

Andrzej ŁUKASIK

PRZESTRZEŃ W FIZYCE Podstawowe koncepcje¹

Analizując Kantowski pogląd na status przestrzeni i czasu, nie można zapominać, że filozofia Kanta jest w znacznie mierze filozofią fizyki Newtona. Podstawowego założenia dostarcza jej przekonanie, że ścisła nauka o przyrodzie jest niewątpliwym faktem, co z kolei sprawia, że pojawia się pytanie: „Jak możliwa jest fizyka?”. Niezwykła efektywność mechaniki Newtona stała się powodem przekonania, że odkryto wreszcie „prawdziwe prawa przyrody”. Zdaniem Kanta miały one charakter sądów syntetycznych a priori.

Jest wreszcie trzeci rodzaj, który istnieje zawsze, mianowicie miejsce; jest ono niezniszczalne, ofiarowuje pobyt u siebie wszystkim przedmiotom, które się rodzą, dają się dostrzec niezależnie od zmysłów przez pewien rodzaj rozumowania złożonego; z trudnością weń można uwierzyć; postrzegamy je jako coś w rodzaju sennego marzenia i mówimy, że każda rzecz istnieje z konieczności w pewnym miejscu, zajmuje pewną przestrzeń, i że to, co nie mieści się ani na Ziemi, ani gdzieś na Niebie, jest niczym.
Platon²

Dla zdroworozsądkowego poglądu na świat charakterystyczne jest przekonanie, że żyjemy w realnym, czyli przestrzennym i czasowym świecie, a rzeczy istnieją niezależnie od nas i naszego ich poznania. Pojęcie istnienia w odniesieniu do obiektów świata realnego łączymy zaś nieodmiennie z pojęciem lokalizacji przestrzennej. Czym jednak jest sama przestrzeń? Czy jest skończona, czy nieskończona? Czy istnieje samodzielnie i niezależnie od materii, czy też jest jedynie systemem relacji między ciałami materialnymi? Czy jest neutralna względem materii, czy też wpływa na własności ciał i sama podlega oddziaływaniu ze strony ciał? Czy jej własności znane są umysłowi bez faktów zewnętrznych, czy też są wyprowadzone z danych doświadczenia?³ Są to podstawowe pytania dotyczące

¹ W niniejszym artykule wykorzystałem część materiału opublikowanego wcześniej. Zob. A. Łukasik, *Filozofia atomizmu. Atomistyczny model świata w filozofii przyrody, fizyce klasycznej i współczesnej a problem elementarności*, Wydawnictwo UMCS, Lublin 2006.

² P l a t o n, *Timajos*, 52 B, tłum. P. Siwek, w: tenże, *Timajos. Kritias albo Atlantyck*, PWN, Warszawa 1986, s. 67.

³ Por. L.N. C o o p e r, *Istota i struktura fizyki*, tłum. J. Kozubowski, Z. Majewski, A. Pindor, J. Prochorow, PWN, Warszawa 1975, s. 406.

przestrzeni, rozważane zarówno w fizyce, jak i w filozofii. Celem niniejszego artykułu jest próba odpowiedzi na nie w odniesieniu do głównych koncepcji przestrzeni od starożytnej filozofii przyrody po fizykę współczesną.

PRZESTRZEŃ JAKO PRÓŻNIA

Wprawdzie o fizyce we współczesnym rozumieniu tego słowa mówimy zwykle poczynając od prac Galileusza i Newtona, to jednak w szerszym znaczeniu fizyka jako próba wypracowania spójnego poglądu na przestrzeń, czas i materię powstała już w starożytności. Wszak pierwszych filozofów nazywano właśnie fizykami, ponieważ przedmiotem ich zainteresowań była przyroda (gr. *physis*), a jedno z głównych dzieł przyrodniczych Arystotelesa nosi tytuł *Fizyka*. Pozwala to włączyć koncepcje przestrzeni wypracowane jeszcze przed powstaniem nowożytnego matematycznego przyrodoznawstwa do tematu traktującego o przestrzeni w fizyce. Niezależnie od istotnych różnic metodologicznych między nauką starożytną a współczesną stanowiły one przecież próby odpowiedzi na pytanie, czym jest przestrzeń.

Jeden z wielkich sporów w starożytnej filozofii przyrody dotyczył kwestii istnienia próżni. Jako jedni z pierwszych istnienie próżni przyjmowali pitagorejczycy, a miała ona „ich zdaniem [...] przenikać kosmos”⁴. Samo pojęcie próżni nie było jednak jeszcze ściśle sprecyzowane, ponieważ utożsamiana była ona również z „nieskończonym powietrzem”⁵ (czyli nie była traktowana jako „istniejący niebyt” atomistów).

Koncepcja przestrzeni jako próżni wypracowana została w ramach starożytnego atomizmu. Leukippos i Demokryt, a także późniejsi zwolennicy atomistycznej koncepcji materii Epikur i Lukrecjusz przyjmowali, że materia ma strukturę nieciągłą, to znaczy, że istnieją pewne ostateczne, absolutnie niepodzielne składniki materii, zwane atomami (gr. *atomos* – niepodzielny), które poruszają się odwiecznie w pustej przestrzeni, czyli w próżni (gr. *ke-non*). Atomiści, próbując zrozumieć zjawisko ruchu, wprowadzili przełomową koncepcję głoszącą, że istnieje zarówno byt (ogół niepodzielnych i niezniszczalnych atomów), jak i niebyt, czyli próżnia. Atomy i próżnia stanowiły dwa nieredukowalne do siebie składniki świata. Jak pisze Arystoteles, atomiści twierdzą, że „elementami są pełnia i próżnia [...], nazywając jedno bytem,

⁴ Arystoteles, *Fizyka*, ks. IV, 213 b, tłum. K. Leśniak, w: tenże, *Dziela wszystkie*, t. 2, *Fizyka. O niebie. O powstawaniu i niszczeniu. Meteorologia. O świecie. Metafizyka*, tłum. K. Leśniak i in., PWN, Warszawa 1990, s. 95.

⁵ M. J a m e r, *Concepts of Space: The History of Theories of Space in Physics*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1957, s. 7. O ile nie podano inaczej, tłumaczenie fragmentów obcojęzycznych – A.Ł.

a drugie niebytem; pełnia i ciała stałe to byt, próżnia to niebyt (z tego też względu mówili, że byt nie więcej istnieje niż niebyt, ponieważ ciało stałe nie bardziej istnieje niż próżnia)⁶.

Własności próżni („istniejącego niebytu”) są opozycyjne w stosunku do własności atomów: atomy są nieprzenikliwe, próżnia całkowicie przenikliwa – nie stawia żadnego oporu poruszającym się w niej atomom i ciałom zbudowanym z atomów; atomy są dyskretnymi i z definicji niepodzielnymi elementami materii, próżnia zaś jest ciągła i podzielna w nieskończoność; atomy mają skończone rozmiary przestrzenne, próżnia jest nieskończona; atomów jest nieskończona ilość, próżnia jest jedna. Próżnia ma własności czysto geometryczne, opisywane geometrią Euklidesa (która wprawdzie została sformułowana już po powstaniu koncepcji atomistycznej, ale większość jej twierdzeń znana była wcześniejszym pitagorejczykom), nie wpływa w żaden sposób na ruch atomów ani nie doznaje z ich strony żadnego oddziaływania. Próżnia, podobnie jak same atomy, istnieje odwiecznie.

Epikur wprowadził dwie modyfikacje do poglądów Demokryta na naturę przestrzeni, z których pierwsza była związana z krytyką atomizmu przeprowadzoną przez Arystotelesa⁷. Z argumentacji Arystotelesa wynika, że jeżeli istnieją niepodzielne składniki materii, to ruch byłby możliwy jedynie w takim przypadku, gdyby zarówno przestrzeń, jak i czas miały charakter nieciągły. Epikur przyjął pogląd o istnieniu *minimae partes* – najmniejszych jednostek przestrzeni (i czasu), co znaczy, że przestrzeń ma w tej koncepcji charakter nieciągły⁸. Druga modyfikacja związana jest z koncepcją ciężaru rozumianego jako wewnętrzna własność atomów, „uniwersalny atrybut materii”⁹, który stanowi przyczynę ich ruchu „w dół”¹⁰. Zdaniem Epikura naturalnym ruchem atomów jest odwieczne spadanie (ruch „w dół”) w nieskończonej przestrzeni, co staje się zrozumiałe jedynie wtedy, gdy sama przestrzeń posiada wyróżniony kierunek „w dół”, co oczywiście

⁶ Arystoteles, *Metafizyka*, ks. A(I), 985 b, tłum. K. Leśniak, w: tenże, *Dziela wszystkie*, t. 2, s. 626.

⁷ Por. D.J. Furlley, *Two Studies in the Greek Atomists*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1967, s. 128. Zagadnienie to omawiam szczegółowo w pracy *Filozofia atomizmu* (por. s. 95n.).

⁸ Por. C. Bailey, *The Greek Atomists and Epicurus*, Russell & Russell Inc., New York 1964, s. 287; Epikur, *List do Herodota*, w: Diogenes Laertios, *Żywoty i poglądy słynnych filozofów*, ks. X, 62, tłum. I. Krońska, K. Leśniak, W. Olszewski, PWN, Warszawa 1984, s. 614n.

⁹ M. Jammer, *Concept of Mass in Classical and Modern Physics*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1961, s. 26.

¹⁰ Miało to być odpowiedzią na krytykę Arystotelesa, mówiącą, że atomiści nie podali przyczyny ruchu atomów. Por. T. O'Keefe, *Does Epicurus Need the Swerve as an Arché of Collisions?*, „Phronesis” 41(1996) nr 3, s. 315; J. Burnet, *Greek Philosophy. Thales to Plato*, Macmillan & Co. Ltd.–St. Martin's Press, New York–London 1960, s. 96.

znaczy, że w atomizmie Epikura przestrzeń jest nadal jednorodna, ale nie jest już izotropowa, jak to miało miejsce w koncepcji Demokryta¹¹.

W filozofii przyrody teza o istnieniu próżni aż do siedemnastego wieku nie miała zbyt wielu zwolenników. Na niemal dwa tysiące lat, głównie za sprawą Arystotelesa, utrwalił się pogląd zwany horror vacui, wyrażający przekonanie, że natura boi się próżni, zatem przestrzeń bez reszty w sposób ciągły jest wypełniona materią. Renesans koncepcji przestrzeni jako próżni datuje się na okres powstania nowożytnego przyrodoznawstwa. Tezę o istnieniu próżni głosili między innymi Pierre Gassendi i Galileo Galilei, chociaż pierwszych eksperymentalnych dowodów na istnienie próżni dostarczyły dopiero eksperymenty Evangelisty Torricellego z roku 1643, a następnie doświadczenia Blaise'a Pascala z 1647, Ottona von Guericke'a z 1657 oraz Roberta Boyle'a z roku 1660¹².

PRZESTRZEŃ JAKO PLENUM

Arystoteles utrzymywał, że świat jest wieczny, ale przestrzennie skończony. Świat ma kształt kulisty (starożytni uważali, że kula jest najdoskonalszą z brył), posiada więc obiektywnie wyróżniony środek, w którym spoczywa Ziemia, a Słońce, Księżyc, planety i gwiazdy krążą wokół Ziemi. Przestrzeń świata podzielona jest na dwie radykalnie odmienne sfery – podksiężycową i nadksiężycową, które zbudowane są z różnych elementów. W świecie podksiężycowym wszystkie rzeczy zbudowane są z czterech żywiołów – ziemi, wody, powietrza i ognia, świat nadksiężycowy wypełnia natomiast piąty element – eter, z którego zbudowane są sfery unoszące ciała niebieskie. Całość zamyka sfera gwiazd stałych, poza którą nic już nie istnieje.

