

III. Z FILOZOFII FIZYKI

ROZDZIAŁ 8

CZAS, PRZESTRZEŃ, RUCH

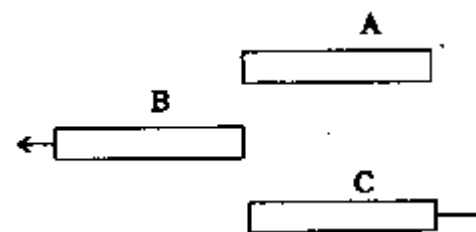
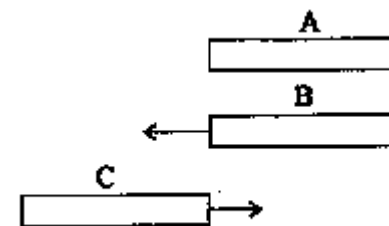
Nie ulega wątpliwości, że choć fizyka i filozofia stanowią odrębne dziedziny działalności intelektualnej, stosujące odmienne metody i stawiające sobie różne cele badawcze, to jednak wiele zagadnień można zaliczyć do zakresu zainteresowania obu tych dyscyplin. Szczególnie dział filozofii zwany „ontologią” podejmuje często analizy problemów, przy których nie sposób obejść się bez wsparcia ze strony podstawowej nauki przyrodniczej, jaką jest właśnie fizyka. Tak jest np. w wypadku ontologicznych analiz pojęcia „przestrzeni”, „czasu” i „ruchu”. Mimo że wielu filozofów próbuje dokonywać takich analiz „na własną rękę”, opierając się na pewnych zdroworozsądkowych intuicjach, trzeba przyznać, że rezultaty badań fizyków w tej dziedzinie nie są i nie powinny być pomijane milczeniem. Powszechnie wiadomo, że wspomniane wyżej pojęcia doczekały się wnikliwej, choć kontrowersyjnej analizy na gruncie dwóch podstawowych współczesnych teorii fizycznych: szczególnej i ogólnej teorii względności. Jednak, choć od powstania tych teorii minęło już stulecie, ciągle panuje przekonanie o „paradoksalności” czy głębokiej nieintuicyjności proponowanych przez nie rozstrzygnięć. W świadomości ludzi nie zajmujących się głębiej problematyką czasu i przestrzeni utrwalił się stereotyp dobrej, starej i intuicyjnej mechaniki Newtonowskiej, którą niestety trzeba było porzucić dla „zwarowanej”, choć zgodnej z doświadczeniem teorii Einsteina. Stereotyp ten można jednak podważyć, pokazując, że już w klasycznym ujęciu czasu i przestrzeni, pochodzącym od Galileusza i Newtona, znaleźć można konsekwencje niezgodne ze zdroworozsądkową „wiedzą potoczną”. Co więcej, można pokazać, że przejście do teorii względności jest w istocie podyktowane tylko konsekwentnym zastosowaniem pewnych przesłanek, pojawiających się już w klasycznym ujęciu zjawisk mechanicznych. Kluczowym pojęciem dla

osiągnięcia tego celu będzie pojęcie „względności ruchu”, które uczynimy punktem wyjścia naszych rozważań.

Rozróżnienie między ruchem a spoczynkiem wydaje się jednym z najbardziej podstawowych i klarownych rozróżnień, jakie dyktuje nam doświadczenie. Książka leżąca na moim biurku bez wątpienia spoczywa, a samochód jadący za oknem niewątpliwie się porusza — tak podpowiada nam nasz zdrowy rozsądek. Trudno dopatrzeć się czegoś niewłaściwego w takim ujęciu. Jednakże taki punkt widzenia wydaje się jasny i intuicyjny dopóty, dopóki nie zaczniemy brać pod uwagę tego, że my sami jako obserwatorzy też możemy uczestniczyć w ruchu, co diametralnie zmienia naszą perspektywę. Jeśli wstanę od biurka i zrobię parę kroków, książka „odsunie się” ode mnie. Kiedy wsiądę do swojego samochodu i dogonię inny wóz, a następnie się z nim zrównam, w mojej obserwacji ów wóz się „zatrzyma”. Podobne proste fakty zwróciły uwagę już starożytnych filozofów. Jednym z greckich filozofów, który szczególnie wnikliwie zajmował się pojęciem ruchu, był Zenon z Elei. Zenon miał na uwadze bardzo osobliwy cel: pragnął mianowicie wykazać, że wszelki ruch jest niemożliwy! Dziś taka postawa może budzić uśmiezek niedowierzania, ale starożytnym myślicielom właściwa była pogarda dla zdroworozsądkowych przekonań, czerpanych z doświadczenia zmysłowego. Liczyły się dla nich przede wszystkim racjonalne argumenty. Toteż Zenon obmyślił wiele bardzo przekonujących argumentów pokazujących, że w pojęciu „ruchu” zawarta jest ukryta sprzeczność. Jednym z tych argumentów był tzw. paradoks stadionu.

„Paradoks” ten można przedstawić następująco. Na stadionie znajdują się trzy szeregi biegaczy *A*, *B* i *C*, o równej długości. Szereg *A* spoczywa, a szeregi *B* i *C* biegną naprzeciwko siebie z tą samą prędkością. Załóżmy, że w danym momencie spotykają się „czoła” wszystkich trzech szeregów (patrz rysunek). Dla Zenona paradoksalnym był fakt, że w chwili, gdy szereg *B* minie całkowicie szereg *C*, czoło szeregu *B* znajdzie się dopiero na wysokości końca szeregu *A*. Wyprowadzał bowiem stąd wniosek, że dany odcinek czasu może być równy swojej połowie (czas potrzebny szeregowi *B* na minięcie szeregu *C* jest równy połowie czasu potrzebnego na minięcie szeregu *A* o tej samej długości). Oczywiście łatwo możemy zauważyć, gdzie tkwi błąd Zenona. Wynika on z niewzięcia pod uwagę faktu, iż prędkości szeregu *B* względem szeregów *A* i *C* są różne. Zauważenie jednak tego wymagało

uświadomienia sobie faktu względności ruchu, a to — jak widać — nie było sprawą taką prostą.



„Paradoks stadionu” Zenona z Elei.

Arystoteles w podobnym duchu rozprawił się z argumentem Zenona. Niestety, w swoich analizach pojęcia ruchu zatrzymał się niejako w połowie drogi, ugruntowując w istocie błędny pogląd na względność ruchu. Zauważając oczywisty fakt zależności opisu ruchu przedmiotów od tego, jak porusza się obserwator, przyjął, że nie wszyscy obserwatorzy są względem siebie równouprawnieni. Innym słowy, Arystoteles skłonny był uznać, że nasz opis ruchu przedmiotów w sytuacji, gdy sami się poruszamy, jest niewłaściwy, jest czymś w rodzaju złudzenia optycznego. Właściwy opis ruchu może odbywać się tylko w wyróżnionym układzie odniesienia, którym dla Arystotelesa była nieruchoma Ziemia. W ten sposób Arystoteles wzmocnił nasze intuicyjne przeświadczenie o absolutności pojęcia ruchu — wszystko, co porusza się względem Ziemi, porusza się „naprawdę”, a co względem niej spoczywa, spoczywa „naprawdę”.

