

Michał TEMPCZYK

## CZAS WE WSPÓŁCZESNEJ FIZYCE

*Żyjąc w nowoczesnym świecie, w którym zegary odgrywają ważną rolę, stale przekonujemy się o tym, że czas płynie w jednostajny i jednakowy sposób we wszystkich zakątkach świata i że w żaden sposób nie możemy ani powstrzymać, ani przyspieszyć jego upływu, niezależnie do tego, jak bardzo tego pragnęlibyśmy. Nie możemy ponadto cofnąć czasu, aby powrócić do tego, co było miłe, albo zapobiec czemuś, co okazało się niekorzystne lub wręcz tragiczne. Innymi słowy, czas płynie w sposób niezależny od naszej woli i sytuacji.*

Czas jest jednym z podstawowych pojęć fizyki, żyjemy bowiem w świecie, który nieustannie zmienia się i przemija. Miarą tego przemijania jest właśnie czas, dlatego nie można rozwijać żadnej ważnej teorii przyrodniczej, nie korzystając z tego pojęcia. Z tego też powodu opisanie i zrozumienie najważniejszych własności czasu jest zagadnieniem fundamentalnym dla potocznej wiedzy o świecie oraz dla nauki. Własności te można rozpatrywać z kilku odrębnych punktów widzenia, zastanawiając się na przykład nad tym, jak ludzie odczuwają czas, lub pytając o to, czy zwierzęta mają poczucie czasu. Najważniejsze zagadnienie praktyczne stanowi budowa odpowiednio precyzyjnych i niezawodnych zegarów, bez których empiryczne teorie czasu nie byłyby możliwe. Przedmiotem naszych rozważań będzie natura czasu opisywana przez najogólniejsze teorie nowoczesnej fizyki. Podkreślenie, że będziemy mówić o fizyce współczesnej, jest ważne z tego względu, iż w ciągu ostatnich stu lat w fizyce zaszły kolosalne zmiany i to, co obecnie wiemy o czasie, w kilku zasadniczych punktach różni się od tego, co głosiła fizyka klasyczna. Poza tym klasyczny naukowy obraz świata był zrozumiały i bliski wiedzy potocznej, natomiast dwie najważniejsze dziedziny współczesnej fizyki – fizyka relatywistyczna i kwantowa – prowadzą uczonych w obszary dziwne i trudne do zrozumienia. Chcąc wyjaśnić, czego nowego i istotnego dowiadujemy się o czasie dzięki tym teoriom, rozpoczniemy od jego klasycznego, tradycyjnego obrazu. W tym celu odwołamy się do pierwszej i najważniejszej teorii fizyki nowożytnej, a mianowicie do mechaniki klasycznej.

## KLASYCZNA WIZJA CZASU

Jej twórca, Isaac Newton, swoje fundamentalne dzieło *Philosophiae naturalis principia mathematica* (*Matematyczne zasady filozofii przyrody*<sup>1</sup>) rozpoczyna od podania we wstępie określenia czasu, gdyż bez precyzyjnego zrozumienia, czym są czas i przestrzeń, nie można opisać ani zrozumieć własności ruchu i procesów mechanicznych. Definicja sformułowana przez Newtona głosi, że czas jest niezależny od materii i zjawisk fizycznych oraz uniwersalny. Jest to obraz zgodny z naszą wiedzą zdobytą w codziennym życiu. Żyjąc w nowoczesnym świecie, w którym zegary odgrywają ważną rolę, stale przekonujemy się o tym, że czas płynie w jednostajny i jednakowy sposób we wszystkich zakątkach świata i że w żaden sposób nie możemy ani powstrzymać, ani przyspieszyć jego upływu, niezależnie do tego, jak bardzo tego pragnęlibyśmy. Nie możemy ponadto cofnąć czasu, aby powrócić do tego, co było miłe, albo zapobiec czemuś, co okazało się niekorzystne lub wręcz tragiczne. Innymi słowy, czas płynie w sposób niezależny od naszej woli i sytuacji. Newton, formułując podstawową teorię fizyczną, nie zajmował się psychologicznymi aspektami przemijania, interesowało go natomiast stworzenie ogólnego wzorca opisu wszystkich zjawisk materialnych. Zjawiska te zachodzą w niezależnej trójwymiarowej przestrzeni Euklidesa, zgodnie z niezależnym od nich upływem czasu. Newton potraktował czas i przestrzeń jako składniki świata fizycznego niezależne od tego, czy w świecie tym istnieje materia i jakie procesy w niej zachodzą. W teorii tej możliwy jest świat całkowicie pusty, nieskończona przestrzeń, w której czas płynie, chociaż nie ma to na nic wpływu. Oto sławne stwierdzenie Newtona na temat czasu: „Absolutny, prawdziwy i matematyczny czas, sam z siebie i z własnej natury, płynie równomiernie bez względu na cokolwiek zewnętrznego i inaczej nazywa się «trwaniem»; względny, pozorny i potocznie rozumiany czas jest pewnego rodzaju zmysłową i zewnętrzną (niezależnie od tego, czy jest dokładny czy nierównomierny) miarą trwania za pośrednictwem ruchu; jest on powszechnie używany zamiast prawdziwego czasu; taką miarą jest na przykład: godzina, dzień, miesiąc, rok”<sup>2</sup>.