Struktura przestrzeni w systemie Arystotelesa jest ściśle związana z jego poglądami na ruch. Uznawał on, że naturalnym stanem ciała w świecie podksiężycowym jest spoczynek w naturalnym miejscu. Arystoteles dzielił ruch ciał na naturalny, którego przyczyną jest natura ciała i ruch wymuszony, który wymaga stałego działania „czynnika poruszającego”¹³. W świecie podksiężycowym naturalnym ruchem ciał jest ruch „w dół” (dla ciał ciężkich) lub „w górę” (dla ciał

¹¹ Por. Tytus Lukrecejusz Karus, *O rzeczywistości. Ksiąg sześć*, ks. II, w. 184-215, tłum. A. Krokiewicz, De Agostini Polska, Warszawa 2003, s. 45n.; J a m m e r, *Concepts of Space*, s. 11; zob. D. K o n s t a n, *Epicurus on „Up” and „Down” (Letter to Herodotus § 60)*, „Phronesis” 17(1972) nr 3, s. 269-278.

¹² Boyle ogłosił wyniki swoich doświadczeń w pracy *New Experiments Physico-Mechanical Touching the Spring of the Air and its Effects, Made for the most parts in a New Pneumatical Engine*. Por. A.K. W r ó b l e w s k i, *Historia fizyki od czasów najdawniejszych do współczesności*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006, s. 151.

¹³ A r y s t o t e l e s, *Fizyka*, ks. III, 202 a, s. 67. Por. tamże, s. 67-69.

lekkich). Kierunek „w dół” nie jest w tym systemie konwencjonalny, lecz ma znaczenie obiektywne – prowadzi do centrum sferycznie symetrycznego świata, podobnie kierunek „w górę” prowadzi w stronę najbardziej zewnętrznej sfery ognia. Przestrzeń w świecie podksiężycowym ma zatem charakter anizotropowy – istnieją wyróżnione kierunki „góra–dół” i to właśnie struktura przestrzeni determinuje ruch ciał. Przestrzeń w ujęciu Arystotelesa nie jest również jednorodna, ponieważ istnieje w niej wyróżniony punkt, a mianowicie środek świata. W świecie nadksiężycowym jedynym rodzajem ruchu jest jednostajny ruch po okręgu – pogląd ten był związany z przekonaniem o doskonałości i niezmienności materii niebieskiej (dlatego na przykład meteory traktowano jako zjawiska atmosferyczne)¹⁴. W średniowieczu, po przystosowaniu przez św. Tomasza z Akwinu systemu Arystotelesa do dogmatów religii chrześcijańskiej, takie wyobrażenie przestrzeni świata zyskało sankcję religijną – świat nadksiężycowy utożsamiono z niebem, siedzibą Boga i świętych, a kwestionowanie Arystotelesowskiego wyobrażenia przestrzeni świata, w szczególności zaś wszelkie twierdzenia na temat ruchu Ziemi, istnienia próżni czy „niedoskonałości” materii niebieskiej traktowane były jako kwestionowanie prawd wiary religijnej, co z pewnością nie zachęcało uczonych do formułowania nowych koncepcji przestrzeni. Takie wyobrażenie o przestrzeni świata panowało aż do wieku siedemnastego.

Do odejścia od koncepcji zamkniętego świata i sformułowania nowożytnej koncepcji nieskończonej przestrzeni w znacznym stopniu przyczynił się René Descartes, chociaż i on odrzucał tezę o istnieniu próżni. Kartezjusz twierdził, że jedynym atrybutem materii jest atrybut czysto geometryczny, mianowicie rozciągłość przestrzenna. Materia to *res extensa* (rzecz rozciągła): „Natura materii, czyli ciała rozpatrywanego w ogólności, nie na tym polega, że jest ono jakąś rzeczą twardą czy ciężką, czy barwną, czy w jakiś inny sposób działającą na zmysły, ale tylko na tym, że jest ono rzeczą rozciągłą wzdłuż, wszerz i w głąb”¹⁵. Jedynie bowiem rozciągłość pojmujemy „jasno i wyraźnie” (co zdaniem Kartezjusza stanowi kryterium prawdy) i nie jesteśmy jej w stanie oddzielić od pojęcia materii.

Jakie stąd wynikają konsekwencje odnośnie do pojęcia przestrzeni? Przede wszystkim, jeżeli jedynym atrybutem materii jest rozciągłość, to nie może istnieć przestrzeń jako byt odrębny od ciał materialnych, ponieważ nie może istnieć atrybut rozciągłości bez substancji, której jest atrybutem. Nie może zatem istnieć pusta przestrzeń, czyli próżnia. Pojęcie to stanowi w systemie Kartezjusza *contradictio in adiecto*.

W kartezjańskim obrazie świata mamy z jednej strony do czynienia z „geometryzującą materią” (jedynym atrybutem materii jest atrybut rozciągłości), z drugiej

¹⁴ Por. t e n ż e, *Meteorologika*, ks. I, 342 a, tłum. A. Paciorek, w: tenże, *Dziela wszystkie*, t. 2, s. 448n.

¹⁵ R. D e s c a r t e s, *Zasady filozofii*, tłum. I. Dąbbska, Wydawnictwo Antyk, Kęty 2001, s. 56.

zaś z „materializacją przestrzeni” (nie może istnieć pusta przestrzeń, czyli próżnia). Przestrzeń w sensie geometrycznym jest podzielna w nieskończoność. Wynika stąd, że nie mogą istnieć ostateczne, niepodzielne składniki materii – w istocie Kartezjusz był przeciwnikiem atomizmu, choć przyjmował korpuskularny model materii, pod pewnymi względami podobny do atomizmu¹⁶. Przestrzeń nie posiada granic również w sensie geometrycznym, a zatem w kartezjańskiej filozofii przyrody mamy do czynienia z koncepcją świata nieskończonego przestrzennie¹⁷.

PRZESTRZEŃ ABSOLUTNA

Koncepcja przestrzeni absolutnej została sformułowana przez Isaaca Newtona. W pierwszej księdze *Philosophiae naturalis principia mathematica* (*Matematycznych zasad filozofii przyrody* z roku 1687) wprowadza on rozróżnienie pojęć przestrzeni (i czasu) „absolutnych i względnych, prawdziwych i pozornych, matematycznych i powszechnych”¹⁸. Zdaniem Newtona myślenie o przestrzeni wyłącznie w kategoriach relacji między ciałami nie wyczerpuje treści pojęcia przestrzeni, ponieważ całkowicie niezależnie od tych relacji istnieje przestrzeń absolutna. „Absolutna przestrzeń przez jej własną naturę niezależnie od wszystkiego zewnętrznego pozostaje zawsze ta sama i nieruchoma. Przestrzeń względna jest pewnym ruchomym wymiarem lub miarą przestrzeni absolutnych, którą nasze zmysły odbierają jako położenie w odniesieniu do ciał i która jest potocznie brana za przestrzeń nieruchomą. Taka jest miara przestrzeni podziemnej, powierzchni lub przestrzeni gwiazdnej określona przez jej położenie względem Ziemi. Absolutna i względna przestrzeń są takie same co do kształtu i wielkości, ale nie zawsze są ilościowo tymi samymi”¹⁹. Newton odróżnia również miejsce absolutne i względne oraz

¹⁶ Zob. t e n z e, *Świat albo traktat o świetle*, tłum. T. Śliwiński, Wydawnictwo Aureus, Kraków 2005.

¹⁷ Na temat historii zmian poglądów na naturę przestrzeni, w szczególności zaś przejścia od wyobrażenia skończonej przestrzeni Arystotelesa do koncepcji przestrzeni nieskończonej zob. A. K o y r é, *Od zamkniętego świata do nieskończonego wszechświata*, tłum. O. Kubińska, W. Kubiński, słowo/obraz terytoria, Gdańsk 1998.

¹⁸ I. N e w t o n, *Matematyczne zasady filozofii przyrody*, tłum. J. Wawrzycki, Copernicus Center Press, Kraków 2011, s. 190.

¹⁹ Tamże, s. 191. Cytaty z dzieła Newtona podaję za tłumaczeniem Wawrzyckiego, ponieważ jest to jedyne tłumaczenie całości *Philosophiae naturalis principia mathematica*. Tłumaczenie to wywołało jednak w polskim środowisku filozoficznym liczne kontrowersje co do adekwatności. W szczególności wielu autorów zwraca uwagę, że w cytowanym fragmencie zamiast „ilościowo tymi samymi” powinno być „numerycznie tymi samymi”. W angielskim przekładzie Andrew Motte’a jest „numerically the same”. Por. I. N e w t o n, *Mathematical Principles of Natural Philosophy*, w: „*Mathematical Principles of Natural Philosophy*”. „*Optics*” by Sir Issac Newton, „*Treatise on Light*” by Christiaan Huygens, Encyclopaedia Britannica, Inc., Chicago–London–Toronto 1952, s. 8.

ruch absolutny i względny: „Ruch absolutny jest przesunięciem ciała z jednego miejsca absolutnego do drugiego; ruch względny jest przesunięciem od jednego miejsca względnego do drugiego [względnego]”²⁰.

Przestrzeń mechaniki klasycznej ma strukturę geometrii Euklidesa: jest trójwymiarowa, nieskończona, jednorodna i izotropowa. Trójwymiarowość przestrzeni oznacza oczywiście, że położenie każdego ciała można jednoznacznie określić przez podanie trzech liczb $P(x, y, z)$, będących jego współrzędnymi w pewnym układzie odniesienia. Opisywany przez mechanikę klasyczną ruch jest względny, to znaczy, że aby stwierdzić, czy dane ciało porusza się, czy też nie, należy najpierw wskazać pewien układ odniesienia, względem którego rozpatrujemy ruch. Układem odniesienia w sensie fizycznym jest zawsze jakieś ciało albo układ ciał, natomiast modelem matematycznym może być na przykład kartezjański układ współrzędnych, czyli trzy proste przecinające się pod kątem prostym. Nieskończoność przestrzeni ma ścisły związek z zasadami dynamiki. Zgodnie z pierwszą zasadą dynamiki, zwaną również zasadą bezwładności Galileusza, „każde ciało zachowuje swój stan spoczynku lub ruchu jednostajnego wzdłuż linii prostej, chyba że jest zmuszone do zmiany tego stanu przez przyłożone do niego siły”²¹. W odróżnieniu od dynamiki Arystotelesa, w ujęciu mechaniki klasycznej ruch nie jest procesem wymagającym przyczyny, ale naturalnym *s t a n e m* ciała (Arystoteles za naturalny stan ciała w sferze podksiężycowej uznawał spoczynek w naturalnym miejscu). Aby ciało poruszało się ruchem jednostajnym prostoliniowym, nie jest więc potrzebna żadna „siła poruszająca” – przy braku działania sił (albo gdy działające siły równoważą się) ciało porusza się ze stałą prędkością i ruch ten będzie trwał wiecznie. Jest to oczywiście możliwe jedynie w przypadku, gdy sama przestrzeń jest nieskończona. Jednorodność przestrzeni oznacza, że jej własności metryczne są takie same w każdym miejscu albo, inaczej mówiąc, że jeden punkt przestrzeni nie różni się niczym od drugiego. Izotropowość oznacza zaś, że przestrzeń nie ma wyróżnionego kierunku, czyli że wszystkie kierunki są równoważne. Oczywiście na powierzchni Ziemi mamy do czynienia z wyróżnionym kierunkiem „góra–dół”, jednak ta lokalna anizotropia nie jest własnością samej przestrzeni, ale pozostaje związana z obecnością pola grawitacyjnego. Kierunek „w dół” to kierunek wektora natężenia pola grawitacyjnego. W przestrzeni kosmicznej, daleko od źródeł pól grawitacyjnych²²

²⁰ N e w t o n, *Matematyczne zasady filozofii przyrody*, s. 191.