Aby podważyć to stanowisko, trzeba było *zaczekać* do rewizji poglądu na temat wyróżnionej pozycji Ziemi we Wszechświecie, Prace Kopernika, Galileusza i wreszcie Newtona dokonały ostatecznie dzieła powolnego, ale konsekwentnego zrywania z pojęciem „ruchu absolutnego”. Dziś już wiemy doskonale, że książka leżąca spokojnie na biurku porusza się z zawrotną prędkością względem Słońca, a z jeszcze większą prędkością względem centrum Galaktyki. Czy jednak aby na pewno umiemy z tego faktu wyciągnąć właściwe konsekwencje? Czy gdzieś w głębi nie pokutuje nadal przekonanie, że owszem, książka może być widziana przez różnych obserwatorów w różny sposób, ale naprawdę to albo spoczywa, albo porusza się z jakąś określoną prędkością? Aby to rozważyć dokładniej, posłużmy się następującym przykładem myślowym, do którego zresztą będziemy jeszcze wracać. Wyobraźmy sobie całkowicie pusty fragment przestrzeni, pozbawiony jakichkolwiek obiektów z wyjątkiem dwóch ciał *A* i *B*. Ciała te znajdują się w jednostajnym ruchu względem siebie — np. zbliżają się do siebie. Rozważmy teraz pytanie, które z ciał porusza się „naprawdę”, a które spoczywa. Czy można w jakikolwiek sposób udzielić na to pytanie odpowiedzi? Czy doświadczenie jest w stanie nam tutaj pomóc? W pustej przestrzeni nie ma przecież „słupków milowych” ani żadnych innych sposobów na ustalenie absolutnego „tła”, względem którego można by określać ruch obu ciał. Jedyne, co jest dostępne naszej obserwacji, to jednostajne zmniejszanie się dystansu między obydwoma ciałami. Nasze przeświadczenie, że istnieje zasadnicza różnica między ruchem względnym, pozornym a ruchem prawdziwym, absolutnym, nie znajduje w tym wypadku żadnego umocowania w obserwacji.

Czy jednak fakt, że nie umiemy rozstrzygnąć tego, które z dwóch ciał się naprawdę porusza, przesądza o tym, że pojęcie „ruchu absolutnego” nie ma sensu? Tak, jeśli uznamy, że do tego, aby jakieś pojęcie było sensowne, musimy dysponować (przynajmniej w zasadzie) metodą sprawdzenia, w jakiej sytuacji można to pojęcie zastosować. Rozumiemy na przykład pojęcie ciężaru, gdyż możemy przeprowadzić odpowiednią procedurę, która pozwoli nam na określenie dla pewnych dwóch przedmiotów, czy mają one ten sam ciężar, czy nie. Taką procedurą może być chociażby umieszczenie obu przedmiotów na wadze szalkowej. Oczywiście nie do wszystkich przedmiotów ta procedura daje się faktycznie zastosować — niektóre przedmioty mogą być np. za

duże, albo za małe — ale w zasadzie taką obiektywną metodą dysponujemy. Jeśli dane pojęcie nie może się wylegitymować żadną, choćby cząstkową metodą pozwalającą na jego odniesienie do konkretnej sytuacji, nie powinno ono być stosowane w nauce. Dlatego też pojęcia „ruchu absolutnego” i „spoczynku absolutnego” nie mają prawa pojawić się w nauce, jeśli nie stoją za nim obiektywne metody sprawdzenia, czy dane ciało naprawdę się porusza, czy nie. Zamiast nich trzeba posługiwać się jedynie określeniami relatywnymi: „*x* porusza się względem *y*” czy „*x* spoczywa względem *y*”. Dopuszczalne jest przy tym, że jeden i ten sam przedmiot *x* będzie poruszał się względem jakiegoś *y*, a spoczywał względem innego *z*. Nie wynika z tego żadna sprzeczność, gdyż nie możemy wywnioskować stąd, iż *x* zarazem spoczywa i porusza się „absolutnie”.

Domyślam się, że sprawy te są dla Czytelnika zupełnie oczywiste. Jednakże nie jestem zupełnie pewien, czy wszyscy Czytelnicy zdają sobie sprawę z konsekwencji odrzucenia ruchu absolutnego. Spróbujmy zatem przyjrzeć się owym konsekwencjom. Zacznijmy od tego, że razem z ruchem absolutnym traci sens pojęcie miejsca, a dokładniej pojęcie „tego samego umiejscowienia”. Co prawda powszechnie stosujemy zwroty w rodzaju „spotkajmy się w tym samym miejscu za tydzień”, ale oczywiście pojęcie „tego samego miejsca” jest milcząco zrelatywizowane do naszego otoczenia na powierzchni planety Ziemi. „To samo” miejsce, np. pod kolumną Zygmunta w Warszawie 1 września 2000 r. i 8 września tego samego roku, to dwa zupełnie różne miejsca rozpatrywane z punktu widzenia Słońca, a jeszcze inne z punktu widzenia centrum naszej Galaktyki. W istocie pojęcie miejsca jest równoważne pewnemu przeformułowaniu pojęcia absolutnego spoczynku. Jeśli moglibyśmy powiedzieć, że jakieś ciało cały czas znajduje się w jednym miejscu, to tym samym określilibyśmy, że znajduje się ono w absolutnym spoczynku. I na odwrót — gdybyśmy wiedzieli, które ciała spoczywają w absolutnym sensie, to miejscem byłyby właśnie lokalizacja owych ciał.

To jednak dopiero początek. Przyjrzyjmy się teraz innemu nie budzącemu chyba wątpliwości pojęciu, a mianowicie odległości przestrzennej. Wydaje się bezsporne, że przykładowe zdanie „Warszawa jest odległa od Krakowa o 200 km” jest łatwą do zweryfikowania prawdą, niezrelatywizowaną do żadnego innego faktu. Tak jest zresztą w istocie, ale tylko przy pewnych dodatko-

wych założeniach. Zastanówmy się jednak ogólnie nad sensem zdań typu „Odległość między x a y wynosi d ”. Przede wszystkim zapytajmy, jakiego rodzaju obiekty mogą występować w miejscu zmiennych x i y . Do jakich przedmiotów możemy stosować pojęcie odległości przestrzennej? Jedna z możliwości została wykluczona już przez nasze poprzednie rozważania — nie mogą to być mianowicie miejsca, bo takich obiektów nie da się zdefiniować w sposób absolutny. (Zauważmy, że punkty przestrzenne to także miejsca, tyle że nierozciągłe, bez rozmiarów. Zatem prostą konsekwencją tezy o względności ruchu jest to, że odległości nie można określać między punktami przestrzennymi!) Może zatem moglibyśmy określać odległości między rzeczami? No tak, ale nie wszystkie rzeczy są względem siebie nieruchome. Jeśli zapytamy, jaka jest odległość między Ziemią a Saturnem, to pytanie to nie znajdzie jednoznacznej odpowiedzi, chyba że określimy, **w którym momencie** ma być mierzona ta odległość. Zatem pojęcie odległości przestrzennej musi być zrelatywizowane do czasu: jeśli chcemy mówić o odległości między rzeczami, to należy ją wyrażać w zdaniach „Odległość między rzeczami x a y w momencie t wynosi d ”.

