

WZGLĘDNOŚĆ, UKŁADY ODNIESIENIA I ISTNIENIE FIZYKI

Michał Heller

Obserwatorium Watykańskie,
V-00120 Watykan

i

Wydział Filozofii Papieskiej Akademii Teologicznej,
Kraków

1. Wprowadzenie: Relatywistyczna wizja świata

Erwin Schrödinger w swojej książce pt. *Science Theory and Man*¹ napisał: "Pierwszymi znanymi relatywistami na Zachodzie byli greccy sofiści, którzy utrzymywali, że – posługując się słowną żonglerką – są w stanie udowodnić prawdziwość dowolnego spośród dwu sprzecznych ze sobą stwierdzeń. Chociaż taka reklama mogłaby być atrakcyjna dla adwokatów i polityków, jestem skłonny przypuszczać, że autentyczne intencje sofistów były głębsze niż chęć przechwalania się zdolnościami w argumentowaniu na rzecz dowolnej tezy. Jestem przekonany, że pragnęli oni podkreślić to, iż bardzo rzadko jakieś stwierdzenie jest po prostu albo prawdziwe, albo fałszywe, ale że prawie zawsze można znaleźć taki punkt widzenia, z którego jest ono prawdziwe i taki punkt widzenia, z którego jest ono fałszywe."¹ Rzeczywiście, istnieje wiele pytań, na które nie da się odpowiedzieć prostym "tak" lub "nie".² Bardzo często odpowiedź musi zaczynać się od "to zależy". I niejednokrotnie odpowiedź zaczynająca się od "to zależy" wcale nie jest pokrywką dla naszej niewiedzy, lecz właśnie przeciwnie – jedynym środkiem do wyśłowienia prawdy. Spróbujmy na przykład odpowiedzieć na pytanie: "Czy Ziemia znajduje się w ruchu, czy spoczynku?" Oczywiście, to zależy od wyboru układu odniesienia, od tego, czy będzie on związany ze środkiem Ziemi, z nieruchomym eterem (?), ze Słońcem, czy ze środkiem Galaktyki.

Niektórzy ludzie – podobnie jak, być może, greccy sofiści – sądzą, że odpowiedź zaczynająca się od "to zależy" niszczy w zarodku samo pojęcie prawdy. Niekiedy oskarża się teorię względności, że uczy ona, iż "wszystko jest względne". Tego rodzaju oskarżenia opierają się na głębokim nieporozumieniu. W istocie, metoda jaką posługuje się teoria względności, okazuje się potężnym (i nie wykluczone, że w ogóle jedynym) narzędziem zdolnym do wyekstrahowywania niezmienniczych – a więc obiektywnych – elementów z morza danych uzyskiwanych w trakcie badania fizycznej rzeczywistości. Samą tę metodę i wyniki uzyskiwane przy jej pomocy możemy nazwać *relatywistyczną wizją świata*. Stawiam tezę, że perspektywa tej wizji jest czymś bardzo istotnym dla fizyki. Co więcej, postaram się wykazać, iż nie czemu innemu lecz właśnie tej perspektywie fizyka zawdzięcza swoje istnienie; z

¹ E. Schrödinger, *Science Theory and Man*, Dover Publ., 1957, s. 117.

² I nie są to tylko pytania typu: Czy przestał już pan brać łapówki?

ważnym zastrzeżeniem, że metoda "wyławiania niezmienników", pierwotnie wypracowana w geometrii czasoprzestrzeni, zostanie w pewien szczególny sposób rozciągnięta na inne strukturalne własności świata.

Aby przyzwyczaić oczy do tej niepowtarzalnej wizji, zastanowię się najpierw krótko nad ciągiem relatywistycznych rewolucji w historii nauki: od pierwszej rewolucji, która miała miejsce w głębokiej starożytności, poprzez rewolucje Newtona i Einsteina, które radykalnie zmieniły nasze poglądy na przestrzeń i czas, aż do współczesnych teorii cechowania, które okazują się kolejnymi ogniwami tego samego łańcucha. Perspektywy ukazywane przez ciąg tych rewolucji są naprawdę potężne: nie tylko poszerzają one nasze horyzonty, ale również skupiają nasz wzrok na ogniskowym punkcie całej fizyki – na jej ostatecznej unifikacji.