²¹ Tamże, s. 197.

²² Jest to oczywiście pewna idealizacja, ponieważ wartość siły grawitacji w mechanice Newtona maleje wraz z odległością jak $1/r^2$, co znaczy, że zasięg sił grawitacyjnych jest nieskończony i na dobrą sprawę nigdzie w przestrzeni kosmicznej nie mamy do czynienia z taką sytuacją, że w ogóle nie działają siły grawitacji.

albo na przykład na orbitującej stacji kosmicznej, kierunki „góra–dół” stają się czysto konwencjonalne, podobnie jak kierunki „na prawo” i „na lewo”.

Absolutny charakter przestrzeni oznacza, że jest ona bytem istniejącym całkowicie niezależnie od ciał materialnych. Przeprowadźmy następujący eksperyment myślowy: Wyobraźmy sobie, że z zawartości Wszechświata usuwamy poszczególne ciała aż do ostatniego atomu. Pytamy: co pozostanie, gdy zniknie cała materia? Zgodnie z koncepcją absolutystyczną pozostanie „absolutna, prawdziwa, matematyczna przestrzeń”, ponieważ jej istnienie i własności metryczne całkowicie nie zależą od obecności materii. Po unicestwieniu całej materii pozostałaby nieskończona, trójwymiarowa, jednorodna i izotropowa pusta przestrzeń. W pewnym sensie byłaby ona nawet bytem bardziej pierwotnym niż materia, ponieważ można sobie wyobrazić, że istnieje pusta przestrzeń, całkowicie pozbawiona ciał, nie sposób natomiast nawet wyobrazić sobie ciał istniejących poza przestrzenią. Gdyby natomiast w początkowo pustej przestrzeni umieścić materię, nie zmieniłoby to struktury metrycznej przestrzeni – zarówno w przestrzeni pustej, jak i w przestrzeni wypełnionej materią, suma wewnętrznych kątów trójkąta wynosi 180 stopni, stosunek obwodu okręgu do jego średnicy wynosi dokładnie π , natomiast przez punkt poza prostą można przeprowadzić tylko jedną prostą do niej równoległą. Często wykorzystywana przy tej okazji analogia traktuje przestrzeń mechaniki Newtona jako niezmienną scenę, która istnieje i posiada pewne własności niezależnie od materii, podobnie jak scena w teatrze, która w istocie pozostaje taka sama (jeśli, rzecz jasna, nie liczyć dekoracji), niezależnie od tego, czy aktualnie odbywa się na niej jakiś spektakl, czy też aktorzy już ją opuścili.

Zgodnie z mechaniką klasyczną (z zasadą względności Galileusza) wszystkie inercjalne układy odniesienia są sobie równoważne, co oznacza, że sytuacje „układ spoczywa” i „układ porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym” są sobie całkowicie równoważne i z fizycznego punktu widzenia nierozróżnialne. Nie da się więc rozstrzygnąć, czy dwa zdarzenia, które nastąpiły w różnym czasie, zaszły w tym samym miejscu, czy też w różnych miejscach przestrzeni absolutnej. Wydawałoby się zatem, że fakt ten pozbawia przestrzeń absolutną fizycznego znaczenia, zdaniem Newtona jednak mamy dowody na istnienie przestrzeni absolutnej, a mianowicie występowanie odosiowych sił bezwładności podczas ruchu obrotowego, takich jak w słynnym doświadczeniu z wirującym wiadrem²³. Wiadro napełnione wodą zawieszamy na sznurze i wprawiamy w ruch obrotowy. Początkowo powierzchnia wody pozostaje płaska, jednak po pewnym czasie obserwujemy charakterystyczne wklęsnięcie jej powierzchni (powierzchnia wody przybiera kształt parabo-

²³ Newton opisuje to doświadczenie w pierwszej księdze swojego dzieła. Por. N e w t o n, *Matematyczne zasady filozofii przyrody*, s. 194.

lody obrotowej). „Podnoszenie się poziomu wody w wiadrze pokazuje, że dąży ona do oddalenia się od osi ruchu, i z tej dążności można znaleźć miarę prawdziwego i absolutnego ruchu obrotowego wody”²⁴. Efektu tego nie da się bowiem wyjaśnić w z g l ę d n y m r u c h e m cząsteczek wody względem wiadra – deformacja powierzchni wody pojawia się bowiem zarówno wtedy, gdy woda nie wiruje względem wiadra, jak i wówczas, gdy taki względny ruch występuje – gdy bowiem zatrzymamy wirujące wiadro, woda jeszcze przez jakiś czas będzie wirować, a jej powierzchnia będzie wykazywać charakterystyczne odkształcenie. Inny (tym razem wyłącznie myślowy) eksperyment opisany przez Newtona polega na rozważeniu ruchu dwóch kul połączonych sznurem, obracających się wokół wspólnego środka ciężkości. Zdaniem Newtona, na podstawie pomiaru naprężenia sznura można byłoby stwierdzić, że kule obracają się nawet wówczas, gdyby ruch ten zachodził w próżni, a poza owymi kulami nie istniałyby we Wszechświecie żadne inne ciała²⁵.

Koncepcja absolutnej przestrzeni nie jest wolna od trudności. Przede wszystkim, dlaczego na gruncie mechaniki Newtona przyspieszenie ma charakter absolutny, natomiast tylko względna prędkość ma sens? Dlaczego możemy rozpoznać rzeczywisty ruch przyspieszony, natomiast nie jesteśmy w stanie rozpoznać, czy poruszamy się rzeczywiście (w przestrzeni absolutnej) ruchem jednostajnym, czy też pozostajemy w spoczynku? „Jeżeli przestrzeń absolutna rzeczywiście istnieje, powinna być punktem odniesienia dla wszystkich ruchów, nie tylko dla ruchu przyspieszonego. Jeżeli przestrzeń absolutna rzeczywiście istnieje, dlaczego nie dostarcza ona sposobu na stwierdzenie, gdzie się znajdujemy?”²⁶.

PRZESTRZEŃ RELACYJNA

Twórcą relacyjnej (albo relacjonistycznej) koncepcji przestrzeni był Gottfried Wilhelm Leibniz. Rozważmy raz jeszcze eksperyment myślowy, w którym z wartości Wszechświata usuwamy całą materię i stawiamy pytanie: co pozostaje? Wedle poglądu relacjonistycznego, gdyby zniknęła cała materia, nie pozostałoby absolutnie nic. Przestrzeń nie jest bowiem realnością fizyczną istniejącą niezależnie od materii, a jedynie systemem relacji między ciałami materialnymi i jeśli nie ma ciał, to nie ma sensu mówić o relacjach między nimi. Leibniz pisze, że uznaje „przestrzeń za coś czysto względnego, podobnie jak czas, mianowicie za porządek współlistnienia rzeczy, podczas gdy czas stanowi porządek ich następstwa.

²⁴ Tamże.

²⁵ Por. tamże, s. 195.

²⁶ B. Greene, *Struktura kosmosu. Przestrzeń, czas i struktura rzeczywistości*, tłum. E.L. Łokas, B. Bieniok, Prószyński i S-ka, Warszawa 2005, s. 45.

Albowiem przestrzeń oznacza z punktu widzenia możliwości porządek rzeczy istniejących równocześnie, jako istniejących razem, abstrahując od szczegółowego sposobu istnienia każdej z nich z osobna²⁷. Mówiąc o „przestrzeni”, mówimy po prostu o rzeczach, ich rozmiarach przestrzennych, wzajemnym położeniu i odległościach (słowem – o relacjach przestrzennych między ciałami), nie zaś o czymś, co istniałoby niezależnie od rzeczy i na równi z nimi.

Leibniz przeprowadził krytykę koncepcji przestrzeni absolutnej na podstawie sformułowanej przez siebie zasady racji dostatecznej, zgodnie z którą nic nie dzieje się bez racji, dlatego jest takie, a nie inne. Pisał: „Przestrzeń jest czymś absolutnie jednorodnym i gdy brak rzeczy w niej umieszczonych, jeden punkt przestrzeni nie różni się absolutnie niczym od drugiego. Otóż przy założeniu, że przestrzeń sama w sobie jest czymś odmiennym od porządku, w jakim pozostają ciała względem siebie, okazuje się, że niemożliwe jest, aby istniała racja, dla jakiej Bóg, zachowując te same położenia ciał względem siebie, umieścił je w przestrzeni właśnie tak, a nie inaczej, i dla jakiej nie ułożył wszystkiego na opak, zastępując (na przykład) zachód wschodem²⁸. Podobnie, jeśli przestrzeń jest jednorodna, nie ma racji dostatecznej dla tego, że świat znajduje się w tym a nie w innym miejscu przestrzeni absolutnej (czy też, że Bóg stworzył świat w tym, a nie w innym miejscu), ponieważ sytuacje takie byłyby całkowicie nierozróżnialne. Leibniz twierdzi więc, że „przestrzeń nie jest niczym innym, jak tym porządkiem czy związkiem, i bez ciał jest niczym innym, jak tylko możliwością ich umieszczenia w niej²⁹”.

Stanowisko to różni się jednak od Kartezjańskiego utożsamienia materii z przestrzenią. „Nie twierdzą – pisze Leibniz – że materia i przestrzeń są tym samym; powiadam tylko, że nie ma przestrzeni tam, gdzie nie ma materii, i że przestrzeń sama w sobie nie jest rzeczywistością absolutną. Przestrzeń i materia różnią się między sobą tak, jak czas i ruch. Rzeczy te, chociaż różne, są jednakże nierozdzielne³⁰. Przestrzeń jest bowiem jedynie porządkiem położenia ciał; nasz umysł dochodzi do abstrakcyjnego pojęcia przestrzeni na podstawie analizy relacji, w jakich jedne ciała znajdują się w stosunku do drugich, i wcale nie potrzebuje jakiegoś absolutnego i rzeczywistego bytu, który by poza umysłem przestrzeni odpowiadał³¹”.

Koncepcja przestrzeni absolutnej spotkała się również z krytyką George’a Berkeleya, twórcy idealizmu subiektywnego. Jego zdaniem znaczenie terminu

²⁷ G.W. L e i b n i z, *Polemika z S. Clarke’iem. Trzecie pismo Leibniza*, tłum. S. Cichowicz, H. Krzeczowski, w: tenże, „Wyznanie wiary filozofa”. „Rozprawa metafizyczna”. „*Monadologia*”. „*Zasady natury i łaski*” oraz *inne pisma filozoficzne*, tłum. S. Cichowicz i in., PWN, Warszawa 1969, s. 336.

²⁸ Tamże.

²⁹ Tamże.

³⁰ Tamże, s. 394.

³¹ Por. tamże, s. 407.

