

Claus Kiefer

# KWANTOWY KOSMOS

Od wczesnego świata  
do rozszerzającego się uniwersum

tłumaczenie  
Michał Tęcza

## Od przestrzeni i czasu do czasoprzestrzeni: szczególna teoria względności Einsteina

W swoim *Dialogu o dwu najważniejszych układach świata: ptolemeuszowym i kopernikowym* z 1632 roku (wg przekładu Edwarda Ligockiego, 1962) Galileusz opisuje interesujący eksperyment myślowy. Parę osób ma zgromadzić się w zamkniętym pomieszczeniu pod pokładem nieporuszającego się statku i przeprowadzić kilka obserwacji oraz eksperymentów mechanicznych (np. eksperymenty z rzutami). Potem, jak mówi Galileusz głosem swojego alter ego Salviatego: „(...) pozwólcie popłynąć statkowi z dowolną prędkością. Nie dostrzeżecie u wszystkich wymienionych zjawisk żadnej zmiany, o ile ruch będzie jednostajny i pozbawiony kołysania. Z żadnego z nich nie wywnioskujecie, czy statek stoi, czy płynie”. W ten sposób Galileusz opisał *zasadę względności* mechaniki. W skrócie zasada ta postuluje równoważność wszystkich układów inercjalnych, to znaczy niemożliwość wyodrębnienia określonego układu inercjalnego na podstawie przeprowadzonych pomiarów mechanicznych.

Pytanie, czy zasada względności obowiązuje także w odniesieniu do zjawisk niemechanicznych, naprowadziło Alberta Einsteina (1879–1955) w 1905 roku na jego *szczególną teorię względności*. Kluczem do odpowiedzi na to pytanie były fale elektromagnetyczne. Zalicza się do nich w szczególności rozchodzenie się światła. Na początku XIX wieku dołączono do tego obraz fal, choć wówczas traktowano światło jako byt odrębny od zjawisk elektrycznych i magnetycznych. W tym czasie wyobrażano sobie, że do rozchodzenia się fal może dochodzić wyłącznie za pośrednictwem jakiegoś drgającego nośnika.

W falach wodnych drgają pojedyncze cząsteczki wody, a w przypadku fal dźwiękowych w powietrzu poszczególne cząsteczki powietrza. Co zatem drga podczas rozchodzenia się światła? Z uwagi na to, że nie stwierdzono obecności żadnego oczywistego nośnika, opierając się przy doborze słów na Arystoteleś, postulowano istnienie hipotetycznego *eteru*, który jest rozpowszechniony we wszechświecie w równomiernym stopniu i przenika każdą zwykłą materię. Z obserwacji duńskiego astronoma Olego Rømera (1644–1710) z lat 1672–1676 wiedziano już wtedy, że światło charakteryzuje się wprawdzie skończoną, ale bardzo wysoką prędkością. W 1672 roku Rømer stwierdził bowiem, że odległość Ziemi od Słońca (dziś określana mianem jednostki astronomicznej) można uznać za wystarczającą miarę do określenia prawdopodobnie skończonej prędkości światła. Rømer obliczył prędkość światła na podstawie przesunięcia w czasie, jakie zaobserwował podczas zaćmień księżyców Jowisza. Opóźnienia te wynikają ze zróżnicowanego czasu potrzebnego światłu na pokonanie dystansu z Jowisza do Ziemi, gdy Ziemia znajduje się w różnych punktach na swojej orbicie wokół Słońca. Dzisiejsza wartość prędkości światła w próżni wynosi prawie 300 000 kilometrów na sekundę – wartość tę wyraża się w skrócie za pomocą litery *c*. Przy tak dużej prędkości eter musiałby wykazywać niezwykłą wytrzymałość. Poza tym jak miałby być mimo to niewidoczny?