Zgodnie z Newtonowską koncepcją czasu płynie on równomiernie, niezależnie od naszego stanu psychicznego i oczekiwań. Subiektywny zaś, niejednorodny czas psychiczny traktujemy mniej poważnie od „prawdziwego” czasu fizycznego, o którym informują nas zegary i do którego musimy dostosować całe swoje życie, zwłaszcza aktywności społeczne. Psychologowie

<sup>1</sup> Zob. I. N e w t o n, *Matematyczne zasady filozofii przyrody*, tłum. J. Wawrzycki, Copernicus Center–Konsorcjum Akademickie, Kraków–Rzeszów 2011.

<sup>2</sup> Tamże, s. 190.

starają się zbadać czynniki, które mają wpływ na ów „czas subiektywny”. Biolodzy odkryli i zbadali kilka rodzajów zegarów biologicznych, które sterują ruchami, procesami fizjologicznymi i uwagą. W badaniach tych wzorcem jest zewnętrzny dla organizmu czas fizyczny, mierzony za pomocą zegarów. Problemy ludzkiego odczuwania czasu nie będą nas jednak w tych rozważaniach interesować, powracamy zatem do poglądów Newtona. Jego największy filozoficzny przeciwnik i krytyk, Gottfried W. Leibniz, wskazywał, że potraktowanie czasu jako składnika świata fizycznego bardziej pierwotnego i niezależnego od ciał oraz procesów nie jest wcale potrzebne fizyce. W mechanice wystarczy przyjąć założenie o uniwersalności czasu i niezależności jego upływu od procesów i zdarzeń. Absolutyzacja czasu i przestrzeni jest niepotrzebnym nauce założeniem metafizycznym i pozostaje nieuzasadniona. Zgodnie ze swoim przekonaniem Leibniz definiował czas jako porządek i miarę następstwa zdarzeń. Pogląd Newtona jednak zwyciężył, ponieważ to on ostatecznie stworzył mechanikę i przez dwa stulecia fizycy i filozofowie powszechnie akceptowali absolutną koncepcję czasu.

Rzeczony rozwój fizyki ujawnił jeszcze jedną podstawową własność czasowego przebiegu zjawisk – ich powtarzalność. W początkowym okresie rozwoju mechaniki uczeni badali najprostsze zjawiska, takie jak zderzenia kul sprężystych, spadanie ciał pod wpływem ziemskiej siły ciężenia czy ruch planet wokół Słońca. Procesy te, przebiegając w niezakłócony sposób, nie wyróżniają kierunku upływu czasu. Jako przykład rozważmy ruch planet wokół Słońca. Gdyby Układ Słoneczny był izolowany, to nie wpadałyby do niego drobne ciała, jak komety czy meteoryty, planety zaś przez miliardy lat poruszałyby się po swoich orbitach i upływający czas nie zmieniałby ich ruchu. Ruch ten byłby zgodny z niezmiennymi prawami mechaniki i teorii grawitacji. Astronomowie, rozwiązując równania ruchu planet, mogą dokładnie przewidzieć ich przyszłość; korzystając z tych równań, mogą również odtworzyć ich orbity w przeszłości. Pozwala to na przykład wyliczyć minione zaćmienia Słońca oraz Księżycy lub zinterpretować dokonane tysiące lat temu obserwacje komet, wspomniane w starożytnych kronikach. Innymi słowy, wszystkie zjawiska i procesy fizyczne przebiegają w czasie, lecz ich własności są stale takie same. Bez tej zasadniczej niezależności od czasu, która charakteryzuje prawa rządzące przyrodą oraz podstawowe siły i własności materii (np. masy, ładunki, spiny), nie byłoby możliwe ani odtwarzanie przeszłości, ani przewidywanie dalekiej przyszłości. Ograniczałoby to bardzo naukę, zwłaszcza astronomię, geologię, kosmologię i biologię, czyli dyscypliny, w których bada się procesy zachodzące w dużej skali czasu. Do niezależności zjawisk od upływu czasu, przez fizyków nazywanej niezmienniczością względem przesunięcia w czasie, należy dodać jednoznaczność rozwiązań równań ruchu. Wiedząc, w jakim punkcie znajduje się obecnie dane ciało, jaka jest jego prędkość i jakie siły

na nie działają, można dokładnie przewidzieć jego tor. W danych warunkach każdy obiekt mechaniczny musi poruszać się po jednym torze, zgodnym z prawami ruchu i rozkładem sił. Z tej jednoznaczności, wynikającej z matematycznej struktury mechaniki, wyłania się obraz świata zjawisk, których przebieg jest jednoznacznie ustalony, które muszą zachodzić w jeden sposób, zgodny z prawami fizyki i własnościami obiektów. Jest to świat ściśle zdeterminowany, którego funkcjonowanie jest raz na zawsze ustalone. Twórcy nowożytnej fizyki, zwłaszcza Kartezjusz, posługiwali się metaforą świata podobnego do zegara, który był dla nich symbolem precyzji i niezawodności działania. W obrazie tym Stwórca świata nazywano zegarmistrzem<sup>3</sup>.

Filozoficznym uogólnieniem odkrytego empirycznie faktu jednoznaczności przebiegu procesów mechanicznych była doktryna determinizmu głosząca, że w przyrodzie wszystko przebiega w jednoznaczny, ustalony sposób. Stanowisko to najwyraźniej sformułował wybitny francuski matematyk i fizyk Pierre Simon de Laplace, pisząc we Wstępie do *Théorie analytique des probabilités* [„Analitycznej teorii prawdopodobieństwa”]: „Inteligencja, która by w danym momencie znała wszystkie siły, przez które jest ożywiona, oraz wzajemne położenia bytów ją tworzących i przy tym byłaby dostatecznie obszerna, by te dane poddać analizie, mogłaby w jednym wzorze objąć ruch największych ciał wszechświata i najmniejszych atomów: nic nie byłoby dla niej niepewne i zarówno przyszłość, jak przeszłość byłyby dostępne dla jej oczu. Umysł ludzki daje słaby zarys tej inteligencji, której doskonałość mógł osiągnąć tylko w astronomii”<sup>4</sup>.