Ktoś może jednak spróbować następującego wybiegu. Zamiast rozważać odległości przestrzenne między rzeczami, które trwają w czasie, a zatem mogą zmieniać swoje względne lokalizacje, spróbujmy może zastosować pojęcie odległości do obiektów punktowych czasowo (momentalnych), a mianowicie do **zdarzeń**. Pojęcie zdarzenia jest chyba na gruncie języka potocznego dostatecznie jasne. Zdarzeniem jest np. wybuch wulkanu, urodziny dziecka czy podpisanie traktatu międzynarodowego. Dla uproszczenia będziemy zakładać, że każde zdarzenie zachodzi w dokładnie jednym momencie, chociaż zazwyczaj jest to nie moment, lecz pewien stosunkowo krótki interwał czasu. Otóż wracając do naszego problemu możemy zapytać, czy kwestia ustalenia odległości przestrzennej między zdarzeniami jest rozstrzygalna w sposób absolutny. Ogólnie odpowiedź na to pytanie jest przecząca. Jeśli tylko dwa zdarzenia nie zachodzą w tym samym momencie, to odległość między nimi nie jest jednoznacznie ustalona — zależy ona mianowicie od obserwatora (układu odniesienia). Pokażmy to na przykładzie dwóch zdarzeń historycznych — np. bitwy pod Grunwaldem oraz hołdu pruskiego. Najbardziej naturalne wydaje się założenie, że odległość przestrzenna między tymi zdarzeniami

jest to po prostu odległość między polami Grunwaldu a Krakowem (ze względu na spoczywanie obu tych obiektów względem siebie odległość ta nie musi być relatywizowana do momentu czasu). Naturalność ta wynika jednak tylko z uprzywilejowanego statusu układu odniesienia związanego z Ziemią. Można wyobrazić sobie obserwatora, który poruszałby się ruchem jednostajnym od Grunwaldu do Krakowa tak wolno, że zacząłby swoją podróż 15 lipca 1410 r., a zakończył w Krakowie 10 kwietnia 1525 r. Dla takiego obserwatora oba wydarzenia zaszłyby w tym samym miejscu — ich odległość przestrzenna wynosiłaby 0.

W istocie łatwo zauważyć związek między nieistnieniem absolutnego ruchu (spoczynku) a niemożnością określenia absolutnej odległości między nierównoczesnymi zdarzeniami. Gdyby istniała absolutna odległość, to nierównoczesne zdarzenia, dla których odległość ta wynosiłaby 0, wyznaczałyby tym samym pewne absolutne miejsce, a to z kolei definiowałoby nam absolutny spoczynek. Skoro więc istnieją przekonujące argumenty za tym, że nic w przyrodzie nie wyróżnia absolutnego ruchu, to tym samym musimy uznać, że absolutnej odległości nie da się również ustalić. Wyjątkiem jest tutaj, jak już wspomnieliśmy, sytuacja dwóch zdarzeń równoczesnych. Dla każdego obserwatora dwa zdarzenia zachodzące w tym samym momencie wyznaczają dokładnie jeden określony interwał przestrzenny — jest to niewątpliwie przynajmniej o tyle, o ile samo pojęcie „zachodzenia w tym samym momencie” nie budzi żadnych wątpliwości. Tak właśnie się wydawało twórcom mechaniki klasycznej — głównie Newtonowi — i takie właśnie rozumienie czasu i przestrzeni zawarli oni w swojej koncepcji.

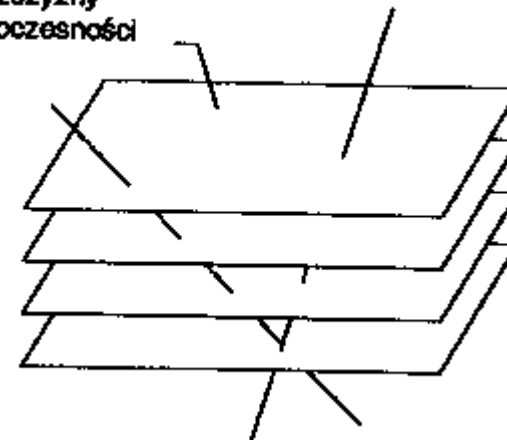
Spróbujmy teraz ująć syntetycznie to, co zostało do tej pory powiedziane, w ogólny opis klasycznej czasoprzestrzeni. Pojęcie „czasoprzestrzeni” zwykle kojarzy się nam z fizyką relatywistyczną, ale jest to nieporozumienie. Fizyka klasyczna również posługuje się tym pojęciem, tyle że odpowiednio odmiennie je interpretuje. Czym jednak jest czasoprzestrzeń? Fizycy najczęściej odpowiadają, że jest to zbiór wszystkich zdarzeń tzw. punktowych, czyli tych zdarzeń, które zachodzą w punkcie i trwają nierozciągłą chwilę. Można się zgodzić z tym określeniem, z zastrzeżeniem, że jeśli dwa zdarzenia zachodzą dokładnie w tym samym momencie i w tym samym punkcie, to traktujemy je jako jeden obiekt. Formalnie należałoby raczej powiedzieć, że elementami czaso-

przestrzeni są klasy abstrakcji na zbiorze zdarzeń od relacji koincydencji (takie klasy często nazywa się „punktami czasoprzestrzennymi”)¹. W dalszym jednak ciągu dla uproszczenia będziemy mówili o zdarzeniach jako o elementach czasoprzestrzeni.

W klasycznym ujęciu czasoprzestrzeń fizyczna ma następującą strukturę. Dzieli się ona mianowicie w naturalny sposób na „warstwy”, obejmujące wszystkie zdarzenia zachodzące w jednym momencie czasu (zdarzenia równoczesne). Taką warstwę wszystkich zdarzeń zachodzących w danym momencie można nazwać „przestrzenią”. Jak pamiętamy, dla zdarzeń należących do **danej** przestrzeni określone są relacje przestrzenne, tj. określone w sposób absolutny są między nimi odległości. Natomiast kwestia odległości między zdarzeniami należącymi do różnych warstw **nie** jest rozstrzygalna. Poniższy rysunek ilustruje całą sytuację. Warstwy przestrzenne zaznaczono na nim w postaci dwuwymiarowych płaszczyzn, jako że nie jesteśmy w stanie narysować przestrzeni trójwymiarowych, uszeregowanych w czwartym, czasowym wymiarze. Pokazane zostały również „tory” dwóch obiektów punktowych poruszających się względem siebie ze stałą prędkością, czyli dwie nierównoległe linie „przebijające” poszczególne warstwy przestrzenne. Podkreślimy przy tym, że zgodnie z naszymi wcześniejszymi ustaleniami nie można rozstrzygnąć, który z dwóch obiektów naprawdę się porusza, a który spoczywa. Znaczy to, że nie ma sensu pytać o to, która z dwóch linii jest prostopadła do warstw przestrzennych zdarzeń równoczesnych. Prostopadłość oznaczałaby bowiem, że obiekt, którego „historię” wyznacza ta linia, w absolutnym sensie spoczywa. Geometria czasoprzestrzeni klasycznej pozwala więc na mówienie o kątach między liniami (określają one względną prędkość obiektów), ale nie pozwala na mówienie o kątach między daną linią a warstwą „teraźniejszości”. Fakt ten ujmuje się matematycznie w stwierdzeniu, że struktura geometryczna czasoprzestrzeni klasycznej jest strukturą geometrii afinicznej, a nie Euklidesowej. Euklidesowe są tylko warstwy wyznaczone przez relację równoczesności.

Wróćmy może z tak wysokiego piętra abstrakcji z powrotem „na ziemię”. Myślę, że przekonaliśmy się już, iż klasyczne (Newtonowskie) ujęcie czasu i przestrzeni nie jest tak bezproblemowe, jak zdroworoządkowe ujęcie Arystotelesa. Można jednak powiedzieć

płaszczyzny
jednoczesności



więcej. Okazuje się, że w koncepcji Newtona dają się zauważyć pewne niekonsekwencje, których usunięcie prowadzi w kierunku jeszcze głębszego odejścia od naturalnych przekonań na temat ruchu, czasu i przestrzeni. Zwróćmy może najpierw uwagę na pozornie niebudzące wątpliwości pojęcie przestrzeni, rozumianej jako zbiór wszystkich zdarzeń zachodzących w tym samym momencie. Na pierwszy rzut oka przestrzeń zdarzeń równoczesnych („warstwa” czasoprzestrzeni) jest tym, co postrzegamy w codziennych obserwacjach jako nasze otoczenie. Tak się zresztą wydawało fizykom osiemnasto- i dziewiętnastowiecznym. Jednakże nie brali oni pod uwagę faktu, że promienie świetlne, dzięki którym dochodzą do nas informacje o odległych zdarzeniach, rozchodzą się ze skończoną, choć olbrzymią prędkością. W rezultacie im dalszy obiekt oglądamy, tym bardziej „cofamy się” w przeszłość. Najbardziej spektakularnym jest tutaj przykład odległych gwiazd. To, co widzimy w pogodną, rozgwieżdżoną noc, to dla wielu gwiazd ich zamierzchnia przeszłość. Jest bardzo prawdopodobne, że wiele z podziwianych przez nas gwiazd już naprawdę nie istnieje. Zatem okazuje się, że przestrzeń zdarzeń równoczesnych w klasycznym sensie nie jest dostępna naszej obserwacji.