„istnieć” w odniesieniu do przedmiotów niemyślących pokrywa się ze znaczeniem terminu „być postrzeganym”, a zatem absolutna przestrzeń, jako niepostrzegana, istnieć nie może. Pojęcie przestrzeni musi być bezwarunkowo związane z pojęciem ciała i ruchu. „Kiedy poruszam jakąś częścią mojego ciała – pisze Berkeley – to jeśli ten ruch jest swobodny i nie czuję oporu, wówczas mówię, że mam do czynienia z przestrzenią, ale jeśli napotykam opór, wtedy powiadam, że mam do czynienia z innym ciałem i zależnie od tego, czy ten opór jest mniejszy czy większy, powiadam, że ta przestrzeń jest mniej lub bardziej czysta. Zatem kiedy mówię o czystej czy pustej przestrzeni, nie należy przypuszczać, jakoby termin «przestrzeń» reprezentował ideę niezależną od idei ciała czy ruchu albo dającą się bez nich pojąć, nawet jeśli istotnie mamy skłonność brać każdy rzeczownik za reprezentujący jakąś odrębną ideę, którą można oddzielić od wszystkich innych, co było powodem niezliczonych błędów. Gdybym więc założył, że cały świat, wyjąwszy moje własne ciało, został unicestwiony, i stwierdził, że pozostaje jeszcze czysta przestrzeń, to nie miałbym na myśli niczego innego, jak tylko to, że wydaje mi się możliwe, aby członki mojego ciała poruszały się swobodnie bez jakiegokolwiek oporu, ale gdyby moje ciało również zostało unicestwione, wówczas nie byłoby żadnego ruchu, a zatem i przestrzeni”³². Jest to niewątpliwie pogląd sytuujący się w ramach relacjonizmu: zdaniem Berkeley’ a, „myśląc o ruchu, musimy sobie koniecznie przedstawić przynajmniej dwa ciała, których odległość, czyli położenie względem siebie, ulega zmianie. Zatem, gdyby istniało tylko jedno ciało, nie mogłoby się poruszać, co wydaje się oczywiste, zważywszy, że idea ruchu zawiera w sobie koniecznie ideę relacji”³³.

Berkeley poddał również interesującej krytyce argumentację Newtona na rzecz istnienia przestrzeni absolutnej na podstawie doświadczenia z wirującym wiadrem³⁴. Zauważa on, że ruchu obrotowego wody „nie można nazwać ruchem rzeczywiście obrotowym, skoro jest on w dziwny sposób złożony z ruchów nie tylko naczynia [...], lecz również z dziennego ruchu Ziemi dookoła osi, miesięcznego ruchu Ziemi i Księżyca na około wspólnego środka ciężkości i rocznego ruchu Ziemi na około Słońca; i z tego powodu każda cząstka [...] wody zakreśla linię stanowczo różniącą się od kołistej. Również nie istnieje dążność odosiowa, w którą można by uwierzyć, ponieważ nie odnosi się do jakiejś osi w przestrzeni absolutnej”³⁵. W istocie Newton, analizując wirujące

³² G. Berkeley, *Traktat o zasadach ludzkiego poznania, w którym poddano badaniu główne przyczyny błędów i trudności w różnych dziedzinach wiedzy oraz podstawy sceptycyzmu, ateizmu i niewiary*, tłum. J. Salamon SJ, Wydawnictwo Zielona Sowa, Kraków 2004, s. 71n.

³³ Tamże, s. 70.

³⁴ Por. Łukasik, dz. cyt., s. 193-195.

³⁵ G. Berkeley, *De motu sive de motus principio et natura et causa communicationis motum*, bez nazwiska tłumacza, w: S. Sarnowski, *Berkeley. Zdrowy rozsądek i idealizm*, Klub Otrycki–Colloquia Communia–Wydział Propagandy RN ZSP, Warszawa 1988, s. 105n.

wiadro, całkowicie pomija ruch Ziemi i twierdzi, że oś wokół której wiruje woda, odnosi się do jakiegoś ustalonego kierunku w samej przestrzeni absolutnej. Berkeley argumentuje, że jest to niedopuszczalne uproszczenie ze względu na ruch Ziemi. Pojęcie przestrzeni absolutnej jest więc czystą fikcją, a pojęcie przestrzeni ma sens tylko wówczas, gdy jest łączone z pojęciem ciała i ruchu.

Newton, rozważając ruch dwóch kul połączonych sznurem, twierdził, że nawet wówczas, gdyby ruch ten odbywał się w absolutnie pustej przestrzeni (to znaczy, gdyby owe dwie kule stanowiły całą zawartość Wszechświata), występowałoby naprężenie sznura pozwalające stwierdzić, że mamy do czynienia z ruchem absolutnym. Uogólnił zatem rezultaty doświadczeń wykonywanych w laboratorium na Ziemi na bardzo ekstremalny przypadek, gdy doświadczenie takie realizowane byłoby w całkowicie pustym Wszechświecie (jeśli, rzecz jasna, nie liczyć owych kul). Podobnie miałyby się przedstawiać doświadczenie z wiadrem.

Ernst Mach twierdził jednak, że generalizacja taka nie jest uzasadniona – wszelki ruch, w tym oczywiście i ruch wirowy, jest względny. Znaczący to, że gdyby nie było jakiegokolwiek punktu odniesienia (jakiegokolwiek innego ciała we Wszechświecie), w ogóle nie byłoby nawet sensu mówić o wirowaniu kul (lub wiadra) ani też o jakimkolwiek ruchu. „Woda wiruje nie tylko w stosunku do wiadra, ale również w stosunku do odległych mas, które mogą być uważane za przyczynę sił odosiowych”³⁶. Rozważmy teraz przypadek, w którym we Wszechświecie znajduje się niewielka liczba gwiazd. Wówczas można byłoby znaleźć punkt odniesienia dla ruchu wirowego, naprężenie sznura między wirującymi kulami byłoby niewielkie, a przy wzroście liczby gwiazd do takiej, jaką zawiera nasz Wszechświat, okazałoby się ono zgodne z przewidywaniami Newtona. Kluczowym momentem jest zatem pogląd na to, czym jest masa (i bezwładność). Według Newtona masa jest absolutną (wewnętrzną) własnością ciał, miarą „ilości materii” – ciało posiada określoną masę całkowicie niezależnie od tego, czy we Wszechświecie znajdują się inne ciała, czy też nie³⁷. Zgodnie z poglądem Macha (zwanym obecnie zasadą Macha), źródłem bezwładności ciał (a więc i masy) jest oddziaływanie grawitacyjne z całym Wszechświatem – „materia znajdująca się we Wszechświecie wyznacza lokalnie spoczywający układ odniesienia”³⁸. Według Macha, opisane przez New-

³⁶ H. Reichenbach, *The Philosophy of Space & Time*, tłum. M. Reichenbach, J. Freund, Dover Publications, New York 1957, s. 214.

³⁷ Jak wiemy z teorii względności, masa ciała zależy od jego prędkości:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

gdzie m_0 jest masą spoczynkową, to znaczy masą, jaką posiada obiekt w układzie odniesienia, w którym spoczywa, v – prędkością ciała, c – prędkością światła w próżni. Gdy prędkość poruszającego się ciała zbliża się do prędkości światła, jego masa rośnie do nieskończoności, dlatego też żadne ciało nie może zostać przyspieszone do prędkości równej prędkości światła w próżni.

³⁸ M. Tępczyk, *Ontologia świata przyrody*, Universitas, Kraków 2005, s. 33.

tona efekty nie są rezultatem ruchu względem przestrzeni absolutnej, ale efektem ruchu względem innych ciał, a samo pojęcie przestrzeni absolutnej jest zbędne³⁹.

Pomimo trudności tkwiących w pojęciu przestrzeni absolutnej koncepcja ta panowała w fizyce przez ponad dwieście lat, chociaż wiadomo było, że w mechanice można się ograniczyć do badania ruchów względnych. Niewątpliwie jednym z powodów tego faktu pozostawało to, że aż do dziewiętnastego wieku brak było odpowiednich narzędzi matematycznych i dopiero powstanie geometrii różniczkowej umożliwiło opis lokalnych własności przestrzeni, zmieniających się przy przejściu z jednego obszaru do drugiego.

PRZESTRZEŃ JAKO APRIORYCZNA FORMA ZMYSŁOWOŚCI

Immanuel Kant sformułował koncepcję przestrzeni, zgodnie z którą jest ona aprioryczną formą zmysłowości, czyli po prostu sposobem, w jaki człowiek postrzega świat. „Cóż to więc jest przestrzeń i czas? – pyta Kant w *Krytyce czystego rozumu* – Czy to coś rzeczywiście istniejącego? [...] Czy też to są wprawdzie tylko określenia lub stosunki między rzeczami, takie jednak, jakie by przysługiwały także im samym w sobie, gdyby nawet nie były naocznie oglądane, czy też są one takimi określeniami, które przywiązane są do samej tylko formy naoczności, a tym samym i do podmiotowych właściwości naszego umysłu, bez których nie można by tych określeń przypisać żadnej rzeczy?”⁴⁰. Kant argumentuje, że przestrzeń „nie jest pojęciem empirycznym, które by zostało wysnute z doświadczeń zewnętrznych”⁴¹. Aby w ogóle jakies wrażenia można było odnieść do czegoś zewnętrznego w stosunku do mnie (tzn. do podmiotu poznającego), już uprzednio muszę dysponować wyobrażeniem „czegoś zewnętrznego”, czyli czegoś znajdującego się w innym miejscu niż ja, a zatem właśnie wyobrażeniem przestrzeni. Zewnętrzne doświadczenie staje się więc dopiero wówczas możliwe, gdy mam już wyobrażenie przestrzeni. Wyobrażenie przestrzeni nie może więc pochodzić z doświadczenia, lecz musi je poprzedzać. „Przestrzeń jest koniecznym wyobrażeniem a priori leżącym u podłoża wszelkich zewnętrznych danych naocznych”⁴². Kant stwierdza, że choć można sobie wyobrazić, iż nie ma ciał w przestrzeni, nie sposób jednak wyobrazić sobie, że nie ma przestrzeni. Jest ona zatem warunkiem możliwości zjawisk. „Przestrzeń nie jest pojęciem dyskursywnym [...], lecz [...] czystą na-

³⁹ Por. E. M a c h, *The Science of Mechanics*, The Open Court Publishing Co, La Salle, Illinois–London 1942, s. 271n.

⁴⁰ I. K a n t, *Krytyka czystego rozumu*, A 23, B 37-38, tłum. R. Ingarden, PWN, Warszawa 1986, t. 1, s. 98.

⁴¹ Tamże, A 23, B 38, s. 98.

⁴² Tamże, A 24, B 38, s. 99.

ocznością⁴³. Jest formą, w jakiej człowiek postrzega świat. Inaczej mówiąc, jest ona formą zmysłów zewnętrznych, podmiotowym warunkiem zmysłowości i nie przedstawia żadnych własności jakichkolwiek rzeczy samych w sobie. „O przestrzeni, o istotach rozciągłych itd. możemy przeto mówić tylko ze stanowiska człowieka⁴⁴. Kant stwierdza, że nie mamy żadnych podstaw do twierdzenia, jakoby inne istoty myślące również musiałyby postrzegać świat w formach przestrzennych właściwych człowiekowi, chociaż nam formy te przedstawiają się jako powszechnie ważne. „Stwierdzamy zatem empiryczną realność przestrzeni (w odniesieniu do wszelkiego możliwego zewnętrznego doświadczenia), jakkolwiek zarazem przyjmujemy jej transcendentálną idealność, tj. to, że jest ona niczym, skoro tylko opuścimy warunek możliwości wszelkiego doświadczenia i uznajemy ją za coś, co znajduje się u podłoża rzeczy samych w sobie⁴⁵. Jeżeli zatem przestrzeń (i czas) są formami, w których ujmujemy doświadczenie, to oczywiście wszystkie zjawiska stosują się do nich. Są to formy podmiotowe, a umysł może sam z siebie dochodzić do twierdzeń dotyczących tych form; twierdzenia te zaś mają charakter sądów syntetycznych a priori (jak twierdzenia geometrii Euklidesa). Sądy te są konieczne i powszechnie ważne, choć dotyczą jedynie zjawisk, niezależnie od tego, jakie byłyby rzeczy same w sobie. Na tym polega „apodyktyczna konieczność” sądów geometrii, a pośrednio również „czystego”, czyli matematycznego przyrodoznawstwa. Kantowski pogląd na status przestrzeni prowadzi do fenomenalizmu: przestrzenny (i czasowy) świat przyrody, który zdrowy rozsądek uznaje za rzeczywistość istniejącą niezależnie od podmiotu poznającego, okazuje się konstrukcją tego podmiotu.