Jeśli ktoś porusza się z określoną prędkością względem eteru, powinien zarejestrować tym samym zmienioną prędkość światła, zmniejszoną lub powiększoną o prędkość własną. Z uwagi na to, że Ziemia na swojej rocznej orbicie wokół Słońca zmienia w szczególności kierunek swej prędkości, zjawisko to powinno wyrażać się w rocznych wahaniach mierzonej prędko-

ści światła. Oczywiście można sobie także wyobrazić, że Ziemia wraz ze swoją atmosferą ciągnie za sobą eter i dlatego nie można zmierzyć zróżnicowanej prędkości światła. Przeciwno tej hipotezie świadczyła jednak aberracja światła – fenomen znany już od 1728 roku. Pod tym pojęciem rozumiane jest przesunięcie pozycji gwiazd, spowodowane rocznymi zmianami prędkości Ziemi (nie zmianami jej położenia). Jeżeli zatem ruch światła przebiegał w eterze, Ziemia nie mogła ciągnąć ze sobą eteru, a już z pewnością nie w całości. Żadna z prób potwierdzenia ruchu względem eteru nie powiodła się.

Problem stał się bardziej palący, gdy udało się opracować jednolitą teorię dla wszystkich zjawisk elektrycznych i magnetycznych, czyli elektrodynamikę. Jej podstawowe równania zostały opublikowane w 1873 roku przez Jamesa Clerka Maxwella (1831–1879) w słynnym dziele na temat elektryczności i magnetyzmu *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Jedną z najważniejszych prognoz równań Maxwella było istnienie fal elektromagnetycznych, które rozprzestrzeniają się z prędkością światła  $c$ . Szczególnym przypadkiem fali elektromagnetycznej okazało się światło. Bezpośredni dowód na istnienie fal elektromagnetycznych przyniosły epokowe eksperymenty Heinricha Hertza (1857–1894) z 1887 roku, które pomogły teorii Maxwella w dokonaniu przełomu. Stały się także początkiem bezprzewodowego przekazywania informacji – już w 1901 roku można było przesyłać fale radiowe przez Atlantyk.

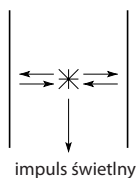
Równania Maxwella zdawały się obowiązywać jednak tylko w jednym określonym układzie odniesienia – w „układzie eterycznym”, w którym światło rozprzestrzenia się z prędkością  $c$ . Czy zatem zasada względności Galileusza nie obowiązuje w przypadku zjawisk elektrodynamicznych? Choć

nieświadomie, to pytanie zadawał sobie już szesnastoletni Einstein w szkole kantonalej w Aarau. Później pisał o tym tak: „Podczas tego roku spędzonego w Aarau przyszło mi do głowy pytanie: gdyby tak pobiec za falą świetlną z prędkością światła, to miałyby się przed sobą niezależne od czasu pole falowe. Jednak wygląda na to, że coś takiego nie istnieje! Był to pierwszy dziecięcy eksperyment myślowy, mający związek ze szczególną teorią względności. Odkrywanie nie jest dziełem logicznego myślenia, choć produkt końcowy jest powiązany z formą logiczną”. Takie niezależne od czasu pole falowe nie jest wynikiem równania Maxwella – podejrzewano naruszenie zasady względności.

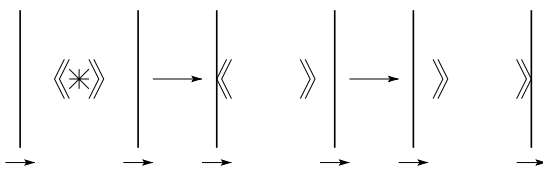
Szczególne teoria względności Einsteina z 1905 roku powstała z próby połączenia ze sobą zasady względności z elektrodynamiką. Einstein uważał, że wszystkie zasady fizyki, nie tylko mechaniczne, powinny mieć tę samą formę we wszystkich układach inercjalnych. Układ inercjalny można uzyskać za pomocą wyżej opisanej metody Langego lub przez odniesienie do układu pozagalaktycznych fal radiowych, czyli *International Celestial Reference System*.