W istocie widać, że kluczowym problemem przy określaniu klasycznego pojęcia przestrzeni jest oczywiście rozpoznanie zdarzeń jednoczesnych (zachodzących w tym samym momencie). Czy pojęcie jednoczesności ma jednak wystarczające ugruntowanie w doświadczeniu? Nie tak dawno przekonaliśmy się przecież, że

¹ Wyjaśnienie pojęcia „klasy abstrakcji” Czytelnik znajdzie w rozdziale 6.

pozornie intuicyjne pojęcia spoczynku czy ruchu nie mogą zostać faktycznie wyposażone w jednoznaczną metodę zastosowania ich do konkretnych przypadków. Aby przekonać się, że dokładnie z taką samą sytuacją mamy do czynienia w wypadku jednoczesności, odwołajmy się znowu do przykładu z pustą przestrzenią, w której tym razem zachodzą dwa odległe od siebie zdarzenia A i B . Dla ustalenia uwagi możemy przyjąć, że są to zdarzenia polegające na wysłaniu w danym punkcie krótkiego impulsu świetlnego (np. mignięcie latarką). Postawmy teraz pytanie, **jak** rozstrzygnąć, czy zdarzenia te zaszły jednocześnie, czynie. **Przy** rozstrzygnięciu tej kwestii nie możemy się odwołać bezpośrednio do obserwacji, gdyż musimy pamiętać o opóźnieniu związanym ze skończoną prędkością sygnałów świetlnych. Zatem fakt, że **postrzegamy** dwa zdarzenia jako równoczesne nie może być argumentem za tym, że faktycznie zdarzenia te są równoczesne. Spektakularną ilustracją tej tezy może być wybuch gwiazdy supernowej, obserwowany na niebie przez Chińczyków na przełomie pierwszego i drugiego tysiąclecia, który zaszedł z całą pewnością miliony lat przed pojawieniem się ludzi na Ziemi.

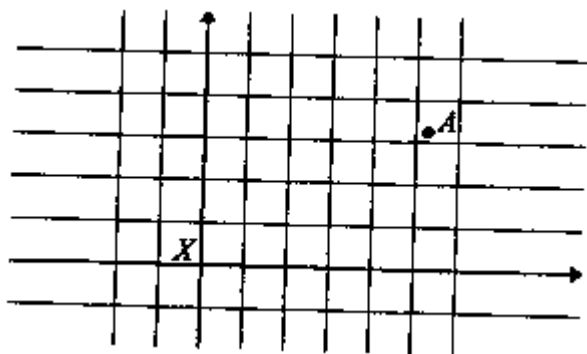
Najprostszym rozwiązaniem problemu jednoczesności wydaje się może wzięcie poprawki na opóźnienie sygnału. W przypadku naszych zdarzeń A i B trzeba by było porównać ze sobą odległość między zdarzeniem A i zdarzeniem, polegającym na zaobserwowaniu przez obserwatora sygnału wysłanego z A (oznaczymy to zdarzenie przez C), z odległością między B a zdarzeniem, polegającym na zaobserwowaniu B przez tego samego obserwatora (to zdarzenie możemy oznaczyć jako D). Jeśli odległość między A i C okazałaby się np. większa od odległości między B a D , to należałoby odpowiednio uwzględnić ten fakt przy ustalaniu jednoczesności — np. obserwator mógłby zarejestrować B jako wcześniejsze niż A , a po zastosowaniu poprawki okazałoby się, że A było równoczesne z B . Niestety metoda ta, choć z praktycznego punktu widzenia może być traktowana jako zadowalająca, jest nie do przyjęcia z zasadniczego powodu. Pamiętamy bowiem, że w Newtonowskiej czasoprzestrzeni nie można w absolutny sposób określić odległości między dwoma zdarzeniami, chyba że są one równoczesne. No ale właśnie nasze obecne zadanie polega na sformułowaniu metody ustalania jednoczesności zdarzeń. Aby we właściwy sposób określić poprawkę na róż-

nicę odległości, trzeba by już wcześniej dysponować pojęciem jednoczesności. W ten sposób popadamy jednak w błędne koło.

Gdybyśmy w naszej wymyślonej sytuacji mieli do pomocy rzeczy, stanowiące „trwały” punkt odniesienia — tj. gdyby zdarzenia A i B zachodziły na pewnych rzeczach a oraz b , a obserwator (sam będący rzeczą) był nieruchomy względem owych a i b — trudność powyższa mogłaby być pokonana. Ustalenie absolutnej odległości między spoczywającymi względem siebie rzeczami jest bowiem zasadniczo możliwe. Jednak nie możemy w ogólności przyjąć takiego upraszczającego założenia. Musimy bowiem dysponować uniwersalną metodą ustalania jednoczesności zdarzeń. W szczególności, w naszej przykładowej pustej przestrzeni nie możemy odwołać się do niczego więcej, poza dwoma błyskami światła A i B — nie ma tam żadnych absolutnych punktów odniesienia, żadnych pomocniczych nieruchomych obiektów. Dlatego właśnie rozwiązanie problemu ustalania absolutnej jednoczesności owych zdarzeń natrafia na trudność nie do pokonania.

Poszukując absolutnych pojęć czasowych i przestrzennych dotarliśmy oto do punktu, w którym „załamały” się nam wszystkie intuicyjne pojęcia. Pojęcie odległości wymaga do swojego umocowania pojęcia jednoczesności, a ono z kolei potrzebuje pomiarów absolutnej odległości. W rezultacie zostajemy bez jednego i drugiego. Czy więc w ogóle powinniśmy zaprzestać stosowania miar długości oraz miar czasu? Na pewno byłby to krok zbyt radykalny. Nie pozostaje nam teraz nic innego, jak pracowicie odbudować krok po kroku strukturę umożliwiającą mierzenie czasu i przestrzeni, ale pozbawioną wszelkich nie znajdujących uzasadnienia elementów absolutnych. Musimy przyjąć zasadę, że nie uznajemy żadnego pojęcia, dla którego nie istnieje jednoznaczna metoda, pozwalająca na jego zastosowanie do konkretnych obiektów (zdarzeń). Zaczniemy może od sformułowania pojęcia „układu odniesienia”. Układ odniesienia może być wyznaczony przez dowolny obiekt materialny — oznaczmy go sobie przez x . Wybranie takiego obiektu umożliwi nam określenie położenia przestrzennego dowolnych zdarzeń. Wystarczy tylko w przestrzeni wokół x -a розміścić inne ciała spoczywające względem niego i znajdujące się od siebie w równych odległościach (przypominamy: odległości między ciałami spoczywającymi względem siebie są absolutne!), aby uzyskać „siatkę” pozwalającą na lokalizację z dowolną żadaną dokładnością każdego zdarzenia. Np. zdarzenie A *zaznaczone*

na rysunku zachodzi „w pobliżu” piątego punktu „na prawo” x i trzeciego do góry. Możemy zatem mówić o odległościach między dowolnymi zdarzeniami — ale, podkreślmy, tylko relatywnie w stosunku do wybranego punktu x (układu odniesienia). Nic nas nie uprawnia do przyjęcia założenia, że jeśli zmierzona w naszym układzie odległość między dwoma zdarzeniami wynosi d , to tyle samo będzie ona wynosić w innych układach odniesienia.



