechaniki kwantowej i ogólnej teorii względności doprowadzi wreszcie do zrozumienia rzeczywistości na poziomie mikroskopowym. Dopiero gdy uda nam się tego dokonać, zniknie wreszcie napięcie między prawami rządzącymi mikroświatem mechaniki kwantowej i makroświatem ogólnej teorii względności. Jak będzie wyglądało rozwiązanie tego problemu? Tylko czas i, zapewne, nowa rewolucja mogą przynieść odpowiedź na to pytanie – niewykluczone, że w kolejnym cudownym roku!

***Roger Penrose**, grudzień 1997*