Inteligencja ta, symbolizująca poznawcze moce klasycznej fizyki, została nazwana demonem Laplace’a. Oczywiście nikt nie spodziewał się, że uda się praktycznie zrealizować zarysowany przez francuskiego uczonego program, ważna była jednak jego zasada, określająca istotę procesów fizycznych. W owym czasie fizycy potrafili wypisywać i rozwiązywać równania ruchu zaledwie dla kilku klas najprostszych procesów mechanicznych, wierzyli jednak w determinizm wszystkich podstawowych zjawisk. Byli przekonani, że w przyszłości możliwości nauki staną się znacznie większe i że nie ma zasadniczych przeszkód na drodze do coraz pełniejszego i dokładniejszego poznawania przyrody.

Na tle tego optymistycznego obrazu klasycznej fizyki należy umieścić problem odwracalności zjawisk w czasie. Przebieg podstawowych, najprostszych procesów mechanicznych, takich jak ruch planet i zderzenia atomów, nie wyróżnia jednego kierunku upływu czasu. Gdyby czas zaczął płynąć wstecz,

<sup>3</sup> Metaforą zegara, pochodzącą z siedemnastego wieku, posługuje się na przykład Richard Dawkins w książce *Ślepy zegarmistrz, czyli jak ewolucja dowodzi, że świat nie został zaplanowany* (tłum. A. Hoffman, Państwowy Instytut Wydawniczy, Warszawa 1994).

<sup>4</sup> Cyt. za: A.K. W r ó b l e s k i, *Historia fizyki*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2009, s. 214.

to dynamika układu planetarnego nie uległaby istotnej zmianie. Przy zmianie kierunku czasu, jego biegu od przyszłości do przeszłości, wszystkie planety zaczęłyby poruszać się w przeciwnym kierunku z tą samą prędkością. Byłby to układ tak samo dopuszczalny, jak układ prawdziwy, planety miałyby te same orbity, tylko poruszałyby się po nich w przeciwnych kierunkach. Słońce wędrowałoby po niebie z zachodu na wschód, a w swoim rocznym ruchu przechodziłoby przez znaki zodiaku w odwrotnej kolejności. Byłoby to zgodne z prawami astronomii, ponieważ kierunek, w jakim obraca się Słońce wokół swojej osi i w jakim poruszają się planety, jest przypadkową własnością naszego układu. Podobnie idealnie sprężyste kulki, zderzając się i poruszając bez tarcia, mogłyby w pewnej chwili odwrócić kierunki swojego ruchu, powracając wstecz po przebytych torach. Procesy o tej własności fizycy nazywają odwracalnymi, ponieważ mogłyby one przebiegać w odwrotnym kierunku, tak jakby czas zawrócił w swoim biegu od przeszłości ku przyszłości.

Mechaniczna teoria procesów jednoznacznych i odwracalnych w czasie prowadzi do obrazu świata przyrody, w którym nie dzieje się nic prawdziwie nowego i twórczego. Upływ czasu nie prowadzi do żadnych istotnych zmian. Wieczne niezmiennie atomy zderzają się, łączą i rozdzielają według tych samych zasad; każdy odpowiednio prosty proces może być cofnięty, jest bowiem odwracalny. Jest to świat nudny, nietwórczy w sensie Bergsona<sup>5</sup> i powtarzalny. Rzeczywiście przypomina zegar, którego zaletą jest precyzyjne powtarzanie tego samego ruchu. Przede wszystkim jednak jest on niezgodny ze światem, w którym żyjemy. W naszym życiu prawie wszystko jest nieodwracalne, a nauka powinna badać, opisywać i wyjaśniać tę zasadniczą zmienność zjawisk. Pod tym względem zatem rysowany przez nią obraz przyrody był uproszczony i zbyt ubogi.

#### KONCEPCJA CZASU A PROCESY NIEODWRACALNE

Na szczęście klasyczna fizyka nie kończyła się na mechanice i związanych z nią dziedzinach. Konkurencyjny wobec mechanicznego obraz świata rozwijała termodynamika, opisująca między innymi procesy cieplne, spalanie, podgrzewanie, ruchy cieczy i gazów, dyfuzję, przemiany chemiczne czy tarcie. Większość tych procesów ma charakter nieodwracalny, a więc wykazuje własność, którą mechanika starała się wyrugować z przyrodniczego obrazu świata. Początkowo przedmiotem analiz termodynamicznych były procesy odwracalne, takie jak sprężanie gazów, lecz wkrótce zaczęto badać zjawiska nieodwracalne. W roku 1854 Rudolf Clausius opublikował pracę, w której

<sup>5</sup> Zob. H. Bergson, *Ewolucja twórcza*, tłum. F. Znanięcki, Zielona Sowa, Kraków 2004.

zdefiniował nową wielkość termodynamiczną – entropię, stanowiącą miarę nieodwracalności procesów, i sformułował drugą zasadę termodynamiki<sup>6</sup>. Zasada ta głosi, iż w układzie zamkniętym procesy mogą zachodzić tylko w taki sposób, by całkowita entropia nie malała. Proces jest odwracalny, gdy entropia nie rośnie, natomiast gdy wzrasta, zachodzą nieodwracalne zmiany. Powrót do stanu początkowego staje się wówczas niemożliwy, ponieważ nie można powrócić do początkowej mniejszej wartości entropii. Na przykład, gdy zetkniemy ciała o różnych temperaturach, ciepło nieodwracalnie przechodzi od ciała cieplejszego do chłodniejszego i bez ingerencji z zewnątrz procesu tego odwrócić nie można. W miarę wyrównywania się temperatur obu ciał entropia całości rośnie.