Zauważmy na marginesie, że wprowadzenie w powyższy sposób układu odniesienia pozwala nam mówić w sensowny sposób o **miejscach** (lokalizacjach) zdarzeń. Miejszem jest w naszym ujęciu elementarna „kratka” utworzona z siatki punktów odniesienia. Jednakże musimy pamiętać, że nie możemy w ten sposób określić pojęcia miejsca absolutnie, a tylko relatywnie—w istocie określiliśmy nie „miejsce”, a „miejsce-w-układzie-*”. Łatwo się przekonać, że w innym równie dopuszczalnym układzie fizycznym miejsca mogłyby być określone inaczej, tj. dwa zdarzenia zachodzące względem jednego układu w tym samym miejscu nie byłyby równo umiejscowione w drugim.

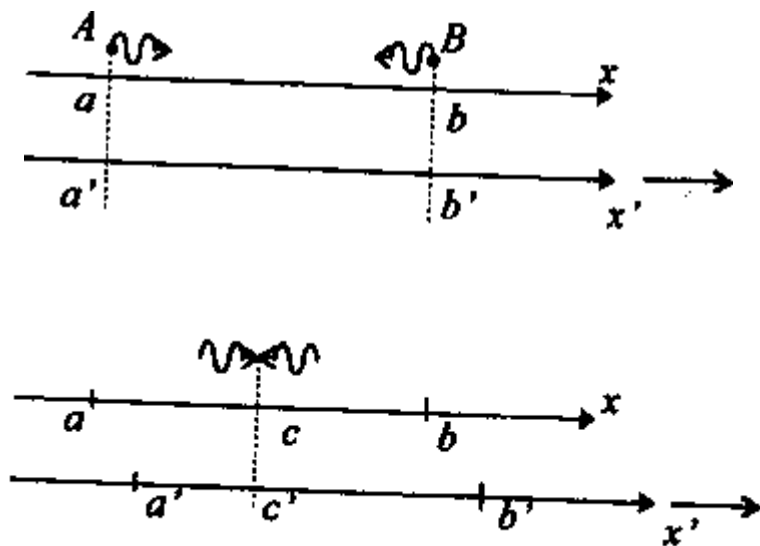
Do naszego układu musimy teraz wprowadzić możliwość pomiaru czasu. Przyjmiemy bez głębszej analizy, że dysponujemy odpowiednim zegarem (tj. procesem cyklicznym), który może mierzyć interwały czasu między zdarzeniami **zachodzącymi w bezpośrednim sąsiedztwie tego zegara**. Zegar nasz możemy np. umieścić w punkcie x , co daje nam możliwość ustalenia czasowej współrzędnej wszystkich zdarzeń zlokalizowanych w tym punkcie. Niestety, zegar taki jest bezużyteczny, jeśli chodzi o pomiar czasu zachodzenia zdarzeń odległych od miejsca x , z powodów, o których już mówiliśmy wcześniej. Rozmieszczenie

identycznych zegarów w każdym punkcie naszej siatki przestrzennej byłoby może dobrym posunięciem, gdyby nie problem, że trzeba by je jakoś zsynchronizować, to znaczy spowodować, żeby wszystkie zaczęły chodzić dokładnie w tym samym momencie. To zaś znów zakłada, że możemy określić jednoczesność dla zdarzeń odległych od siebie, a takiego założenia nie wolno nam przyjąć. Problem pomiaru współrzędnej czasowej dla wszystkich zdarzeń w danym układzie musi zatem być rozwiązany w inny sposób.

Zastanówmy się przez moment nad samym pojęciem „jednoczesności”, funkcjonującym w języku potocznym. Czy pojęcie to ma dobrze określony, jednoznaczny sens? Otóż do pewnego stopnia niewątpliwie tak — jeśli ograniczymy się do zdarzeń zachodzących blisko siebie i dopuścimy pewien rozsądny margines dokładności. Problem pojawia się jednak, kiedy zdarzenia dzieli ogromny dystans przestrzenny, a nam zależy na dość precyzyjnej odpowiedzi. W tym wypadku potoczne, zdroworozsądkowe pojęcie „jednoczesności” nie daje nam żadnej metody rozstrzygnięcia naszego problemu. Dlatego możemy postąpić tutaj w pewnym zakresie dowolnie, tj. możemy przyjąć jakkolwiek konwencję, zgodną z potocznym ujęciem dla przypadków nie budzących wątpliwości, a rozstrzygającą jednoznacznie przypadki wątpliwe. Konwencja, którą utarło się przyjmować w fizyce, jest następująca: uznamy dwa zdarzenia A i B za równoczesne, gdy promienie świetlne wysłane z A i B spotkają się dokładnie w połowie drogi między A i B . Oczywiście ze względu na zastosowanie w tej definicji pojęcia odległości, może ona być stosowana tylko relatywnie do wybranego wcześniej układu odniesienia. Ściśle rzecz biorąc definicja nasza powinna mieć następującą postać: A jest równoczesne-w- x z B , gdy odległość-w- x między A a zdarzeniem C , polegającym na spotkaniu sygnałów świetlnych wysłanych z A i B , równa jest odległości-w- x między B i C .

Zasadniczą cechą tak określonego pojęcia jednoczesności, decydującą o radykalnym odejściu od klasycznego rozumienia czasu, jest jego faktyczna zależność od układu odniesienia. Przez faktyczną zależność rozumiemy to, że zdarzenia określone jako jednoczesne w jednym układzie, nie będą jednoczesne w innym, odpowiednio dobranym układzie. Pokażmy ten fakt na przykładzie. Rozważmy więc znów odległe zdarzenia A i B zachodzące w pustej przestrzeni oraz dwa układy odniesienia x i x' . Załóżmy

ponadto, że układy x oraz x' poruszają się względem siebie wzdłuż linii łączącej zdarzenia A i B . Sytuacja ta jest przedstawiona na poniższym rysunku, gdzie dla uproszczenia zredukowaliśmy układy odniesienia x i x' tylko do jednego wymiaru, umożliwiając pomiar położenia wzdłuż osi ruchu. Przyjmijmy teraz, że zdarzenia A i B zostały uznane w układzie x za jednoczesne. Znaczący to, że w układzie x zdarzenie spotkania sygnałów świetlnych wysłanych z A i B zostało zlokalizowane w połowie odległości między A i B . Dokładniej, obserwator w układzie x ustala położenie (współrzędną) zdarzenia A i B na podstawie bezpośredniej koincydencji ze swoją „siatką” (położenia te na rysunku wypadają odpowiednio w punktach a i b), a następnie ustala, gdzie zetknęły się promienie świetlne (punkt c). Jak natomiast będzie wyglądała cała sytuacja z punktu widzenia układu x' ? I tutaj obserwator przypisze odpowiednie położenia zdarzeniom A oraz B (punkty a' i b' , *nota bene* koincydujące w chwili dokonania pomiaru z punktami a i b). Ponieważ jednak x' porusza się względem x , a sygnały świetlne rozchodzą się ze skończoną prędkością, układ x' przesunie się nieco w prawo i punkt spotkania obu sygnałów wypadnie względem niego nie w środku między a' i b' , ale w punkcie c' bliższym punktowi a' . Zatem z punktu widzenia obserwatora x' zdarzenia A i B nie zaszły równocześnie — to B wyprzedziło A .