2. Czy deszcz może padać do góry?

W dedykacji swojego dzieła *De Revolutionibus* Papieżowi Pawłowi III Kopernik cytuje Laktancjusza, "ślawnego pisarza, ale pożałowania godnego matematyka", jako przestrożę dla tych wszystkich, którzy – ignorując naukę – walczą przeciwko dobrze ustalonym faktom. Laktancjusz, starożytny autor chrześcijański, wyśmiewał doktrynę głoszącą, że Ziemia "jest okrągła jak piłka", gdyż – jego zdaniem – zakładałaby ona istnienie "ludzi, których nogi byłyby ponad ich głowami", a także "deszczu, śniegu i gradu, które padałyby do góry".³

Św. Augustyn z pewnością lepiej znał grecką naukę niż Laktancjusz. Nie żywił on już żadnych naukowych obiekcji przeciwko istnieniu antypodów, ale wydawało mu się trudne do przyjęcia, by "jakiś ludzkie istoty mogły przybyć stąd aż tam, przepłynąwszy niezmierną przestrzeń oceanu, tak by potomkowie pierwszego człowieka tam się zdołali osiedlić".⁴ Stąd też jeżeli antypody istnieją, nie są zamieszkałe.

Odkrycie, że "na dół" i "do góry" są pojęciami względnymi, było pierwszą w dziejach relatywistyczną rewolucją. Nie wiemy dziś, kogo należy uznać za pierwszego relatywistę. Idea względności kierunków "dół" i "góra" była już dobrze osadzona w arystotelesowskiej fizyce i astronomii. Wiemy tylko jedno – odkrywca tej idei musiał odznaczać się niezwykłą odwagą i niezwykłą przenikliwością. Aby zobaczyć coś, czego nikt nie widzi – ba, czego tak naprawdę nie da się zobaczyć – trzeba mieć bystry i nieprzejednany umysł.

Tzw. zdrowy rozsądek często idzie w parze z brakiem wyobraźni. To właśnie miało miejsce w przypadku św. Augustyna. Jego niewiara w możliwość przepłynięcia "niezmierną przestrzeń oceanu", w porównaniu z naszymi podróżami międzyplanetarnymi, wydaje się tchórzliwa i małostkowa. Istota każdej teorii względności sprowadza się do pokonania tych bardzo ludzkich ograniczeń: trzeba wyjść poza własny punkt widzenia, by uchwycić niezmiennicze (czyli niezależne od punktu widzenia) własności świata.

Wszystkie relatywistyczne rewolucje posługują się pewną strategią. Nie jest prawdą, że w wyniku takiej rewolucji wszystkie istotne pojęcia stają się względne. Bynajmniej. Jedynie nieistotne pojęcia stają się względne, ale właśnie dzięki temu inne pojęcia ujawniają swój niezmienniczy, czyli istotny, charakter. Na skutek pierwszej relatywistycznej rewolucji pojęcia "góra" i "dół" utraciły swoje pierwotne, absolutne znaczenia: jeżeli przeniesiemy się stąd do

³ Lactantius, *Divinarum Institutionum Libri*, Liber 3, cap. 24.

⁴ *De Civitate Dei*, Liber XVI, cap. 9.

naszych antypodów, to co było "góram" stanie się "dołami", i na odwrót. Ale właśnie ta operacja ujawnia istotne (tzn. niezależne od punktu widzenia) znaczenie środka Ziemi. Od tego momentu znaczenia "góram" i "dołami" będą określane względem środka Ziemi.

Historia nauki ukazuje daleko idące skutki tej rewolucji. Jej doniosłe osiągnięcie, odkrycie istotnego znaczenia środka Ziemi, zostało wkrótce spowite atmosferą fizycznych, astronomicznych, filozoficznych oraz teologicznych interpretacji i przeobraziło się w geocentryczny model świata. Z czasem stał się wielką przeszkodą dla naukowego postępu.

3. Układy odniesienia i prawa fizyki

Jak dobrze wiadomo, to właśnie Kopernikowi należy przypisać zasługę przezwyciężenia tej przeszkody. Musimy wszakże pamiętać, że z naszego obecnego punktu widzenia sprawy były znacznie bardziej skomplikowane. Przeniesienie środka Wszechświata z Ziemi do Słońca stanowiło niewątpliwie gigantyczny krok naprzód, ale nawet tak wielki krok nie był niczym więcej, jak tylko przygotowaniem do rozwiązania problemu. A problem był następujący: Jak w ogóle pozbyć się środka Wszechświata?