Nowe pojęcie wzbudziło zainteresowanie i spowodowało wieloletnie spory, entropia bowiem była pierwszą ilościową miarą nieodwracalności, której istotne znaczenie negowała mechanika. Fizycy chcieli pogodzić odwracalność mechaniczną z nieodwracalnością termodynamiczną. Stało się to szczególnie ważne, gdy powstała fizyka statystyczna. Sformułowana przez Clausiusa teoria dowodziła, że gazy i ciecze są skupiskami ogromnej liczby atomów lub molekuł, które poruszają się i zderzają zgodnie z prawami mechaniki. Podstawowe pojęcia termodynamiki znalazły w niej swoje mechaniczne definicje, na przykład, okazało się, że ciepło jest kinetyczną energią składników gazów i cieczy, a temperatura miarą średniej energii kinetycznej elementów danego układu. Mechaniczne wyjaśnienie procesów zachodzących w ośrodkach ciągłych zmusiło fizyków do skoncentrowania uwagi na zjawiskach nieodwracalnych, pojawiły się bowiem pytania: Skoro wszystkie lokalne podstawowe procesy zachodzące w gazie mają charakter mechaniczny i są odwracalne, to dlaczego całość zachowuje się w sposób nieodwracalny? Jaka jest przyczyna tej nieodwracalności?

Dyskusje na ten temat były długie i burzliwe; najwięcej w tej dziedzinie dokonał Ludwig Boltzmann, który podał statystyczną interpretację entropii jako miary nieporządku panującego w układzie<sup>7</sup>. Chcąc to poglądowo wyjaśnić, jako przykład rozważmy pojemnik rozdzielony przegrodą na dwie części. Na początku w jednej części znajduje się gaz, a druga jest pusta. Po usunięciu przegrody gaz natychmiast zajmie cały pojemnik. Początkowy stan był o wiele mniej prawdopodobny od końcowego, dlatego w wyniku rozprzestrzenienia się gazu entropia wzrosła. Największą entropię ma stan najbardziej prawdopodobny i zgodnie z tym druga zasada termodynamiki głosi, że układ zamknięty zmierza do stanu najbardziej prawdopodobnego, czyli najbardziej jednorod-

<sup>6</sup> Zob. R. C l a u s i u s, *Über eine veränderte Form des Zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärtheorie*, „Annalen der Physik” 93(1854), s. 481-506.

<sup>7</sup> Por. W r ó b l e w s k i, dz. cyt., s. 355-358.

nego: takiego, w którym poszczególne części są podobne do siebie, w którym nie ma wyraźnie różniących się składników ani globalnych struktur.

Pod koniec dziewiętnastego wieku fizycy znaleźli kompromisowe rozwiązanie problemu nieodwracalności. Uznali, że podstawowe procesy zachodzące w przyrodzie są odwracalne, chociaż zmienia się statystyczny rozkład prędkości składników gazów i cieczy oraz ich gęstości przestrzennej. Nieodwracalność wynika ze zmian statystycznej funkcji rozkładu, którą uczeni muszą posługiwać się w teorii i w obliczeniach z powodu ograniczoności swojej wiedzy o mikroskopowej dynamice całości. Gdyby, tak jak demon Laplace'a, wiedzieli wszystko o molekułach danego gazu, to zachodzące w nim procesy byłyby dla nich odwracalne. W skład gazów i cieczy wchodzi ogromna liczba mechanicznych składników, atomów lub molekuł, dlatego szansa odwrócenia na przykład procesu mieszania się dwóch gazów jest niewyobrażalnie mała, lecz różna od zera. Z tego powodu nie obserwujemy w przyrodzie procesów samorzutnie zmniejszających entropię, są one jednak teoretycznie możliwe. Na tym dyskusje w zasadzie zakończono, ponieważ w fizyce zaczęły się rewolucyjne przemiany, które zmusiły uczonych do rewizji podstawowych pojęć.

## FIZYKA RELATYWISTYCZNA

W roku 1905 Albert Einstein ogłosił szczególną teorię względności, której konsekwencją były zasadnicze zmiany poglądów na czas<sup>8</sup>. Istota tych zmian dotyczy faktu, że tempo zachodzenia procesów, a więc także prędkość upływu związanego z nimi czasu, zależy od tego, z jakiego układu odniesienia są one obserwowane. Nie wdając się w szczegółowe wyjaśnienia, opiszę to zjawisko na prostym przykładzie. Wyobraźmy sobie dwóch fizyków, którzy mają jednakowe, dokładne zegary. Gdy nie poruszają się oni względem siebie, przebywając na przykład w jednym gmachu, wskazania ich zegarów są takie same i jest to fakt oczywisty z punktu widzenia klasycznej mechaniki, czas bowiem płynie jednakowo dla obu urządzeń. Sytuacja zmienia się radykalnie, gdy zegary te są względem siebie w ruchu. Jeżeli jeden z fizyków wsiądzie do rakiety i popędzi z prędkością 85% prędkości światła, to jego zegar będzie chodzić dwa razy wolniej od zegara nieporuszającego się kolegi. Na tym jednak nie koniec, ponieważ z kolei dla poruszającego się uczonego dwa razy wolniej chodzi zegar kolegi. Ta paradoksalna sytuacja wynika z faktu, iż ruch jest zjawiskiem względnym. Nie ma ustalonego wyróżnionego układu spo-