Jak zasada względności ma się jednak do prędkości światła  $c$  w równaniach Maxwella? Czy właśnie podczas przejścia do innego układu inercjalnego prędkość światła nie ulegnie zmianie? Z uwagi na to, że wszystkie próby udowodnienia ruchu względem eteru spęły na niczym, Einstein stwierdził po prostu, że prędkość światła we *wszystkich* układach inercjalnych równa się  $c$ . Sam eter stał się wielkością zbędną, którą bez wątpliwości można było wyeliminować z fizyki. To, że postulat niezmiennego prędkości światła da się pogodzić z zasadą względności, Einstein wykazał poprzez dokładną analizę pojęcia czasu: w przy-

padku dwóch zdarzeń, do których dochodzi w różnych miejscach, nie można powiedzieć, że następują one w tym samym czasie. Najlepiej pokazać to na prostym przykładzie (rys. 1.2).



1.2 a). Statyczne lustra równoległe



1.2 b). Równoległe lustra poruszające się ze stałą prędkością w prawą stronę

Widzimy dwa ustawione pionowo lustra, które są równoległe względem siebie i poruszają się w prawo ze stałą prędkością. W środku, między lustrami, znajduje się źródło światła, z którego równocześnie wysyłane są impulsy świetlne w przeciwnych kierunkach – w stronę luster. Przypatrzmy się najpierw obserwatorowi, który nie porusza się względem luster. Obserwator ten rejestruje równoczesne dotarcie impulsów światła do luster (rys. 1.2 a). Jeśli jednak spojrzeć na to z zewnątrz, widać, że jeden impuls przemieszcza się do najbliższego lustra i dociera do niego, *zanim* drugi impuls dotrze do drugiego lustra. Powodem tego jest prędkość światła, która zawsze wynosi  $c$  (rys. 1.2 b). Zewnętrzny obserwator nie dostrzeże zatem równoczesnego dotarcia impulsów światła do luster. Po odwróceniu sytuacji oba

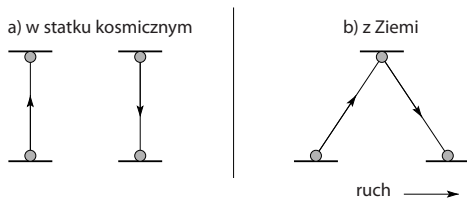
impulsy powracają równocześnie do środka. Równoczesność ta dotyczy tym razem obu obserwatorów – równoczesność w tym samym punkcie przestrzeni jest więc w dalszym ciągu absolutna.

W przeciwieństwie do mechaniki Newtona nie istnieje zatem równoczesność absolutna! Po tym odkryciu siły Newtona działające na odległość zostały zapomniane. W przypadku oddziaływania elektromagnetycznego stało się oczywiste, że zakłócenia rozchodzą się w formie fal elektromagnetycznych z prędkością światła  $c$ . Do losów wyobrażenia Newtona o natychmiastowo oddziałującej sile ciężkości jeszcze wrócimy. W świecie fizyki pojawiło się pojęcie *pola*, które, jak się później okazało, stało się kluczowe dla dalszego rozwoju nauki. Początkowo mówiono jedynie o dwóch siłach: sile między dwiema masami lub sile między dwoma ładunkami elektrycznymi. Michael Faraday (1791–1867) wprowadził do opisu swoich eksperymentów pojęcie „linii pola siłowego” i tym samym uniezależnił je od sił oddziałujących na ładunki. Pole elektryczne i pole magnetyczne posiadają własną rzeczywistość. Maxwell i Faraday mogli je sobie wyobrazić wyłącznie w odniesieniu do materialnej substancji nośnej, czyli właśnie eteru. We współczesnym ujęciu podstawowe pola zdefiniowane są bezpośrednio w przestrzeni i czasie bez posilkowania się nośnikiem. Odrzucenie takiego nośnika było jednym z największych i najtrudniejszych dokonań w rozwoju fizyki.