Analizując Kantowski pogląd na status przestrzeni i czasu, nie można zapominać, że filozofia Kanta jest w znacznie mierze filozofią fizyki Newtona. Podstawowego założenia dostarcza jej przekonanie, że ścisła nauka o przyrodzie jest niewątpliwym faktem, co z kolei sprawia, że pojawia się pytanie: „Jak możliwa jest fizyka?”. Niezwykła efektywność mechaniki Newtona stała się powodem przekonania, że odkryto wreszcie „prawdziwe prawa przyrody”. Zdaniem Kanta miały one charakter sądów syntetycznych a priori, a ich prawdziwość gwarantowała interpretacja geometrii Euklidesa jako systemu zdań o świecie doświadczenia, których prawdziwość jednak jest od doświadczenia niezależna. W czasach Kanta interpretacja taka mogła wydawać się uzasadniona. Wszak od starożytności poczynając, aż do dziewiętnastego wieku geometria Euklidesa była jedynym znanym systemem geometrii. Precyzja jej pojęć i pewność dowodów budziły powszechny podziw filozofów, nic więc dziwnego, że w rezultacie uznano ją za jedyny możliwy system geometrii. Jednak z chwilą sformuło-

⁴³ Tamże, A 24, B 39, s. 100.

⁴⁴ Tamże, A 26, B42, s. 103.

⁴⁵ Tamże, A 28, B44, s. 104n.

wania nieeuklidesowych systemów geometrii (przez Friedricha Gaussa, Geорга Riemanna, Mikołaja Łobaczewskiego i Johanna Bolyaia) sytuacja uległa istotnej zmianie. Jeżeli zatem jest wiele niesprzecznych i różnych systemów geometrii, to która z nich jest prawdziwa? Która opisuje własności rzeczywistej przestrzeni? Upada twierdzenie Kanta, że geometria Euklidesa jest jedyną możliwą, jaką człowiek może stworzyć, upada zatem twierdzenie, że własności przestrzeni znane są umysłowi ludzkiemu niezależnie od doświadczenia. Jedynie „empiryczne badanie przestrzeni ujawnia, jaka geometria najlepiej ją opisuje”⁴⁶.

Od momentu pojawienia się Kantowskiej teorii przestrzeni i czasu kwestią sporną było, czy aprioryczne formy zmysłowości należy rozumieć w sposób logiczny, czy psychologiczny. Innymi słowy, pytano, czy są to formy zależne od budowy naszego umysłu, czy są wrodzone i czy mogłyby być inne, gdyby nasz umysł zbudowany był inaczej, czy też są to formy, jakie musi przyjąć stosunek jakiegokolwiek podmiotu poznającego do przedmiotu poznania. Interpretację psychologiczną można powiązać z teorią ewolucji. Interpretację taką przedstawił na przykład Konrad Lorenz, współtwórca współczesnej etologii porównawczej – nauki o zachowaniu się zwierząt i ludzi.

Według Lorenza w filogenezie dokonuje się adaptacja gatunków, która polega na swoistym „odciskaniu się” w strukturach organizmów cech otoczenia użytecznych dla gatunku, czyli takich, które służą jego przetrwaniu⁴⁷. Sposób, w jaki człowiek postrzega świat, jest rezultatem ewolucji biologicznej: „Myślenie pojęciowe człowieka powstało w wyniku integracji wielu istniejących już przedtem osiągnięć poznawczych. Spośród nich na pierwszym miejscu trzeba wymienić zdolność do wyobrażeń przestrzennych. Formy oglądu przestrzeni i czasu [...] w rzeczywistości są tylko jedną formą, a mianowicie formą oglądu ruchu w przestrzeni i czasie”⁴⁸. Ludzkie formy myślenia i percepcji, z Kantowskimi apriorycznymi formami zmysłowości i transcendentálnymi kategoriami intelektu są rezultatem filogenetycznego rozwoju i są przekazywane genetycznie. Są zatem biologicznymi formami apriorycznymi ludzkiego obrazu świata, które wynikają ostatecznie z ewolucyjnie nabytej organizacji zmysłowo-nerwowej gatunku *homo sapiens*⁴⁹. Filozoficzna koncepcja Kanta zostaje zatem – według Lorenza – wchłonięta przez nauki przyrodnicze: biologia, korzystając z teorii ewolucji Darwina, może więc wyjaśnić genezę opisanych przez Kanta form i kategorii.

⁴⁶ R. C a r n a p, *Wprowadzenie do filozofii nauki*, tłum. A. Koterski, Aletheia, Warszawa 2000, s. 137.

⁴⁷ Zob. K. L o r e n z, *Odwrotna strona zwierciadła*, tłum. K. Wolicki, PIW, Warszawa 1977.

⁴⁸ T e n z e, *Regres człowieczeństwa*, tłum. A. D. Tauszyńska, PIW, Warszawa 1986, s. 46.

⁴⁹ Por. K. S z e w c z y k, *Lorenz Konrad: Rückseite des Spiegels*, w: *Przewodnik po literaturze filozoficznej XX wieku*, red. B. Skarga, t. 1, PWN, Warszawa 1994, s. 283.

CZASOPRZESTRZEŃ

Niezależnie od tego, czy przestrzeń (i czas) traktowano jako rzeczywisty byt, system relacji między rzeczami, czy też jako sposób, w jaki człowiek postrzega świat, aż do sformułowania przez Alberta Einsteina szczególnej teorii względności w roku 1905 o przestrzeni i czasie myślano jako o całkowicie różnych i niezależnych od siebie obiektach. Doświadczenie potoczne rzeczywistość wskazuje na istotne różnice między przestrzenią a czasem – można na przykład w dość szerokim zakresie podróżować w przestrzeni, nie można natomiast podróżować w czasie, nie można cofnąć się w czasie do chwil minionych. Wydaje się ponadto, że przestrzeń „istnieje po prostu”, natomiast w odniesieniu do czasu sądzimy, że przeszłe chwile już nie istnieją, przyszłe natomiast jeszcze nie istnieją. Słowem – w potocznym doświadczeniu różnica między czasem a przestrzenią wydaje się oczywista, a stwierdzenia typu „kopałem rów od płotu do wpół do czwartej” robią wrażenie absurdalnych. Nic zatem dziwnego, że publikacja teorii względności wywołała wielką rewolucję pojęciową w pojmowaniu przestrzeni (i czasu). Dla niniejszych rozważań najistotniejszym rezultatem teorii względności jest połączenie czasu i przestrzeni w jeden ogólniejszy byt – czterowymiarową czasoprzestrzeń.

Podstawą szczególnej teorii względności są dwa postulaty: „1) stałość prędkości światła, 2) niezależność praw fizyki (w szczególności prawa stałej prędkości światła) od wyboru układu inercjalnego”⁵⁰. Właściwie wszystkie rewolucyjne rezultaty teorii względności stanowią konsekwencje tych postulatów.

Przestrzeń jest względna – odległości przestrzenne (a także wymiary ciał) zależą od stanu ruchu układu odniesienia. Zgodnie z fizyką klasyczną, jeżeli jakiś przedmiot ma długość, powiedzmy, jednego metra, to pomiar tejże długości nie zależy od tego, czy przedmiot ten spoczywa, czy też znajduje się w ruchu. Tak jednak nie jest według teorii względności – jeśli wykonam pomiar długości przedmiotu poruszającego się względem mnie z prędkością v , to otrzymam inny wynik, niż w przypadku przedmiotu spoczywającego. Mówiąc popularnie (i niezbyt precyzyjnie), ciała w ruchu ulegają skróceniu (efekt ten nosi nazwę kontrakcji

⁵⁰ A. E i n s t e i n, *Zapiski autobiograficzne*, tłum. J. Bieroń, Znak, Kraków 1996, s. 35. Prędkość światła w próżni c wynosi ok. 300 000 km/s i jest jednocześnie maksymalną prędkością, z jaką mogą rozchodzić się jakiegokolwiek oddziaływania. Zauważmy, że prędkość światła jest wprawdzie bardzo duża w porównaniu z prędkościami, do jakich jesteśmy przyzwyczajeni w codziennym doświadczeniu (a nawet w stosunku do prędkości uzyskiwanych przez współczesne sondy kosmiczne), ale nie jest nieskończenie wielka. Na przykład dystans Księżyc–Ziemia promień światła pokonuje w ciągu około jednej sekundy, światło od Słońca do Ziemi dociera w czasie około ośmiu minut dwudziestu jeden sekund, natomiast światło od najbliższej nam (poza Słońcem) gwiazdy potrzebuje już około czterech lat, aby dotrzeć do Ziemi. Zgodnie z teorią względności żaden obiekt o niezerowej masie spoczynkowej nie może osiągnąć prędkości światła, a tym bardziej jej przekroczyć.

Fitzgeralda–Lorentza). Niech l_0 oznacza długość ciała w spoczynku, natomiast l – długość ciała poruszającego się względem mnie z prędkością v . Wówczas:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

gdzie c jest prędkością światła w próżni.

Łatwo zauważyć, że relatywistyczne skrócenie jest tym większe, im szybciej porusza się dane ciało.

Podobnie czas jest względny – tempo upływu czasu zależy od stanu ruchu układu odniesienia. Efekt ten nazywamy dylatacją czasu. Niech Δt_0 oznacza interwał czasu w układzie odniesienia, w którym zegar spoczywa, Δt – interwał czasu mierzony w układzie poruszającym się. Wówczas:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Oznacza to, że czas w poruszającym się układzie płynie wolniej. Analogicznie do poprzedniej sytuacji – im szybciej porusza się zegar, tym bardziej się on późni (oczywiście w stosunku do zegara pozostawionego w układzie odniesienia umownie określanego mianem spoczywającego). Podkreślić należy, że omawiana względność czasu nie ma nic wspólnego z jego psychologicznym poczuciem. Jest to efekt czysto fizyczny, obiektywnie mierzalny, a ponadto efekt ten zupełnie nie zależy od tego, w jaki sposób zbudowany jest zegar, za pomocą którego dokonujemy pomiarów. Mówiąc zaś o przestrzeni i czasie na gruncie teorii względności, nie wypowiadamy żadnych twierdzeń na temat natury przestrzeni i czasu, lecz mówimy po prostu o odległościach przestrzennych i czasowych, czyli o tym, co można zmierzyć⁵¹.

Kolejnym efektem teorii względności dotyczącym względności czasu jest względność równoczesności zdarzeń. Fizyka Newtonowska nie nakłada żadnych ograniczeń na prędkość rozchodzenia się sygnałów, dlatego można w jej ramach mówić o absolutnej równoczesności zdarzeń. Tak jednak już nie jest z punktu widzenia teorii względności – równoczesność zdarzeń zależy od układu odniesienia, ponieważ żaden sygnał nie może się rozchodzić szybciej niż światło. Oznacza to, że dwa zdarzenia, powiedzmy A i B , które są równoczesne z punktu widzenia układu odniesienia U (sygnały świetlne wyemitowane z A i B docierają do U w tym

⁵¹ Por. N.D. Mermin, *Czas na czas. Klucz do teorii Einsteina*, tłum. J. Przystawa, Prószyński i S-ka, Warszawa 2008, s. 80.

samym czasie), nie są już równoczesne z punktu widzenia układu odniesienia U' poruszającego się względem U (albo od niego odległego przestrzennie).