---

<sup>8</sup> Zob. A. E i n s t e i n, *O elektrodynamice ciał w ruchu*, w: tenże, *5 prac, które zmieniły oblicze fizyki*, tłum. P. Amsterdamski, Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2005, s. 121-156.

czywającego, dlatego każda z poruszających się względem siebie osób może twierdzić, że to ona spoczywa, a porusza się kolega, a więc zegar kolegi chodzi odpowiednio wolniej. Dokładniejsza analiza pokazuje jednak, że paradoks jest pozorny, ponieważ jeden z fizyków cały czas porusza się ruchem jednostajnym, natomiast drugi po wejściu do rakiety musiał wraz z nią przyspieszać aż do osiągnięcia ogromnej prędkości. Z tego powodu wskazania ich zegarów różnią się zasadniczo.

Zależność odstępów czasowych między zdarzeniami od prędkości układu, w którym się je obserwuje, wynika z matematycznej struktury teorii Einsteina i nie prowadzi do żadnych trudności. Została ona znakomicie potwierdzona i stanowi jedną z podstaw nowoczesnej fizyki. Wynika ona z prawa stałej prędkości światła we wszystkich inercjalnych układach odniesienia i z tego, że wskazania zegara, od którego się oddalamy, obserwujemy za pomocą światła. Fizycy bez problemów zaakceptowali szczególną teorię względności, natomiast dla niespecjalistów jest ona przedmiotem zdumienia i dyskusji. Pokazuje ona fałszywość klasycznego przekonania o tym, że uniwersalny czas płynie jednakowo dla wszystkich. Okazuje się, że jego miara zależy od prędkości ruchu obserwatora względem badanego procesu. Fizycy wprowadzili zatem pojęcie czasu własnego, niezależnego od układu odniesienia i zgodnego z matematyką teorii względności. Przypomnijmy, że szczególna teoria względności opisuje zjawiska tylko w układach inercjalnych, czyli poruszających się względem siebie po liniach prostych ze stałą prędkością. Czas zależy w niej tylko od układu: jest niezależny od tego, jakie procesy zachodzą w danym obszarze i jaki rodzaj materii się w nim znajduje.

Rozszerzenie teorii względności na siłę grawitacji i na dowolne układy odniesienia, zwane ogólną teorią względności, dokonane zostało także przez Einsteina. Teoria ta opisuje pole grawitacyjne jako czynnik zmieniający geometryczną strukturę przestrzeni i czasu. Jej matematyczną podstawą jest geometria przestrzeni zakrzywionych. Są to przestrzenie, których poszczególne obszary mogą znacznie różnić się pod względem własności geometrycznych. Popularne wyjaśnienie tych różnic byłoby bardzo trudne, można je jednak pokazać na prostym przykładzie przestrzeni dwuwymiarowej. Zacznijmy od dobrze znanej ze szkoły geometrii płaszczyzny. Płaszczyzna jest wszędzie i we wszystkich kierunkach taka sama. Trójkąt lub kwadrat, narysowane w jakimś miejscu, po przesunięciu w dowolne inne miejsce są takie same. Między obszarami płaszczyzny nie ma żadnych zauważalnych różnic. Na przykład, wszędzie suma kątów trójkąta wynosi sto osiemdziesiąt stopni. Taką przestrzeń nazwiemy jednorodną.

Mniej oczywistym, lecz także łatwym do zrozumienia przykładem przestrzeni jednorodnej jest powierzchnia kuli. Jej wszystkie obszary są również do siebie podobne, chociaż ich geometria jest bardziej skomplikowana od



geometrii płaszczyzny. Powierzchnie brył podobnych do kuli, lecz mniej regularnych, na przykład o kształcie śliwki lub cytryny, są przykładami przestrzeni niejednorodnych: mają wypukłości, wklęsnięcia czy zakrzywienia o różnej wielkości. Ogólna teoria względności podaje, w jaki sposób geometria przestrzeni i czasu danego obszaru jest zmieniana i zakrzywiana przez zawartą w tym obszarze materię. Omawiając własności czasu, możemy ograniczyć się do tego, co teoria ta mówi o wpływie materii na jego przebieg. Otóż materia zawsze wytwarza pole grawitacyjne, a pole to wpływa na tempo upływu czasu. Wpływ ten jest następujący: im silniejsza siła grawitacji, tym wolniej chodzą zegary. W przypadku Ziemi oznacza to, że im bliżej jej powierzchni się znajdujemy, tym wolniej płynie czas. Siła grawitacji na naszej planecie jest stosunkowo mała, dlatego różnica czasu odmierzonego przez zegar znajdujący się na satelicie i taki sam zegar umieszczony na Ziemi wynosi ułamek sekundy na rok. Precyzyjne przyrządy pozwalają zmierzyć tę różnicę dla zegarów atomowych odległych w pionie o zaledwie dwadzieścia metrów.