Warto zwrócić uwagę, że sytuacja obu układów jest dokładnie symetryczna. Nasz sposób przedstawienia tej sytuacji może sugerować, że pierwszy układ naprawdę spoczywał, a drugi poruszał się względem niego, co u Czytelnika może wywołać wrażenie, że opis zdarzeń A i B z punktu widzenia x' jest „zaburzony” i że rację ma tylko obserwator x . Jednak jest to błędny wniosek. Równie dobrze można przyjąć, że to x' spoczywa, a x porusza się w lewo. Samo zajście zdarzeń A i B nie wyznacza żadnego sposobu na absolutne ustalenie ich miejsca zajścia — inne będzie ich miejsce w x , a inne w x' . Nie ma fizycznego sposobu na ustalenie, który obserwator wyznaczył „prawdziwszą” lokalizację obu zdarzeń. Jeśli mimo to mamy skłonność uważać, że jest inaczej, to tylko dlatego, że wyobrażamy sobie, iż A i B zaszły na jakichś rzeczach (np. spoczywających na powierzchni Ziemi) i że tylko jeden z tych dwóch układów określa właściwie ich lokalizację — ten, który spoczywa względem powierzchni Ziemi. Właśnie aby uniknąć takich skojarzeń, wybraliśmy przykład ze zdarzeniami zachodzącymi w pustej przestrzeni.

Czytelnik lepiej zorientowany w fizyce może jednak postawić nam następujący zarzut. Proponowana przez nas definicja jednoczesności jest najwyraźniej niepoprawna, gdyż nie bierze pod uwagę jednego faktu — tego mianowicie, że prędkości się sumują. Wiemy dobrze — powołyaliśmy się zresztą na podobny przykład — że jeśli np. jadące w przeciwnych kierunkach dwa samochody mijają się, to prędkość jednego z nich widziana z samochodu drugiego będzie sumą obu prędkości (względem powierzchni Ziemi). Jeżeli natomiast jadą one w tym samym kierunku, ich względna prędkość będzie różnicą prędkości. Zatem — można by kontynuować ów argument — obserwacja wykonana w układzie x' jest niepoprawna, bo z punktu widzenia tego układu promień światła biegnący z B jest za szybki, a z A za wolny. W szczególności, gdyby układ x' poruszał się z prędkością światła, to spotkanie obu sygnałów wypadłoby w samym punkcie a' ! Nic więc dziwnego, że rezultaty zastosowania zaproponowanego kryterium jednoczesności są tak zaskakujące. Wynika to jednak z tego, że zostało przez nas przyjęte błędne założenie dotyczące prędkości światła rozpatrywanej w dwóch różnych układach odniesienia.

Na tak postawiony zarzut można udzielać różnych odpowiedzi, mniej lub bardziej wyczerpujących. Można po pierwsze, dość lekceważąco stwierdzić, że nasza definicja jednoczesności jest

konwencją, a konwencje wolno sobie wybierać według własnego uznania, nie oglądając się na zdroworozsądkowe intuicje ani żadne inne argumenty. Taka odpowiedź jednak nie byłaby zbyt przekonująca. Stwierdziliśmy wcześniej, że pojęcie jednoczesności ma jednak pewne ustalone znaczenie w języku potocznym. W szczególności potoczne rozumienie jednoczesności nie zakłada żadnej formy jej relatywizacji do obiektu ani układu. Jeśli z przyjętej przez nas definicji wynika taka relatywizacja, to muszą za tym kryć się jakieś poważne powody. Nie można powoływać się tutaj wyłącznie na swobodę w przyjmowaniu definicji.

Nieco trafniejszą odpowiedzią byłoby powołanie się na nieistnienie lepszej definicji. Jeśli komuś nie podoba się zaproponowane pojęcie jednoczesności, to proszę bardzo — niech wymyśli lepsze. Musi być jednak spełniony jeden warunek: definicja taka powinna być stosowalna w praktyce. Nie można w niej powoływać się na żadne absolutne pojęcia przestrzenne, jeśli nie poda się ich sensu doświadczalnego. Jak argumentowaliśmy wyżej, określenie jednoczesności w sposób absolutny natrafia na trudności, których nie udało się jak do tej pory pokonać nikomu. Zatem jeśli nikt nie ma lepszej definicji do zaproponowania, to stosujemy tę, którą sformułowaliśmy powyżej.

Wreszcie można wskazać bezpośrednio na słabości sformułowanego argumentu przeciwko naszej definicji. Argument ten powoływał się na zasadę składania prędkości, znaną z fizyki klasycznej. Skąd jednak wiemy, że zasada ta obowiązuje uniwersalnie? Aby sprawdzić jej ważność np. dla promieni świetlnych, musielibyśmy dysponować absolutną metodą mierzenia prędkości światła w każdym układzie odniesienia. Metoda taka jednak zakłada, że wiemy już, które zdarzenia są równoczesne (potrzebne to jest np. do tego, aby zsynchronizować ze sobą zegary, które określają moment wyjścia promienia świetlnego z danego punktu i moment jego dojścia do innego punktu). Jednak bez definicji jednoczesności zrobić tego się nie da.

Promienie świetlne to nie tylko wygodny dla nas sposób przekazywania informacji czy dowiadywania się o zdarzeniach zachodzących nawet w odległych częściach Wszechświata. Światło to także przedmiot badań teorii fizycznych, między innymi teorii elektryczności i magnetyzmu. Dzięki pracom m.in. J. C. Maxwella wiemy, że światło to fala elektromagnetyczna. Maxwell przy pomocy swoich równań, ujmujących zjawiska elektromagnetyczne.

był w stanie wyprowadzić również matematyczny opis rozchodzenia się fal elektromagnetycznych. Charakterystyczne w tym opisie było to, że pojawiał się tam współczynnik c o wymiarze prędkości. Został on dość szybko zinterpretowany jako prędkość rozchodzenia się fal elektromagnetycznych. Nasuwa się jednak pytanie: prędkość względem jakiego układu odniesienia? Przecież z naszych rozważań wiemy już, że pojęcie prędkości jest relatywne. Spoczywając względem powierzchni Ziemi jednocześnie poruszamy się z zawrotną prędkością względem obiektów astronomicznych. Czy więc równania Maxwella wyróżniają pewien szczególny układ odniesienia, względem którego należy rozpatrywać rozchodzenie się światła?

Tak właśnie myśleli fizycy — tego samego zdania był też sam Maxwell. Wysłano nawet hipotezę, że ten wyróżniony układ odniesienia musi być wyznaczony przez ośrodek, w którym rozchodzą się fale elektromagnetyczne, zwany „eterem”. Niestety, jak już sygnalizowaliśmy w pierwszym rozdziale, żadne dane eksperymentalne nie potwierdzają istnienia eteru, a spektakularnym przykładem obalenia tej hipotezy było doświadczenie Michelsona-Morleya. W rezultacie zostaliśmy znów z pytaniem, jak należy rozumieć prędkość występującą w równaniach Maxwella. W tym momencie pojawia się zaskakująca możliwość: być może prędkość światła jest niezależna od układu odniesienia, tj. dla każdego obserwatora światło porusza się jednakowo? Taka hipoteza może wydawać się zbyt śmiała, ale zwróćmy uwagę, że przyjęcie jej dawałoby nam gwarancję poprawności sformułowanej wyżej definicji jednoczesności. Argument ze składania prędkości przestałby bowiem mieć moc obowiązującą. Z punktu widzenia obu układów odniesienia, x i x' , promienie świetlne wysyłane ze zdarzeń A i B miałyby stale tę samą prędkość, niezależnie od tego, jak szybko porusza się jeden układ względem drugiego.