Efekty te zostały obecnie dobrze potwierdzone empirycznie⁵². Jakie wynikają z nich konsekwencje dla pojmowania przestrzeni? Należy od razu dodać – dla pojmowania przestrzeni i czasu, ponieważ na gruncie współczesnej fizyki w ogóle trudno mówić o samej przestrzeni w całkowitym oderwaniu od czasu. Otóż teoria względności odrzuca pojęcia absolutnej przestrzeni i absolutnego czasu, zastępując je szerszym pojęciem czterowymiarowej czasoprzestrzeni, zwanej czasoprzestrzenią Minkowskiego. Stanowi ona połączenie trzech wymiarów przestrzennych i wymiaru czasowego. Elementami czasoprzestrzeni są zdarzenia $Z(x, y, z, t)$, z których każde indeksowane jest przez cztery liczby – współrzędne przestrzenne i czas. Względność czasu i względność przestrzeni sugeruje więc, że ani czas, ani przestrzeń wzięte z osobna nie zasługują na miano obiektywnej rzeczywistości fizycznej. Rzecz tę w wykładzie *Czas i przestrzeń*, wygłoszonym w roku 1908, ujął Hermann Minkowski, który nadał szczególnej teorii względności elegancką postać matematyczną: „Poglądy na temat czasu i przestrzeni, które chcę państwu przedstawić, wyrosły na glebie fizyki doświadczalnej i w tym kryje się ich siła. Są to poglądy radykalne. Od tej pory czas i przestrzeń rozważane każde oddzielnie są skazane na odejście w cień, a przetrwa tylko połączenie tych dwóch wielkości”⁵³. Wprawdzie trudno nam sobie wyobrazić cztery proste przecinające się pod kątem prostym i dlatego w geometrycznych ilustracjach czasoprzestrzeni upraszczamy zwykle rozważania do trzech albo dwóch wymiarów, to jednak matematyka szczególnej teorii względności (w odróżnieniu od matematyki ogólnej teorii względności) jest raczej prosta. Co więcej, choć samo pojęcie czasoprzestrzeni może wyda-

⁵² Najbardziej znanym potwierdzeniem efektów kontrakcji i dylatacji przewidywanych przez szczególną teorię względności jest obserwacja mionów na powierzchni Ziemi. Miony μ są cząstkami elementarnymi podobnymi do elektronów, ale o około dwustukrotnie większej masie i nietrwałymi. Powstają one między innymi w górnych warstwach atmosfery (na wysokości około dziesięciu kilometrów) w rezultacie zderzeń cząstek promieniowania kosmicznego z cząstkami atmosfery. Czas życia mionu $t_\mu = 2,2 \times 10^{-6}$ s (jest to czas własny, czyli czas mierzony w układzie spoczynkowym mionu). Gdyby założyć, że miony poruszają się w kierunku powierzchni ziemi nawet z prędkością bliską prędkości światła w próżni ($c = 300\,000$ km/s), to łatwo policzyć, że mion mógłby przebyć odległość co najwyżej około sześciuset metrów do czasu rozpadu (na elektron i antyneutrino elektronowe) i na powierzchnię Ziemi nie powinien dotrzeć. Do powierzchni Ziemi dociera jednak bardzo duża liczba mionów, co doskonale wyjaśnia teoria względności. Otóż z układu odniesienia związanego z Ziemią czas życia mionu wynosi $1,5 \times 10^{-5}$ s i jest wystarczający, by mion pokonał dystans około dziesięciu kilometrów (czas życia mionu w układzie odniesienia Ziemi wydłuża się około piętnastu razy – jest to efekt dylatacji czasu). Natomiast z układu odniesienia mionu jego czas życia wprawdzie wynosi $t_\mu = 2,2 \times 10^{-6}$ s, ale skraca się odległość, jaką ma on do pokonania do powierzchni Ziemi, i wynosi ona około sześciuset metrów (jest to efekt kontrakcji).

⁵³ H. M i n k o w s k i, *Czas i przestrzeń*, cyt. za: A. Pais, *Pan Bóg jest wyrafinowany... Nauka i życie Alberta Einsteina*, tłum. P. Amsterdamski, Prószyński i S-ka, Warszawa 2001, s. 159.

wać się dość trudne, to jednak po chwili refleksji można stwierdzić, że jest ono nawet bliższe naszemu potocznemu doświadczeniu niż pojęcie absolutnego czasu i absolutnej przestrzeni (czy też po prostu oznacza ono posługiwanie się pojęciami czasu i przestrzeni osobno). Jeżeli na przykład umawiam się ze studentami na wykład, powiedzmy na poniedziałek o godzinie dziesiątej w budynku Instytutu Filozofii UMCS, to podaję zarówno współrzędne czasowe, jak i przestrzenne owego zdarzenia $Z(x, y, z, t)$. Jeśli przyjdą o piątej rano, to nie spotkamy się, jeśli przyjdą o dziesiątej, ale w inne miejsce – wykład również się nie odbędzie. Wszelkie zdarzenia zachodzą zatem w czasoprzestrzeni, odbywa się w niej także ruch. Jeżeli w pewnym układzie U odniesienia jakiegoś ciała spoczywa, to „porusza się” tylko w czasie, z perspektywy układu U' poruszającego się względem niego „część ruchu” odbywa w przestrzeni. Stąd względność pomiarów odcinków czasowych i interwałów przestrzennych.

Wprawdzie szczególna teoria względności wyeliminowała z fizycznego obrazu świata pojęcie absolutnej przestrzeni (i absolutnego czasu), jednak fizyka Newtona pozostaje nadal poprawnym opisem zjawisk w przypadkach, gdy rozważane prędkości są dużo mniejsze niż prędkość światła w próżni, a ponadto dla małych prędkości niemal wszystkie⁵⁴ równania fizyki relatywistycznej pokrywają się z równaniami fizyki Newtona (zachodzi korespondencja między tymi teoriami). Świadczy to na rzecz tezy, że pojęcie przestrzeni absolutnej Newtona było raczej koncepcją filozoficzną niż fizyczną, niezwiązaną integralnie ze strukturą mechaniki.

Podobnie jak w geometrii Euklidesa definiuje się odległość między punktami, tak w geometrii Minkowskiego zdefiniowana zostaje odległość między zdarzeniami, zwana interwałem czasoprzestrzennym:

$$ds^2 = dc^2t^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2.$$

Interwał czasoprzestrzenny jest niezmienniczy względem transformacji układu współrzędnych (w teorii względności transformację Galileusza zastępuje nieco bardziej skomplikowana matematycznie transformacja Lorentza), co można interpretować w ten sposób, że chociaż na gruncie szczególnej teorii względności przestrzeń jest względna i czas jest względny, to jednak czasoprzestrzeń jest absolutna. Jak pisał Einstein: „Podobnie jak z punktu widzenia mechaniki newtonowskiej, można wypowiedzieć dwa zgodne twierdzenia: tempus est absolutum, spatium est absolutum, z punktu widzenia szczególnej teorii względności musimy stwierdzić: continuum spatii et temporis est absolutum. W tym ostatnim twierdzeniu absolutum oznacza nie tylko «fizycznie rzeczywiste», ale również «niezależne pod względem własności fizycznych, oddziałujące fizycznie, ale nie podlegające wpływom warunków fizyczny-

⁵⁴ Nie dotyczy to jednak na przykład wzoru na energię ciała.

ch»⁵⁵. W związku z powyższym szczególnej teorii względności nie można uznać za pełną realizację Leibniza koncepcji przestrzeni relacyjnej. Metryka czasoprzestrzeni Minkowskiego jest całkowicie niezależna od obecności materii. Ściślej powiązanie pojęć przestrzeni (właściwie czasoprzestrzeni) i materii następuje dopiero w ogólnej teorii względności.

Ogólna teoria względności to Einsteina teoria grawitacji ogłoszona w roku 1916. W fizyce Newtona opisujemy oddziaływanie grawitacyjne mas w kategoriach siły działającej na odległość. W ogólnej teorii względności nie występuje pojęcie siły, lecz grawitacja jest traktowana jako rezultat zakrzywienia czasoprzestrzeni, co oznacza, że czasoprzestrzeń ma geometrię nieeuklidesową ze zmienną krzywizną⁵⁶. Fundamentalna dla tej teorii zasada równoważności głosi, że pole grawitacyjne jest lokalnie (czyli na małych obszarach czasoprzestrzennych) równoważne występowaniu sił bezwładności. Zgodnie z klasyczną zasadą względności Galileusza nie istnieje sposób rozstrzygnięcia, czy układ odniesienia znajduje się w spoczynku, czy też porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym (wszystkie zjawiska fizyczne zachodzą w tych układach zgodnie z tymi samymi prawami fizyki). Podobnie według ogólnej teorii względności nie istnieje sposób rozstrzygnięcia, czy znajdujemy się w polu grawitacyjnym o natężeniu g , czy też poruszamy się z przyspieszeniem równym co do wartości g skierowanym w przeciwną stronę. W obydwu układach (inercjalnym, spoczywającym w polu grawitacyjnym i nieinercjalnym, poruszającym się z odpowiednim przyspieszeniem) wszystkie zjawiska podlegają takim samym prawom fizyki. Ogólna teoria względności jest zatem uogólnieniem opisu zjawisk fizycznych również na układy nieinercjalne.

Równania ogólnej teorii względności wiążą geometrię czasoprzestrzeni z rozkładem mas – własności metryczne czasoprzestrzeni nie są niezależne od materii, lecz są przez nią określane, natomiast to, w jaki sposób poruszają

⁵⁵ A. E i n s t e i n, *Istota teorii względności*, tłum. A. Trautman, Prószyński i S-ka, Warszawa 1997, s. 59.

⁵⁶ W geometrii Euklidesa najkrótszą odległością między dwoma punktami jest oczywiście prosta, natomiast w geometriach nieeuklidesowych odpowiednikiem prostej jest linia geodezyjna. Na przykład na sferze, która (do pewnego stopnia) może być modelem geometrii Riemanna, najkrótszą odległością między dwoma punktami otrzymujemy wzdłuż południków. Często mówi się, że obserwacyjnym potwierdzeniem przewidywań ogólnej teorii względności jest zakrzywienie promieni świetlnych w pobliżu wielkich mas (zaobserwowane już w roku 1919). Oczywiście można tak powiedzieć, ale należy pamiętać, że ponieważ prędkość światła jest maksymalną prędkością rozchodzenia się sygnałów, to najkrótsza odległością między dwoma punktami wyznaczona jest właśnie przez trajektorię promienia świetlnego. Można zatem przyjąć, że światło porusza się po „prostych” w danej geometrii (ściślej – po geodezyjnych, które oczywiście nie muszą pokrywać się z prostymi euklidesowymi), ale sama przestrzeń ma geometrię nieeuklidesową. Jak już zauważył Henri Poincaré, jest sprawą konwencji, czy opisując własności przestrzeni fizycznej, dokonamy modyfikacji geometrii czy też praw fizyki. Są to po prostu różne obserwacyjnie równoważne opisy tych samych faktów. Por. C a r n a p, dz. cyt., s. 150-152.

się ciała, jest właśnie określone przez geometrię czasoprzestrzeni. Na gruncie ogólnej teorii względności pojęcie przestrzeni pozostaje ściśle powiązane nie tylko z pojęciem czasu (w sensie czasoprzestrzeni), ale również z pojęciem materii. Matematyka ogólnej teorii względności jest znacznie bardziej zaawansowana niż w przypadku szczególnej teorii względności – poprzestane tu jedynie na podaniu równań pola Einsteina i krótkim jakościowym ich omówieniu. Równania te mają postać następującą:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu},$$

gdzie: $R_{\mu\nu}$ – tensor krzywizny Ricciego, R – skalar krzywizny Ricciego, $g_{\mu\nu}$ – tensor metryczny, $T_{\mu\nu}$ – tensor energii-pędu, c – prędkość światła w próżni, G – stała grawitacji. Lewa strona równania określa geometrię czasoprzestrzeni, prawa natomiast reprezentuje rozkład materii. Materia i czasoprzestrzeń traktowane są tu jako dwa odrębne składniki świata: wzajemnie na siebie oddziałujące (wbrew twierdzeniom Newtona), ale (niezgodnie z koncepcjami Leibniza i Macha) do siebie nieredukowalne⁵⁷.