Ekstremalnymi obiektami astronomicznymi, przewidywanymi przez ogólną teorię względności, są czarne dziury. Są to ciała o niesłychanej gęstości. Na przykład czarna dziura o masie Ziemi miałaby średnicę mniejszą niż centymetr, co trudno sobie wyobrazić, dlatego uczeni przez wiele lat wątpili w istnienie tak gęstych ciał. Okazało się jednak, że gwiazdy o odpowiednio dużej masie kończą swoją ewolucję właśnie jako czarne dziury, i obecnie znamy wiele takich obiektów. W pobliżu czarnej dziury, na jej powierzchni i we wnętrzu występują nadzwyczajne zjawiska, badane i dyskutowane przez astrofizyków, dowodzące, że czas fizyczny nie jest ani uniwersalny, ani niezależny od zjawisk fizycznych, jak to głosił Newton. Czas jest natomiast podstawowym parametrem wszystkich procesów, w ekstremalnych warunkach radykalnie zmieniającym swoje własności. Taki jego obraz, wyłaniający się z rezultatów ogólnej teorii względności, jest jednak skomplikowany, pełen luk i zasadniczych trudności. Fizycy współcześni mogą zazdrościć swoim poprzednikom prostoty i jasności ich koncepcji czasu. Wydaje się jednak, że niewielu chciałoby powrócić do tego okresu uproszczonej wiedzy o własnościach materii.

Fizyka relatywistyczna doprowadziła do jeszcze jednej zasadniczej zmiany naukowego obrazu materii i jej historii – do kosmologii Wielkiego Wybuchu. Krótco po ogłoszeniu przez Einsteina równań pola w roku 1915 fizycy znaleźli ich rozwiązania opisujące cały Wszechświat, zwane rozwiązaniami kosmologicznymi. W rozwiązaniach tych zakłada się, że cała przestrzeń jest napełniona materią o stałej gęstości, i poszukuje się geometrii czasoprzestrzeni generowanej przez taką materię. Ten wyidealizowany model matematyczny nie odpowiada rzeczywistości, ponieważ większość materii skupiona jest w gwiazdach i galaktykach. Kosmologowie uważają jednak, że opisuje on Wszechświat w odpowiednio dużej skali, gdzie skupiska materii w galaktykach można potraktować

jako statystyczne odchylenia od średniej gęstości, jednakowej dla wszystkich dużych obszarów. Rozwiązania te zaskoczyły uczonych, pokazywały bowiem Wszechświat, który rozszerza się nieustannie od stanu początkowego, nazwanego Wielkim Wybuchem. Wielu fizyków nie chciało się pogodzić z obrazem rozszerzającego się Wszechświata, wydawał im się on bowiem niezgodny z intuicją – wieczność i niezmienność świata materii w wielkiej skali były przez nich uznawane za fakt oczywisty. Największym przeciwnikiem tych rozwiązań był Einstein, który uznał je dopiero po ogłoszeniu przez Edwina Hubble'a danych obserwacyjnych potwierdzających fakt oddalania się odległych galaktyk<sup>9</sup>. Od tego czasu relatywistyczna teoria Wielkiego Wybuchu jest akceptowana i rozwijana przez astrofizyków i obecnie nie ma liczących się konkurentek.

Teoria ta w nowym świetle pokazuje dwa aspekty problemu czasu. Po pierwsze, dowodzi ona, że świat, w którym żyjemy, powstał około czternaście miliardów lat temu. Na początku była to nieskończenie mała kula ogromnej energii, która szybko się rozszerzała. W miarę rozszerzania się i ochładzania materii, obniżania jej gęstości i ciśnienia, kolejno powstawały wszystkie istniejące obecnie i znane nam składniki materii: cząstki elementarne, jądra, atomy, związki chemiczne, gwiazdy, planety, galaktyki. Historia materii jest dobrze opisana i zbadana. Pokazuje ona, że upływ czasu jest twórczy, że Wszechświat rozwija się i nigdy nie powraca do dawnych stanów. Jest to więc świat twórczy w sensie Bergsona. Czas jest parametrem jego rozwoju. Gdyby jakiś kosmolog cofnął się w czasie o kilka miliardów lat, to obserwując niebo, mógłby dowiedzieć się w przybliżeniu, w jakim momencie historii Wszechświata się znalazł. Każdy bowiem okres jego rozwoju wygląda inaczej i ma specyficzne, niepowtarzalne cechy. Wiemy, że Wszechświat na pewno nie jest podobny do zegara: powstał, rozwija się i kiedyś prawdopodobnie nastąpi jego kres.

Nie jest to jednak cała prawda, ponieważ kosmologia oparta jest na znanych nam obecnie prawach fizyki, stałych uniwersalnych i podstawowych wielkościach, takich jak stała Plancka, stała grawitacji, masa i ładunek elektronu czy masa protonu. Rezultaty kosmologii pokazują, że Wszechświat jest układem dynamicznym o niepowtarzalnej historii, lecz jednocześnie są one potwierdzeniem stałości praw i wielkości fizycznych. Gdyby wielkości te zmieniały się w miarę rozszerzania się Wszechświata, to modele i obliczenia oparte na ich aktualnych wartościach byłyby niezgodne z obserwacjami, a teoria byłaby fałszywa. Ponieważ zagadnienie stałości najważniejszych wielkości fizycznych, którymi uczeni posługują się w swoich teoriach i obliczeniach, nurtowało fizyków, przeprowadzono specjalne obserwacje, których celem była