Rezygnacja z koncepcji równoczesności absolutnej ma zasadnicze znaczenie dla zależności między przestrzenią a czasem. Podczas przejścia z jednego układu inercjalnego do drugiego zmieniają się współrzędne przestrzeni  $i$  współrzędna czasu. W mechanice klasycznej czas pozostaje niezmienny. Konsekwencją tej mieszanki przestrzeni i czasu jest *dylatacja czasu*.

Zegar poruszający się względem innego zegara porusza się wolniej względem niego. Najłatwiej będzie pokazać ten stan rzeczy za pomocą zegara świetlnego, z którym spotkaliśmy się już wcześniej w nieco zmienionej formie (zob. rys. 1.3).

Każdy zegar opiera się na okresowym przebiegu. W zegarze świetlnym promień świetlny odbijany jest na przemian między dwoma lustrami. Ten naprzemienny ruch odpowiada w pewnym sensie „tykaniu” zegara. Wyobraźmy sobie, że zegar znajduje się we wnętrzu statku kosmicznego, oddalającego się od Ziemi ze stałą prędkością. W przeciwieństwie do rysunku 1.2 ruch powinien przebiegać równoległe do luster. W układzie spoczynkowym statku kosmicznego promień świetlny porusza się prostopadle do luster. W tym celu potrzebny jest określony czas (rysunek z lewej). Jeśli całą tę sytuację obserwujemy z Ziemi, okazuje się, że promień świetlny biegnie ukośnie i musi przebyć dłuższą drogę (rysunek z prawej). Skoro prędkość światła jest zawsze taka sama, promień świetlny potrzebuje do przebycia dłuższej drogi także więcej czasu, a więc „zegar” porusza się wolniej. Analogicznie będzie oczywiście w przypadku zegara świetlnego umieszczonego na Ziemi i obserwowanego ze statku kosmicznego. Zjawisko to dotyczy wyłącznie ruchu *względego*.



1.3. Zegar świetlny



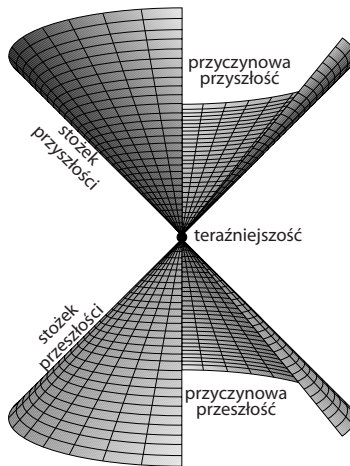
W związku z zasadą względności każdy poruszający się zegar musi spóźniać się o tę samą wartość. W przeciwnym wypadku poprzez porównanie różnych zegarów w ramach układu inercjalnego można byłoby stwierdzić, z jaką prędkością absolutną porusza się dany układ, co byłoby niezgodne z zasadą względności. Dylatacja czasu jest właściwością ruchu względnego w przestrzeni i czasie i nie zależy od specjalnych zegarów. Analogiczny efekt dotyczy także przestrzeni. Okazuje się, że linijka poruszająca się względem spoczywającej linijki o takiej samej długości jest krótsza. Te i inne zjawiska szczególnej teorii względności zostały dokładnie zbadane i potwierdzone dzięki wielu eksperymentom przeprowadzonym po 1905 roku. W przypadku niskich (w porównaniu z prędkością światła) prędkości twierdzenia teorii względności nie różnią się od twierdzeń mechaniki klasycznej. Z uwagi na to, że w historycznych eksperymentach i obserwacjach życia codziennego mamy do czynienia wyłącznie z niskimi prędkościami, staje się jasne, dlaczego zjawiska tego typu nie odgrywają tam żadnej roli.