Ogólna teoria względności przypisuje przestrzeni geometrię nieeuklidesową, nawet „pusta przestrzeń» pod względem fizycznym nie jest ani jednorodna, ani izotropowa”⁵⁸, ale odstępstwa od geometrii Euklidesa ujawniają się dopiero, gdy rozważamy przestrzeń Wszechświata w bardzo dużej skali lub mamy do czynienia z silnymi polami grawitacyjnymi. Podobnie jak w przypadku prędkości małych w porównaniu z prędkością światła prawa fizyki Einsteina praktycznie pokrywają się z prawami fizyki Newtona, w przypadku, gdy rozważamy małe obszary czasoprzestrzeni, odstępstwa od geometrii Euklidesa są praktycznie niemierzalne.

PRZESTRZEŃ ROZSZERZAJĄCEGO SIĘ WSZECHŚWIATA

Zastosowanie równań Einsteina do Wszechświata jako całości umożliwiło konstrukcję modeli kosmologicznych i stanowiło początek kosmologii relatywistycznej. W roku 1922 Aleksander Friedman otrzymał jednorodne, izotropowe rozwiązanie równań Einsteina, opisujące rozszerzanie się Wszechświata. W roku 1929 natomiast Edwin Hubble odkrył, że linie widmowe światła docierającego do nas z odległych galaktyk są przesunięte w stronę czerwieni (ang. red shift). Jeżeli zinterpretujemy ten fakt jako optyczny efekt Dopplera, to otrzymujemy wniosek, że galaktyki oddalają się od nas (i od siebie nawzajem).

⁵⁷ Por. L. S k l a r, *Philosophy of Physics*, Oxford University Press, New York 1992, s. 78n.

⁵⁸ A. E i n s t e i n, *Eter a teoria względności*, w: tenże, *Pisma filozoficzne*, tłum. K. Napiórkowski, red. S. Butryn, Wydawnictwo IFiS PAN, Warszawa 1999, s. 49.

Zgodnie z prawem Hubble'a, prędkość ucieczki galaktyk jest proporcjonalna do odległości od Ziemi. Odkrycia te, jak również odkrycie w roku 1965 przez Arno Penziasa i Roberta Wilsona mikrofalowego promieniowania tła, doprowadziły do sformułowania teorii Wielkiego Wybuchu, współcześnie powszechnie akceptowanego poglądu na powstanie i ewolucję Wszechświata – poglądu, który przyniósł kolejne radykalne zmiany w naszym pojmowaniu przestrzeni.

Zgodnie z teorią Wielkiego Wybuchu (ang. Big Bang) Wszechświat nie jest wieczny i statyczny, lecz powstał około 13,8 miliarda lat temu w gigantycznej eksplozji i ciągle się rozszerza. W odróżnieniu od wybuchów znanych nam z codziennego doświadczenia, takich jak na przykład wybuchy fajerwerków, w których cząstki materii rozbiegają się w różne strony w już istniejącej przestrzeni, zgodnie z teorią Wielkiego Wybuchu przestrzeń (ani czas) nie istniały przed wybuchem, co znaczy, że Wielki Wybuch był również początkiem przestrzeni (i czasu), a rozszerzanie się Wszechświata polega na tym, że sama przestrzeń nieustannie się rozszerza.

Równanie Friedmana, stanowiące podstawę współczesnych modeli kosmologicznych, ma trzy rozwiązania, z których dwa opisują wiecznie rozszerzający się Wszechświat, jedno zaś Wszechświat zamknięty. Każde z tych rozwiązań przypisuje rozszerzającej się przestrzeni inną geometrię. Wszechświat otwarty ma geometrię hiperboliczną (Łobaczewskiego), w której suma wewnętrznych kątów trójkąta jest mniejsza niż π , natomiast stosunek obwodu okręgu do średnicy jest większy niż π . Przestrzeń takiego Wszechświata będzie się rozszerzać wiecznie, a ostatecznym losem jest stan śmierci cieplnej (równowagi termodynamicznej). Wszechświat zamknięty ma geometrię sferyczną (Riemanna), w której suma wewnętrznych kątów trójkąta jest większa niż π , natomiast stosunek obwodu okręgu do średnicy jest mniejszy niż π . Przestrzeń takiego Wszechświata jest skończona – po okresie ekspansji nastąpi kontrakcja, a ostatecznym losem będzie „Wielkie Zgniecenie” (ang. Big Crunch). Ostatni model przypisuje przestrzeni Wszechświata geometrię Euklidesa – Wszechświat jest płaski i będzie się rozszerzać wiecznie, dążąc do stanu śmierci cieplnej. To, który ze „scenariuszy eschatologicznych” faktycznie realizuje nasz Wszechświat, zależy od ilości materii we Wszechświecie. Jeżeli średnia gęstość materii jest większa od pewnej teoretycznie obliczonej wartości, zwanej gęstością krytyczną, siły grawitacji spowodują kolaps materii, w przeciwnym zaś wypadku przestrzeń Wszechświata będzie się rozszerzać wiecznie. Wszystko wskazuje na to, że żyjemy we Wszechświecie, którego globalna geometria jest Euklidesowa (jest to Wszechświat płaski, który rozszerza się w tempie krytycznym).

Pojęcie przestrzeni na gruncie współczesnej kosmologii dalekie jest więc od dawnych pojęć obiektu o czysto geometrycznych właściwościach – sama przestrzeń okazuje się ośrodkiem dynamicznym. Ponadto, jak pokazują współczesne obserwacje, Wszechświat rozszerza się coraz szybciej, co jest niezgod-

ne z modelami Friedmana, zgodnie z którymi w każdym przypadku tempo ekspansji powinno maleć. Dlatego też uczeni poszukują czynników odpowiedzialnych za przyspieszanie ekspansji, czyli tak zwanej ciemnej energii.

Niewątpliwą trudność dla kosmologii stanowi początkowa osobliwość, w której załamują się znane prawa fizyki („miniaturowymi” wersjami początkowej osobliwości są czarne dziury powstające w efekcie kolapsu grawitacyjnego masywnych gwiazd). Do badania najwcześniejszego okresu ewolucji Wszechświata, zwanego erą Plancka, niezbędne jest – przynajmniej zdaniem niektórych teoretyków – połączenie ogólnej teorii względności z mechaniką kwantową, czyli stworzenie kwantowej teorii grawitacji. Jak dotąd, grawitacja jest jedynym z czterech fundamentalnych oddziaływań, dla którego nie udało się sformułować teorii kwantowej, dlatego zagadnienie własności przestrzeni w najwcześniejszych etapach ewolucji Wszechświata pozostaje jak na razie polem spekulacji.

Nie jest również wykluczone, że same pojęcia przestrzeni i czasu mają ograniczony zasięg stosowalności, co znaczy, że poniżej pewnych wartości, zwanych czasem Plancka ($t_p = \sqrt{\hbar G / c^5} \approx 10^{-44} s$) i długością Plancka ($l_p = \sqrt{\hbar G / c^3} \approx 10^{-35} m$), gdzie $\hbar = h / 2\pi$ jest zredukowaną stałą Plancka, G – stałą grawitacji, c – prędkością światła w próżni, pojęcia przestrzeni i czasu przestają mieć fizyczny sens. Być może zatem pojęcie przestrzeni nie jest pojęciem fundamentalnym i może mieć zastosowanie jedynie na poziomie makroskopowym, natomiast do opisu obiektów w skali cząstek elementarnych trzeba będzie poszukiwać radykalnie nowych pojęć.

PRZESTRZEŃ A GEOMETRIA

Geometria Euklidesa, pierwsza w historii teoria dedukcyjna, była traktowana, co zupełnie naturalne, jako teoria rzeczywistej przestrzeni. Ponadto przez ponad dwa tysiące lat pozostawała jedyną znaną geometrią, nic więc dziwnego, że sądzono nawet, iż jest jedynym możliwym systemem geometrii. Po sformułowaniu geometrii nieeuklidesowych w dziewiętnastym wieku pogląd taki okazał się oczywiście niemożliwy do utrzymania. Jeśli jednak istnieje wiele różnych systemów geometrii, to jak przedstawia się zagadnienie stosunku geometrii do własności przestrzeni fizycznej? By odpowiedzieć na to pytanie, należy wprowadzić rozróżnienie geometrii czystej i geometrii stosowanej.

„Matematyka – pisał Einstein – ma szczególną pozycję wśród innych nauk z jednego powodu: jej twierdzenia są absolutnie pewne i bezsporne, podczas gdy we wszystkich innych naukach twierdzenia są w jakimś stopniu sporne i zawsze jest niebezpieczeństwo obalenia ich przez nowe fakty”⁵⁹. Rzeczywiście, trudno

⁵⁹ T e n z e, *Geometria a doświadczenie*, w: tenże, *Pisma filozoficzne*, s. 51.

spierać się z równaniami matematycznymi, w takich zaś dyscyplinach, jak filozofia, nie ma bodaj ani jednego bezspornego twierdzenia. Wiadomo również, że zastosowanie matematyki do opisu przyrody umożliwiło powstanie nauk przyrodniczych i osiągnięcie w nich takiego stopnia pewności rezultatów, jaki inaczej nie byłby możliwy. Zacytujmy jeszcze raz Einsteina: „Jak to jest możliwe, aby matematyka, będąca przecież produktem ludzkiego myślenia niezależnym od wszelkiego doświadczenia, tak doskonale pasowała do przedmiotów rzeczywistości? Czy rozum ludzki może bez doświadczenia, samym myśleniem zgłębić własności rzeczywistych przedmiotów? Odpowiada się na to, moim zdaniem krótko: o ile twierdzenia matematyki odnoszą się do rzeczywistości, to nie są pewne, a jeśli są pewne, to nie odnoszą się do rzeczywistości”⁶⁰.