---

<sup>9</sup> Ciekawą historię tych sporów opisuje w książce *Granice kosmosu i kosmologii* ks. Michał Heller (Wydawnictwo Naukowe Scholar, Warszawa 2005).

odpowiedź na pytanie, czy stałe fizyczne rzeczywiście nie zmieniają się w długich okresach czasu. Astronomowie rejestrują promieniowanie, które zostało wytworzone w procesach zachodzących miliardy lat temu, a ich obserwacje dowodzą, że procesy te były takie, jak obecnie, co świadczy o stałości związanych z nimi wielkości. W rezultacie kosmologia dowodzi, że niepowtarzalna historia Wszechświata toczy się w zgodzie z niezależnymi od czasu prawami i podstawowymi własnościami materii. Kosmolodzy stawiają obecnie pytanie o możliwość istnienia innych wszechświatów i o to, czy ich składniki, parametry i prawa byłyby takie same, jak w naszym świecie. Są to spekulacje bardzo śmiałe, wykraczające poza granice eksperymentalnej weryfikacji.

### CZAS W MECHANICE KWANTOWEJ

Obie teorie Einsteina w rewolucyjny sposób zmieniły poglądy fizyków dotyczące podstawowych własności czasu. Choć fizyka kwantowa ma pod tym względem znacznie mniej do powiedzenia, pewne jej rezultaty także wnoszą nowe, ważne elementy. Dotyczą one na przykład zagadnienia odwracalności w czasie procesów zachodzących w przyrodzie. Mówiliśmy już o tym, że spory na ten temat, związane z nieodwracalnością zjawisk badanych przez termodynamikę, doprowadziły do kompromisowego stanowiska, zgodnie z którym wszystkie podstawowe procesy fizyczne są odwracalne w czasie, natomiast nieodwracalność, którą obserwujemy i opisujemy w termodynamice jest pozorna. Wynika ona ze złożoności procesów i braku wyczerpującej wiedzy o nich. Innymi słowy, sądzono, że to, co dzieje się w podstawowej warstwie budowy materii, czyli w świecie atomów i ich składników, jest w swej istocie odwracalne. Warstwę tę bada fizyka kwantowa, tak więc ona właśnie powinna potwierdzić to przekonanie. Okazało się jednak, że sprawa nie jest wcale prosta.

Z jednej strony jest tak, jak chcieliby zwolennicy odwracalności czasu, ponieważ podstawowe równania mechaniki kwantowej, na przykład równania Schrödingera i Diraca, są – podobnie jak równania mechaniki klasycznej – odwracalne w czasie. Równania te opisują dynamikę mikroukładów, takich jak atomy czy oscylatory, gdy układy te nie są obserwowane: ich dynamika jest wtedy odwracalna. Sytuacja zmienia się radykalnie, gdy trzeba opisać, co dzieje się podczas pomiaru, gdy badany układ wchodzi w interakcję z przyrządem. Dochodzi wówczas do zjawiska nazywanego przez fizyków redukcją funkcji falowej. Jest to proces, który pozostaje trudny do zrozumienia, a jego interpretacja stanowi przedmiot sporów i wątpliwości. Istota pomiaru kwantowego i rola obserwatora to obecnie zagadnienia najważniejsze i najtrudniejsze do zrozumienia, dla naszych rozważań na temat czasu istotne jest jednak

to, iż w trakcie pomiaru obiekty kwantowe zmieniają się w nieodwracalny, nieprzewidywalny sposób. Jest to nieodwracalność leżąca u podstaw mikroświata, która różni się istotnie od klasycznej nieodwracalności termodynamicznej i statystycznej. Z taką nieodwracalnością nie można się „rozprawić” na poziomie sofistycznych argumentów, stanowi ona nieusuwalną własność procesów pomiaru.

Drugim ważnym osiągnięciem fizyki cząstek elementarnych dotyczącym odwracalności było odkrycie nieodwracalnych w czasie przemian cząstek elementarnych. Cząstki elementarne tworzą świat dynamiczny i zmienny, większość z nich istnieje bowiem bardzo krótko, rozpadając się, zderzając, tworząc stany wzbudzone. Tylko w przypadku elektronów, protonów, neutrin i fotonów nie zaobserwowano ich samorzutnych rozpadów, dlatego fizycy sądzą, że cząstki te mogą w izolacji istnieć dowolnie długo; pozostałe cząstki po pewnym okresie samorzutnie rozpadają się na inne, które z kolei także nie „żyją” długo, chyba że są wspomnianymi cząstkami stabilnymi. Teoria cząstek elementarnych traktuje te procesy jako odwracalne w czasie i prawie wszystkie obserwowane przez fizyków przemiany są z nią zgodne. Istnieje tylko jeden wyjątek, którym są bardzo rzadko występujące rozpady mezonów K. Mezony te przeważnie rozpadają się w sposób niewyróżniający kierunku upływu czasu, niekiedy jednak następuje ich rozpad nieodwracalny. Zjawisko to było starannie badane i dyskutowane – uczeni chcieli znaleźć przyczynę tej anomalii, lecz nie udało im się tego dokonać i w końcu musieli uznać, że przebieg tego zjawiska jest inny niż tysięcy innych podobnych, a jednak odwracalnych procesów. Nie wiadomo, dlaczego ten jedyny przypadek stanowi wyjątek. Była nawet propozycja, aby te nieodwracalne rozpady uznać za osobny rodzaj elementarnego procesu, lecz nie została ona przyjęta, ponieważ uczeni nie zaobserwowali innych procesów tego typu. W obecnej sytuacji, nie mogąc wyjaśnić natury tego zjawiska, uczeni musieli zaakceptować fakt, że w świecie cząstek elementarnych nie wszystko jest teoretycznie odwracalne, że na poziomie procesów najprostszych przyroda zachowuje się w sposób wyróżniający kierunek upływu czasu. Byłoby dla nich wygodniej, gdyby tych rozpadów nie było, wtedy bowiem wszystko, co się dzieje na podstawowym poziomie budowy materii, pasowałoby do modelu odwracalnego czasu. Jeżeli powstanie nowa, doskonalsza teoria cząstek elementarnych, to prawdopodobnie wyjaśni ona, jakie jest źródło i mechanizm nieodwracalności tego procesu lub nieodwracalność uzna za ogólną własność procesów fizycznych. Przy takim ujęciu nieodwracalne rozpady mezonów K można potraktować jako anomalię, wskazującą na ograniczenia aktualnej teorii.