Mianem wesołego i przekonującego określił Einstein zastosowanie zasady względności, które doprowadziło go do prawdopodobnie najsłynniejszego wzoru fizycznego, mówiącego, że energia i masa są równoważne, czyli  $E = mc^2$ . Współczynnikiem przeliczeniowym jest właśnie kwadrat prędkości światła, a zatem ogromny współczynnik, z powodu którego już małym masom odpowiadają potężne ilości energii. Wesołe i przekonujące zastosowanie zasady względności wyglądało następująco: Einstein obserwował ciało, które w swoim układzie spoczynkowym wysłał w przeciwnych kierunkach dwie fale świetlne o równej częstotliwości. Jeśli przy odpowiednim zastosowaniu równań teorii względności sytuację tę ocenia się z perspektywy układu inercjal-

nego, poruszającego się względem tego ciała, można stwierdzić, że bezwładna masa i energia muszą zostać ustalone. W znanym przykładzie rozszczepienia jądra atomowego produkty rozszczepienia są trochę lżejsze od materiału wyjściowego, co wystarcza do wyprodukowania energii w elektrowni atomowej. Później niewinna zasada względności może mieć więc bardzo poważne konsekwencje. W eksperymentach przeprowadzonych w 2005 roku między innymi w Massachusetts Institute of Technology w Stanach Zjednoczonych i w Instytucie Lauego-Langevina w Grenoble we Francji ważność słynnego wzoru Einsteina została potwierdzona przy niepewności pomiaru rzędu 0,00004 procenta. W ramach eksperymentu zmierzono utratę masy, do której dochodzi w jądrach pierwiastków krzemu i siarki podczas emitowania wysokoenergetycznego promieniowania gamma.

Bez słynnego wzoru Einsteina nie istniałoby życie na Ziemi. Niezbędna do życia energia słoneczna powstaje w drodze syntezy jądrowej, wskutek której masa przekształca się w energię. Ilość energii wyemitowanej przez Słońce na sekundę odpowiada masie 4,4 miliona ton, o którą Słońce staje się lżejsze.

Eleganckie matematyczne sformułowanie szczególnej teorii względności zaprezentował Hermann Minkowski (1864–1909), jeden z dawnych nauczycieli Einsteina na politechnice w Zurychu, w 1908 roku podczas głośnego wykładu w Kolonii. Połączył on trójwymiarową przestrzeń i jednowymiarowy czas w jeden czterowymiarowy geometryczny twór – *czasoprzestrzeń*. Na jego cześć twór ten nazywa się „przestrzenią Minkowskiego” (a dokładniej: „czasoprzestrzenią Minkowskiego”). Punkty w tej przestrzeni zwane są *zdarzeniami*. Zamiast newtonowskiej kolejności trójwymiarowych przestrzeni w czasie absolutnym (rys. 1.1) istnieje inna struktura absolutna – *stożek świetlny* (rys. 1.4).



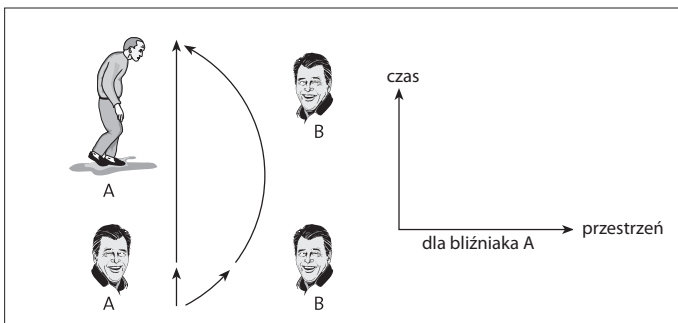
1.4. Stożek przyszłości i przeszłości zdarzenia

Stożek świetlny (a dokładniej: podwójny stożek) odnosi się do każdego zdarzenia. Charakteryzuje on wszystkie punkty w czasoprzestrzeni, do których mogą dotrzeć promienie świetlne poczynając od tego zdarzenia („stożek przyszłości”) lub które mogą one objąć, powracając do tego zdarzenia („stożek przeszłości”). Z teorii względności wynika, że ciała materialne poruszają się zawsze z prędkością mniejszą od prędkości światła, ponieważ w przeciwnym razie potrzebowałyby nieskończonej ilości energii, by osiągnąć prędkość światła. Linie świata ciał materialnych przebiegają zawsze wewnątrz stożka świetlnego. Samo światło biegnie po powierzchni bocznej stożka. Przyczynowa struktura czasoprzestrzeni Minkowskiego nadal jest absolutna, a tylko przestrzeń i czas już takie nie są. Cały obszar poza stożkiem świetlnym nazywany jest teraźniejszością, bo dla każdego zdarzenia w tym obszarze można znaleźć układ inercjalny, w stosunku do którego równocześnie następuje zdarzenie