Uprawiając matematykę, na przykład geometrię, przyjmuje się pewien zestaw aksjomatów i reguł, za pomocą których można na podstawie jednych twierdzeń wyprowadzać inne twierdzenia. W ten sposób uprawiana jest geometria czysta – jej twierdzenia są absolutnie pewne i niezależne od doświadczenia (a priori), ale w ogóle nie odnoszą się do własności przestrzeni fizycznej, a terminy takie, jak punkt czy prosta nie mają żadnego odniesienia empirycznego (mówimy, że tak uprawiana geometria jest nauką formalną). Twierdzenia geometrii czystej mają charakter zdań analitycznych⁶¹. Jeżeli chcemy zastosować geometrię do opisu przestrzeni fizycznej, to należy dokonać przyporządkowania terminom geometrycznym przedmiotów dostępnych naszemu doświadczeniu zmysłowemu. Musimy założyć na przykład, że ciała stałe są sztywne, to znaczy zachowują się tak, jak przedmioty trójwymiarowej przestrzeni euklidesowej, a fizyczną realizacją prostej jest promień światła. Mamy wówczas do czynienia z geometrią stosowaną czy też praktyczną. Tak rozumiana geometria staje się nauką przyrodniczą⁶² i zagadnienie geometrii przestrzeni świata można rozstrzygnąć jedynie przez odpowiednie pomiary. Jeżeli przyjmę, że fizyczną realizacją prostej jest promień światła, to używając trzech takich promieni, mogę zbudować w fizycznej przestrzeni trójkąt i zmierzyć jego wewnętrzne kąty. Jeśli okaże się, że ich suma wynosi 180 stopni, to znaczy, że przestrzeń ma charakter euklidesowy, a jeżeli rezultat będzie inny, to przestrzeń ma różną od euklidesowej geometrię.

CZY PRZESTRZEŃ JEST PUSTA?

Oczywiście odpowiedź na powyższe pytanie zależy od rozważanej koncepcji przestrzeni. Pozytywną odpowiedź otrzymujemy niewątpliwie na

⁶⁰ Tamże.

⁶¹ Por. C a r n a p, dz. cyt., s. 182n.

⁶² Por. E i n s t e i n, *Geometria a doświadczenie*, s. 53.

gruncie starożytnego atomizmu – w koncepcji tej przestrzeń jest absolutnie pusta, a Demokryt nazywał ją nawet istniejącym niebytem. Podobnie absolutna przestrzeń Newtona pozostaje pusta w tym sensie, że jest ośrodkiem o czysto geometrycznych własnościach, całkowicie pozbawionym ciał materialnych (pomijamy spekulacje Newtona na temat obecności Boga i innych „bytów duchowych” w przestrzeni). Koncepcje Arystotelesa, Kartezjusza i relacyjna koncepcja przestrzeni Leibniza wykluczają nawet samą możliwość istnienia pustej przestrzeni, czyli próżni.

Po sformułowaniu w roku 1864 przez Jamesa Clerka Maxwella równań elektrodynamiki klasycznej, w których światło traktowane jest jako fala elektromagnetyczna, wprowadzono koncepcję eteru – wypełniającego całą przestrzeń ośrodka, w którym rozchodzić się miały fale elektromagnetyczne. Sądzono bowiem, że fale są zawsze zaburzeniem pewnego ośrodka materialnego i że podobnie jak fale na wodzie nie mogą istnieć bez wody, tak też rozchodzenie się fal elektromagnetycznych również wymaga istnienia jakiegoś materialnego podłoża. Eter miał jednak dość osobliwe własności – z jednej strony powinien być całkowicie przenikliwy, ponieważ planety i inne ciała niebieskie, poruszając się w przestrzeni kosmicznej, najwyraźniej nie doznają żadnego oporu w swoim ruchu, z drugiej zaś strony powinien być sztywny, to znaczy mieć własności ciała stałego, ponieważ tylko w takim ciele możliwe jest rozchodzenie się fal poprzecznych o wysokich częstościach, jakimi są fale elektromagnetyczne⁶³.

Jeśli istnieje jednorodny i izotropowy eter, to powinien on stanowić wyróżniony (absolutny) układ odniesienia, a zatem, wykonując odpowiednie eksperymenty, można byłoby spodziewać się wykryć ruch Ziemi względem eteru – pomiary prędkości światła powinny dawać różne wyniki w zależności od tego, czy promień światła porusza się zgodnie z kierunkiem ruchu Ziemi względem eteru, czy też w kierunku przeciwnym. Jednak kluczowy dla tych zagadnień eksperyment Michelsona–Morley’a z roku 1887 dał jednoznacznie negatywny wynik, a prędkość światła okazała się stała w każdym układzie odniesienia. Doprowadziło to w szczególnej teorii względności do eliminacji koncepcji eteru⁶⁴ i przyjęcia, że pola elektromagnetyczne są samoistnymi realnościami – fale elektromagnetyczne rozchodzą się w pustej przestrzeni. Koncepcja eteru (czy też przestrzeni jako rzeczywistości niezależnej od materii) powraca jednak w zmodyfikowanej postaci w ogólnej teorii względności: „Według ogólnej teorii względności przestrzeń wyposażona jest we własności fizyczne; w tym sensie istnieje eter. Według ogólnej teorii względności przestrzeń bez

⁶³ Por. t e n ż e, *Eter a teoria względności*, s. 46.

⁶⁴ Dotyczy to mechanicznego eteru Maxwella, ale nie elektromagnetycznego eteru Lorentza, który nie zakładał redukcji zjawisk elektromagnetycznych do mechanicznych.

eteru nie da się pomyśleć; nie byłoby w niej nie tylko rozchodzenia się światła, ale również żadnej możliwości istnienia prętów mierniczych i zegarów, a więc żadnych odległości czasoprzestrzennych w sensie fizyki. Eter ten nie może być jednak pomyślany jako wyposażony w charakterystyczną dla ośrodków ważkich własność bycia złożonym z cząstek dających się obserwować w czasie; nie można do niego stosować pojęcia ruchu⁶⁵.

Z punktu widzenia mechaniki kwantowej zagadnienie okazuje się dość złożone. Otóż z jednej strony trudno zaprzeczyć istnieniu próżni – od budowy atomu, poprzez nasze ciała, po niezmierzone przestrzenie kosmiczne ponad 99,99% zawartości Wszechświata to właśnie próżnia. Nikt już współcześnie nie traktuje w poważny sposób tezy o rzekomym łęku natury przed próżnią (łac. horror vacui); nawet obserwowaną ciągłość i nieprzenikliwość ciał można (jak mówi zakaz Pauliego) wyjaśnić dopiero na gruncie mechaniki kwantowej, a fakt, że ciała jawią nam się właśnie jako ciągłe i nieprzenikliwe, wynika wyłącznie z niewyobrażalnie małych rozmiarów elementarnych składników materii i dostosowania naszych zmysłów do percepcji świata makroskopowego. Próżnia kosmiczna, choć niemal całkowicie pozbawiona materii korpuskularnej, jest jednak wypełniona w sposób niemal doskonale jednorodny i izotropowy mikrofalowym promieniowaniem tła – promieniowaniem elektromagnetycznym o temperaturze $T = 2,7$ K, stanowiącym pozostałość po bardzo wczesnych etapach ewolucji Wszechświata, z okresu około czterystu tysięcy lat po Wielkim Wybuchu.

W próżni zachodzą procesy zwane fluktuacjami kwantowymi. Zgodnie z zasadą nieoznaczoności Heisenberga dla energii i czasu ($\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar / 2$, gdzie ΔE jest nieoznaczonością energii cząstki elementarnej, Δt – nieoznaczonością czasu jej życia, a $\hbar = h / 2\pi$ zredukowaną stałą Plancka) w kwantowej próżni mogą powstawać cząstki wirtualne o energii $\Delta E = mc^2$, które istnieją jedynie przez czas Δt , a następnie znikają. Cząstki wirtualne, mimo że bezpośrednio nie mogą być zaobserwowane, powodują pewne obserwowalne efekty, takie jak efekt Casimira, zaobserwowany po raz pierwszy przez holenderskiego fizyka Hendrika B.G. Casimira w roku 1948). Efekt ten polega na przyciąganiu się dwóch nienaładowanych elektrycznie płytek wykonanych z przewodnika, umieszczonych w odległości d mniejszej niż $1 \mu\text{m}$ (10^{-6} m) od siebie. Zgodnie z mechaniką kwantową, z każdą cząstką materii o pędzie p związana jest fala o długości $\lambda = h/p$ (dotyczy to oczywiście również cząstek wirtualnych). Na zewnątrz płytek mogą powstawać cząstki wirtualne o dowolnych długościach fali, pomiędzy nimi natomiast jedynie takie, dla których $\lambda = d, d/2, d/3, \dots$ (kolejne harmoniczne), ponieważ fale o innych długościach będą tłumione. Powoduje to powstanie różnicy ciśnień między cząstkami wirtualnymi na zewnątrz

⁶⁵ Tamże, s. 51.

płytek i pomiędzy nimi (ciśnienie na zewnątrz jest większe), a w efekcie płytki będą się wzajemnie przyciągać.

Ponadto zgodnie z kwantową teorią pola każda cząstka elementarna otoczona jest chmurą cząstek wirtualnych i bez tego wirtualnego otoczenia nie istnieje⁶⁶. Na przykład elektron, poruszając się w próżni, może wyemitować wirtualny foton, który następnie może spowodować kreację pary elektron–pozyton. W pobliżu elektronu znajduje się więcej wirtualnych pozytonów niż wirtualnych elektronów, ponieważ dodatnie ładunki wirtualnych pozytonów są przyciągane przez ładunek elektronu, natomiast ujemne ładunki wirtualnych elektronów są przez niego odpychane. Z pewnej odległości ładunek elektronu wydaje się mniejszy niż ładunek elektronu pozbawionego swego wirtualnego otoczenia; gdy zaś wnikamy coraz głębiej w wirtualną otoczkę elektronu, wydaje się, że ładunek elektronu wzrasta. Zjawisko to nosi nazwę polaryzacji próżni. Kwantowa próżnia jest więc ośrodkiem, w którym bardzo wiele się dzieje – zachodzą w niej nieustannie procesy kreacji i anihilacji cząstek.

Na gruncie modelu standardowego fizyki cząstek elementarnych pojawia się pytanie o źródło mas cząstek. Peter Higgs zaproponował następujący mechanizm: cała przestrzeń jest wypełniona pewnym polem (zwanym obecnie polem Higgsa). Oddziaływanie poruszających się w przestrzeni cząstek z tym polem miałyby być odpowiedzialne za określone własności masy cząstek (i wyjaśniać, na przykład, dlaczego foton w ogóle nie ma masy, natomiast bozony W i Z są bardzo ciężkie). Ponieważ cała przestrzeń jest wypełniona polem Higgsa, również z tego powodu trudno mówić o istnieniu całkowicie pustej przestrzeni. W lipcu 2012 roku opublikowano informację o eksperymentalnym odkryciu bozonu Higgsa w laboratorium cząstek elementarnych CERN pod Genewą przy użyciu największego na świecie akceleratora, Wielkiego Zderzacza Hadronów (ang. Large Hadron Collider – LHC), co stanowi wspaniałe potwierdzenie modelu standardowego fizyki cząstek elementarnych⁶⁷.

Z obliczeń astronomicznych wynika ponadto, że około 70% zawartości Wszechświata stanowi tak zwana ciemna energia, równomiernie wypełniająca całą przestrzeń, która jest czynnikiem odpowiedzialnym za przyspieszanie ekspansji Wszechświata. Czym ona jest, jak na razie nie wiadomo.

⁶⁶ Por. Ł u k a s i k, dz. cyt., s. 287.

⁶⁷ Peter Higgs (ur. 1929) został w roku 2013 uhonorowany Nagrodą Nobla z fizyki za teoretyczne odkrycie mechanizmu pomagającego zrozumieć pochodzenie masy cząstek subatomowych, który został potwierdzony dzięki odkryciu postulowanej przez niego cząstki elementarnej (bozonu Higgsa) właśnie w eksperymentach ATLAS i CMS przeprowadzonych w Wielkim Zderzaczu Hadronów w CERN.