Dotychczasowa analiza własności czasu w mikroświecie mieści się w ramach standardowej mechaniki kwantowej. Czas jest w niej traktowany jako liczbowy parametr porządkujący zdarzenia i ma charakter klasyczny. Na tym jednak sprawa się nie kończy, w fizyce kwantowej bowiem podstawowe wiel-

kości fizyczne, czas, położenie, energia i pęd, nie są liczbami lub funkcjami liczbowymi, lecz operacjami w abstrakcyjnej przestrzeni stanów. Fizycy są przekonani, że na podstawowym poziomie cała przyroda ma charakter kwantowy, dlatego chcieliby sformułować kwantową teorię czasu. Pomimo prowadzonych od kilkudziesięciu lat intensywnych prac nad tym zagadnieniem nie udało się im uzyskać żadnych istotnych powszechnie akceptowanych rezultatów. Prace prowadzone są w ramach kilku programów: kwantowej grawitacji, kwantowej kosmologii, supersymetrii, geometrii nieprzemiennej i innych, które stosują różne formalizmy matematyczne i wychodzą z odmiennych założeń. Są to zagadnienia znacznie wykraczające poza zakres niniejszego artykułu, dlatego poprzestaniemy na tych ogólnych uwagach<sup>10</sup>.

\*

Zgodnie z fizyką relatywistyczną czas z pewnością nie jest absolutny i niezależny od procesów materialnych. Jego zależność ma dwa podstawowe aspekty. Po pierwsze, jak pokazuje szczególna teoria względności, rejestrowany i mierzony za pomocą zegarów upływ czasu zależy od prędkości ruchu obserwatora względem badanego procesu. Po drugie, tempo zachodzenia zjawisk zależy od otoczenia, od gęstości materii w danym obszarze. Materia wpływa istotnie na geometrię czasoprzestrzeni, oddziałując zarówno na odległości przestrzenne, jak i na czasowe odstępy między zjawiskami. Z tego powodu absolutna koncepcja czasu stworzona przez Newtona, charakterystyczna dla klasycznej fizyki, została zdecydowanie sfalsyfikowana i odrzucona.

Bardziej skomplikowana jest sprawa odwracalności podstawowych procesów przyrody, tak bliska sercu fizyków klasycznych. Podstawowe prawa mechaniki kwantowej są odwracalne w czasie, podobnie jak prawa Newtona i Maxwella. Proces pomiaru jest jednak nieodwracalny i uczeni nie wiedzą, jak matematycznie go opisać i wyjaśnić. Pomiar jest najbardziej kontrowersyjnym i najczęściej dyskutowanym problemem interpretacyjnym fizyki kwantowej. Jeżeli uda się opisać i zrozumieć jego istotę, to wpłynie to istotnie na zrozumienie odwracalności zjawisk. Dodatkową trudnością jest istnienie rozpadów słabych, nieodwracalnych w czasie. Analizując sytuację panującą w najnowszej fizyce, widzimy zatem, że czas stał się przedmiotem badań kilku podstawowych teorii. Obok omówionych powyżej zagadnień należy wymienić również kwantową teorię grawitacji, nad którą intensywnie pracują fizycy. W miarę rozwoju fizyki przedmiotem jej badań stają się coraz głębsze pozio-

---

<sup>10</sup> Popularna prezentacja sytuacji panującej w teorii kwantowej grawitacji zob. L.M. Sokołowski, *Czas a grawitacja kwantowa*, w: *Czas...*, red. ks. M. Heller, ks. J. Mączka, Biblos, Tarnów 2001, s. 41-69.

my budowy materii, jej podstawowe składniki, uniwersalne oddziaływania i najważniejsze własności. Takim podstawowym parametrem opisu świata jest niewątpliwie czas i można bez przesady powiedzieć, że zrozumienie jego istoty i cech jest obecnie najważniejszym zadaniem stojącym przed fizyką. Kłopot polega jednak na tym, że dotychczasowe wyniki badań coraz bardziej komplikują jego obraz i nie wiadomo, czy zagadka przemijania znajdzie swoje naukowe wyjaśnienie. Jerzy Gołosz, autor monografii poświęconej czasowi, twierdzi, że jest to problem filozoficzny, którego nauki przyrodnicze nie mogą rozwiązać do końca<sup>11</sup>. Wydaje się jednak, że fizyka ma na ten temat wiele do powiedzenia, a wiedza o czasie szybko rośnie.

---

<sup>11</sup> Zob. J. G o ł o s z, *Uptyw czasu i ontologia*, Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków 2011.