Sceptyk jednak może zapytać: jak to możliwe, aby prędkość światła była stała we wszystkich układach odniesienia, skoro niedawno rozważaliśmy np. hipotetyczny układ odniesienia, który by sam poruszał się z prędkością światła. W takim układzie oczywiście światło by musiało spoczywać! Argument ten jest trafny, ale wynika z niego jedyny wniosek — jeśli chcemy przyjąć założenie o stałości prędkości światła, musimy zgodzić się na to, że układy odniesienia poruszające się z prędkością światła nie istnieją. To znaczy, mówiąc precyzyjniej, nie jest możliwe, aby

istniały dwa układy odniesienia poruszające się względem siebie z prędkością światła, gdyż jeśli w jednym prędkość światła wynosiłaby c , to w drugim byłaby ona równa 0.

W istocie założenie stałości prędkości światła we wszystkich układach odniesienia jest—paradoksalnie—jedynym sposobem na uratowanie względności ruchu. Gdyby bowiem światło w różnych układach biegło z inną prędkością, to można by w sposób absolutny różnicować między układami. Dokładniej, można by przyjąć, że układ znajdujący się w absolutnym spoczynku to taki układ, w którym prędkość światła wynosi c (stała z teorii elektromagnetyzmu), a każdy układ, w którym prędkość ta jest inna, porusza się w sensie absolutnym z odpowiednią prędkością. Jeśli natomiast prędkość światła jest stała, to nic nie wyróżnia żadnego z dwóch układów, z których jeden porusza się względem drugiego, a zatem każdy obserwator może w równie uzasadniony (a raczej w równie nieuzasadniony) sposób argumentować, że to on spoczywa, a drugi się porusza.

Cała szczegółna teoria względności to w istocie nic innego, jak — znów paradoksalnie — przyjęcie fundamentalnego założenia o niezmienniczości, czyli absolutności prędkości światła. Wynika z niego od razu nasze kryterium jednoczesności, ale wynikają także inne „nieintuicyjne” konsekwencje. Niektóre z nich przedstawimy w końcowych fragmentach niniejszego rozdziału. Zaczniemy może od dość oczywistej konsekwencji przyjętej przez nas definicji jednoczesności. Jeżeli zdarzenia równoczesne w jednym układzie nie są równoczesne w innym, to łatwo domyślić się, że kolejność zachodzenia zdarzeń też może zależeć od układu odniesienia. To znaczy możliwa jest sytuacja, że zdarzenie A jest względem pewnego układu x wcześniejsze od zdarzenia B , a względem układu x' to B jest wcześniejsze od A . (Wystarczy tylko dla zdarzeń A i B równoczesnych w pewnym układzie odniesienia x^0 wybrać dwa inne układy—jeden poruszający się względem x^0 wzdłuż osi łączącej A i B w kierunku A , a drugi w kierunku B . W pierwszym z tych dwóch układów zdarzenie A będzie wcześniejsze od B , a w drugim na odwrót.) Taka ewentualność może jednak wydawać się absurdalna. Czy możliwe jest, aby w jednym układzie najpierw został pociągnięty spust pistoletu, a potem kula trafiła w tarczę, podczas gdy w innym układzie to samo trafienie w tarczę byłoby wcześniejsze od pociągnięcia za spust?

Czy jednak przyczyna może być późniejsza od skutku? Sytuacja taka zakrawa na jawny paradoks.

Na szczęście paradoks „odwróconej” przyczynowości jest do uniknięcia. Aby to zobaczyć, rozważmy ogólnie parę zdarzeń A i B takich, że w jednym układzie A jest wcześniejsze od B , a w drugim B jest wcześniejsze od A . Sytuacja taka jest możliwa tylko wtedy, gdy w jeszcze innym układzie odniesienia A i B zostały uznane za jednoczesne. Można fakt ten ująć ogólnie: zawsze, gdy dwa zdarzenia z punktu widzenia dwóch różnych układów „zamieniają się” kolejnością czasową, istnieje układ, w którym są one równoczesne. Teraz przypomnijmy sobie, co to znaczy, że dwa zdarzenia są równoczesne. Z definicji jednoczesności wynika, że promień świetlny wysłany ze zdarzenia A spotka się (w danym układzie odniesienia) w połowie drogi z promieniem wysłanym ze zdarzenia B . W innym układzie to spotkanie może wypaść nie w połowie drogi, ale w każdym razie gdzieś pomiędzy A i B promienie te muszą się zetknąć. Jakie to ma jednak konsekwencje? Otóż znaczy to, że promień światła wychodzący z A nie zdąży dotrzeć do B i na odwrót — promień wychodzący z B nie dojdzie do A . To znaczy, oczywiście, promień może dojść do miejsca (miejsca zdefiniowanego w pewnym układzie odniesienia, rzecz jasna), w którym zaszło B , ale samego zdarzenia B już tam na pewno nie będzie.

Mówiąc w skrócie — jeżeli zdarzenia A i B są w pewnym układzie jednoczesne, to znaczy to, iż zaszły ono zbyt daleko względem siebie, aby promień świetlny wychodzący z jednego z nich mógł osiągnąć drugie. Ale w takim razie przykład z pociągnięciem za spust i trafieniem kuli w tarczę nie podpada pod tę kategorię zdarzeń. Ewidentnie bowiem między pociągnięciem za spust a trafieniem kuli w tarczę rozpościera się pewien ciąg zdarzeń w istocie dużo wolniejszy od prędkości światła (np. prędkość lotu kuli jest nieporównywalnie mniejsza od prędkości światła). Promień światła wysłany w momencie pociągnięcia za spust osiągnąłby tarczę na długo przed trafieniem w nią kuli. Zatem nie musimy się obawiać, że w pewnym układzie odniesienia kolejność obu zdarzeń zostanie odwrócona, skoro nawet nie istnieje układ, w którym oba te zdarzenia byłyby równoczesne. Relatywność następstwa czasowego dotyczy, jak widać, tylko pewnej szczególnej klasy par zdarzeń.

Przykład z pociągnięciem za spust i trafieniem w tarczę można uogólnić na inne przypadki związków przyczynowych. We wszystkich przypadkach zachodzenia związku przyczynowego, z którymi się stykamy, między przyczyną a skutkiem zachodzi pewne oddziaływanie rozchodzące się co najwyżej z prędkością światła. Dla takich jednak zdarzeń, które mogą być połączone sygnałem wolniejszym lub dorównującym prędkością światła, nie można znaleźć układu, w którym byłyby one równoczesne, a zatem także i układu, w którym ich kolejność byłaby odwrócona. Istnieje więc absolutne następstwo czasowe, choć stosuje się ono tylko do zdarzeń na tyle bliskich przestrzennie od siebie (lub na tyle odległych czasowo), że jedno może być osiągnięte sygnałem wysłanym z drugiego. Jeśli zatem przyjmiemy założenie, jak dotąd nie zakwestionowane przez nikogo², że związki przyczynowe mogą być przenoszone tylko z prędkością co najwyżej równą prędkości światła, to nie ma obaw, aby przyczyna „zamieniła się” kolejnością ze skutkiem.

Zajmijmy się teraz pytaniem, jak w ujęciu relatywistycznym wygląda ogólna charakterystyka czasu i przestrzeni. Pamiętamy, że w klasycznej Newtonowskiej koncepcji czasoprzestrzeń dawała się rozłożyć w naturalny sposób na część czysto przestrzenną i część czysto czasową. Dokładniej, w czasoprzestrzeni klasycznej wyróżnialiśmy warstwy zdarzeń równoczesnych, interpretowane jako kolejne „stadia” przestrzeni, a czas był po prostu tożsamy z absolutnym uporządkowaniem tychże warstw. Ten obraz czasoprzestrzeni podzielonej na osobno ujmowaną przestrzeń i czas załamuje się jednak z powodu nieistnienia absolutnej jednoczesności, a zatem także absolutnej warstwy zdarzeń teraźniejszych. Podział czasoprzestrzeni na warstwy jednoczesności możliwy jest teraz tylko ze względu na pewien układ odniesienia. Warstwa zdarzeń jednoczesnych względem jednego układu odniesienia nie pokrywa się jednak z warstwą zdarzeń jednoczesnych względem drugiego układu. W konsekwencji także i czas, ujmowany jako uporządkowany zbiór takich warstw, zależy od przyjętego układu odniesienia.