na początku stożka świetlnego. Jest to wyrazem utraty równoczesności absolutnej. „Czasoprzestrzeń” Newtona wynika z rysunku 1.4 i powstaje po otwarciu podwójnego stożka do środka, co odpowiadałoby istnieniu nieskończonej prędkości światła.

Szczególna teoria względności zajmuje się przede wszystkim ruchem jednostajnym prostoliniowym, ponieważ w tym przypadku obowiązuje zasada względności, a przejście między różnymi układami inercyjnymi jest proste do opisanego. Teoria ta potrafi jednak również opisywać przyspieszenia, choć wiele osób przyprawia to o ból głowy. Można się o tym przekonać na przykładzie słynnego „paradoksu bliźniąt” (porównaj z rys. 1.5).

W przykładzie tym jeden z bliźniaków (na rysunku bliźniak B) opuszcza Ziemię w statku kosmicznym, podczas gdy jego brat (bliźniak A) pozostaje na Ziemi. Pasażer statku kosmicznego pędzi z ogromną prędkością w kosmos, a potem zawraca i pędzi z powrotem na Ziemię. Po powrocie stwierdza, że jego brat wygląda starzej od niego. Jak można to wyjaśnić? Z uwagi na to, że z powodu dylatacji czasu wszystkie zegary (a tym samym także wszystkie procesy fizjologiczne) w statku kosmicznym pracowały wolniej niż na Ziemi, można oczekiwać,



1.5. Paradoks bliźniąt

że astronauta w chwili swojego powrotu mniej się zestarzał. Ale czy nie działa to również w drugą stronę? Czy to właśnie nie ten bliźniak, który pozostał na Ziemi, porusza się względem brata tkwiącego w statku kosmicznym i to nie on będzie tym młodszym z nich dwóch? Haczyk w takim ciągu myślowym tkwi w tym, że astronauta doświadcza przyspieszenia, natomiast jego ziemski odpowiednik nie (w każdym razie w sporym przybliżeniu). By móc zawrócić, podróżujący bliźniak musi zmienić swoją prędkość. Zasada względności obowiązuje jednak tylko dla układów inercjalnych, a nie dla układów przyspieszonych. Z tego powodu symetria między bliźniakami jest zaburzona. Ze sformułowania Minkowskiego o czasoprzestrzeni łatwo odczytać, że ziemski bliźniak w chwili powrotu brata jest starszy. Upływający czas, który każdy z bliźniaków odczytuje na swoim zegarku (mowa tu o tak zwanym *czasie własnym*), można odczytać bezpośrednio z długości poszczególnych linii świata w przestrzeni Minkowskiego. Odwrotnie niż w klasycznej geometrii przestrzennej przyjmuje się jednak, że z największym ubytkiem czasu musi liczyć się obserwator znajdujący się na prostej linii świata. Każda krzywizna skraca czas własny. Z uwagi na to, że linia świata podróżującego bliźniaka jest zakrzywiona (zob. rys. 1.5), odpowiada jej krótszy czas własny w porównaniu z linią świata ziemskiego bliźniaka.

Nawet jeśli Einstein w odpowiedzi na matematyczne sformułowanie Minkowskiego miał stwierdzić, że nie rozumie już swojej teorii, odkąd zajmują się nią matematycy, to sam szybko podchwycił wyobrażenie czterowymiarowej czasoprzestrzeni. To właśnie ono okazało się kluczowe dla jego największego dokonania – ukończonej w 1915 roku ogólnej teorii względności i powiązanej z nią geometryzacji świata.