Jednakże nawet w ujęciu relatywistycznym pewne elementy charakterystyki czasowej zdarzeń są absolutne. Wskazywaliśmy już wyżej, że dla pewnych par zdarzeń ich następstwo czasowe

jest niezależne od wyboru układu odniesienia. Zdarzenia takie to te, które mogą być połączone sygnałem poruszającym się z prędkością nie większą od prędkości światła. W szczególności warunki ten spełniają zdarzenia należące do jednej i tej samej rzeczy — np. dwudzieste urodziny Jana w każdym układzie odniesienia wypadają wcześniej niż jego urodziny trzydzieste. Zatem w odniesieniu do danego zdarzenia z można mówić o fragmencie czasoprzestrzeni, zawierającym wszystkie zdarzenie późniejsze od niego w każdym układzie odniesienia. Ten zbiór zdarzeń tworzy *przyszłość absolutną* danego zdarzenia. Oprócz przyszłości absolutnej można analogicznie zdefiniować *przeszłość absolutną* danego zdarzenia z, czyli zbiór wszystkich zdarzeń absolutnie wcześniejszych od z. Natomiast, jak już mówiliśmy, nie można zdefiniować absolutnej *teraźniejszości* danego zdarzenia. Obszar czasoprzestrzeni, obejmujący wszystkie zdarzenia nie będące ani w absolutnej przyszłości, ani w absolutnej przeszłości względem zdarzenia z, nie tworzy absolutnej teraźniejszości. Jest tak dlatego, że jeżeli jakieś zdarzenie należy do tego obszaru, to w pewnym układzie odniesienia będzie ono równoczesne z z, w innym będzie od niego wcześniejsze, a w jeszcze innym późniejsze. Podkreślmy jeszcze raz, że takie zdarzenie nie może być połączone bezpośrednio żadnym sygnałem ze zdarzeniem z, gdyż w przeciwnym razie mielibyśmy do czynienia z paradoksem odwróconej przyczynowości.

Inne konsekwencje przyjętej przez nas teorii relatywistycznej wymagałyby do swojego przedstawienia wprowadzenia bardziej ścisłego opisu matematycznego. W szczególności można na podstawie prostego rachunku przekonać się, że określenie długości (miary) interwału czasowego między dwoma zdarzeniami zależy również od układu odniesienia. Fakt ten określa się często mianem „dylatacji czasu” i przedstawia się go — niestety myląc dla laików — w twierdzeniu, iż w układzie poruszającym się z pewną prędkością procesy płyną wolniej w stosunku do układu nieruchomego. Takie sformułowanie może sugerować, że mamy oto sposób na odróżnienie ruchu absolutnego i spoczynku absolutnego — układ spoczywający absolutnie byłby układem, w którym zegary chodziłyby najszybciej w stosunku do zegarów innych układów. W istocie jednak sytuacja dwóch poruszających się względem siebie układów jest zupełnie symetryczna, zgodnie z zasadą względności ruchu. Jeśli rozpatrzemy proces wyznaczo-

² Z pewną próbą takiego zakwestionowania spotkamy się w rozdziale 10.

ny dwoma zdarzeniami A i B spoczywającymi względem układu odniesienia x , to okazuje się, że interwał czasu między A i B mierzony względem układu x' poruszającego się w stosunku do x będzie krótszy niż interwał zmierzony w układzie x . Jednakże zdarzenia A i B , jak łatwo się domyślić, nie spoczywają względem x' . Aby zachować symetrię, trzeba teraz rozpatrzeć dwa zdarzenia A' i B' spoczywające względem x' . W takiej sytuacji interwał czasowy między A' i B' w układzie x będzie — całkowicie symetrycznie — krótszy niż mierzony w układzie x' . Widać więc, że żaden proces fizyczny nie wyróżnia któregoś z układów — oba są w identycznych, równouprawnionych sytuacjach. Zasada względności ruchu nie została złamana.

W popularnych ujęciach teorii względności — pisanych zresztą nierzadko przez wybitnych fizyków — można często znaleźć spekulacje na temat tego, jaki wpływ fizyczny wywierać może na obserwatora fakt, że układ, w którym się on znajduje został rozpędzony do prędkości bliskiej prędkości światła. Mówi się zatem o zwiększeniu masy, „rozpłaszczeniu” przedmiotów w kierunku ruchu, spowolnieniu zegarów itd. Czasem dodaje się do tego uwagę, że wszystkie te efekty nie byłyby możliwe do zaobserwowania przez obserwatora, ze względu na ich efektywne „kaszowanie się” — np. wzrost masy byłby nie do stwierdzenia ze względu na identyczny wzrost masy urządzeń pomiarowych. Mało kto z czytelników jednak uświadamia sobie, że my również jesteśmy takimi obserwatorami, którzy poruszają się z prędkością podświetlną! Na przykład „z punktu widzenia” przelatującej w pobliżu Ziemi rozpędzonej cząstki, nasza planeta porusza się właśnie z taką niewiarygodną prędkością. Opis fizyczny zrelatywizowany do układu odniesienia związanego z taką cząstką jest pełnoprawnym opisem, dokładnie tak samo, jak opis zrelatywizowany do układu odniesienia, w którym spoczywamy. Jak zatem czujecie się Państwo, pędząc z prędkością bliską prędkości światła? Prawda, że nic nie znać? Otóż na tym właśnie polega względność ruchu: nic fizycznie nie odróżnia układy „poruszające się” od układów „spoczywających”. Wspomniane wyżej efekty: zwiększenie masy, skrócenie długości, spowolnienie zegarów, mają charakter relatywny, tj. ujawniają się tylko, kiedy porównujemy ze sobą wskazania instrumentów dwóch układów odniesienia. Wzrost masy poruszających się względem nas przedmiotów jest obserwowany w naszym układzie — ale z punktu widzenia tych

przedmiotów to my stajemy się coraz ciężsi! Obie te tezy są równie prawdziwe, bo w istocie jedna nie przeczy drugiej. Wszystko to wynika natychmiast z przyjętej przez nas na samym początku zasady względności ruchu, która jest kamieniem węgielnym współczesnych rozważań fizycznych i która — konsekwentnie zastosowana — prowadzi do radykalnych wniosków na temat istoty czasu i przestrzeni, z których część przedstawiliśmy w niniejszym eseju.

Literatura zalecana

Wprowadzenia do teorii względności można znaleźć w wielu źródłach. Eleganckie sformułowanie teorii względności, ilustrowane przystępnie diagramami czasoprzestrzennymi, oferuje pierwszy rozdział podręcznika:

B. F. Schutz, *Wstęp do ogólnej teorii względności*, PWN, Warszawa 1995.

Teoria względności sugeruje, że podstawowymi składnikami rzeczywistości są nie rzeczy, a zdarzenia. Stanowisko ontologiczne, które przyjmuje takie założenie, nosi nazwę „ewentyzmu” (od łac. *eventum* — zdarzenie). Warto zajrzeć do jednej z prac czołowego przedstawiciela i badacza ewentyzmu w Polsce, zamieszczonych w tomie:

Z. Augustynek, *Czasoprzestrzeń. Eseje filozoficzne*, WFiS, Warszawa 1997.