Środek Wszechświata służył Arystotelesowi jako układ odniesienia, względem którego określał on ruchy naturalne i poddawał je analizie. W zasadzie nie było to takie istotne, czy środek świata wiąże się z Ziemią, czy ze Słońcem; jeżeli tylko środek taki w ogóle był osiągalny, to arystotelesowska mechanika mogła funkcjonować (z pewnymi przystosowaniami, jeżeli środek świata przenieść na Słońce). Należałoby więc usunąć z Wszechświata wszystkie uprzywilejowane punkty, potraktować je na równych prawach z wszystkimi innymi punktami w przestrzeni. Mikołaj z Kuzy, Giordano Bruno, i jeszcze kilku innych myślicieli, głosili, że Wszechświat nie ma środka, lub – co na to samo wychodzi – że każdy punkt we Wszechświecie jest jego środkiem. Nie był to jednak żaden rewolucyjny krok, po prostu stwierdzenie bez większych konsekwencji dla nauki. Zagadnienie sprowadza się do tego, że jeżeli z każdym punktem, demokratycznie zrównanym ze wszystkimi pozostałymi – ale stacjonarnymi – punktami w przestrzeni, zwiążemy układy odniesienia, nie zyskujemy niczego. Możemy dowolnie przechodzić do układu odniesienia związanego, powiedzmy, z punktem p do układu związanego z punktem q przez proste dodanie (lub odjęcie) do wszystkich równań, wyrażających prawa mechaniki, odległości z p do q ; i w mechanice nic się nie zmienia, jej prawa pozostaną takie same.

Interesujące rzeczy zaczynają się dziać z chwilą, gdy bierzemy pod rozwagę układy odniesienia poruszające się jedne względem drugich. Ale na ogół trudności narastają wówczas dramatycznie. W takich przypadkach naukowcy starają się zmniejszyć trudności, usiłując zredukować trudniejszy problem do łatwiejszego. Na tym polega metoda idealizacji, często stosowana w nauce. W odniesieniu do badania ruchów metoda ta została wypracowana przez Descartesa, Galileusza i Newtona. Uczni ci, niejako zmuszeni przez poprzedzający ich prace rozwój mechaniki, badali najpierw układy odniesienia poruszające się jednostajnie (tzn. bez przyspieszeń) jedne względem drugich, sprowadzając w ten sposób zagadnienie trudne do łatwiejszego. Stwierdzenie, że *wszystkie układy odniesienia, poruszające się względem siebie jednostajnie, są równouprawnione* znane jest pod nazwą *klasycznej zasady względności* (takie układy odniesienia nazywają się *inercjalnymi*).

W teorii Newtona znika standard spoczynku. Każdy inercjalny obserwator (tzn. obserwator związany z inercjalnym układem odniesienia) ma swój własny – prywatny, jeżeli tak można powiedzieć – standard ruchu. Przestrzeń nie wygląda już teraz jak sztywna arena, której punkty pozostają nieruchome; obecnie punktom wolno się poruszać, jedno względem drugich, jednostajnie i po liniach prostych. Zostało to usankcjonowane pierwszą zasadą Newtona, stwierdzającą, że *ciało, na które nie działa żadna siła (lub siły działające są w równowadze) znajduje się w stanie jednostajnego i prostoliniowego ruchu.*

W tym momencie doszliśmy do ważnego wniosku: struktura przestrzeni (lub lepiej: czasoprzestrzeni, jeśli czas uznać za jej czwarty wymiar) determinuje treść zasady Newtona, lub – na odwrót – pierwsza zasada dynamiki Newtona wyciska na czasoprzestrzeni swoje własne piętno.

Z historii tej płynie jeszcze inna lekcja. Newton wierzył, że jego mechanika zakłada istnienie absolutnej przestrzeni. Pisał on: *Absolutna przestrzeń, ze swej własnej natury, bez względu na cokolwiek zewnętrznego, pozostaje zawsze taka sama i niezmienna.*⁵ Historia dała nam tu piękny przykład tego, jak fizyczne teorie wiodą swoje żywoty niezależnie od ludzi, którzy je stworzyli. E.Cartan odkrył, że newtonowska czasoprzestrzeń nie jest absolutną i bezkształtną areną, na jakiej rozgrywają się fizyczne procesy, lecz posiada strukturę przestrzeni afinicznej i że to właśnie ta struktura zawiera w sobie wyżej wzmiankowane własności, odpowiedzialne za równouprawnienie wszystkich inercjalnych układów odniesienia.⁶

Powróćmy jednak do zasadniczego wątku drugiej relatywistycznej rewolucji. Jak pamiętamy, istota takiej rewolucji polega na wykryciu nowych istotnych elementów kosztem zdegradowania dotychczasowych absolutów do roli nieistotnych elementów obrazu. W rewolucji dokonanej przez Newtona punkty przestrzeni przestały być istotne, ale gdzie należy szukać nowych absolutów? Dotychczas gra była banalna, teraz nabiera nieoczekiwanej wymowy. Okazuje się bowiem, że tymi elementami obrazu, które nie ulegają zmianie (które są niezmiennikami), gdy przechodzimy od opisu świata względem jednego układu odniesienia do opisu świata względem drugiego układu odniesienia (poruszającego się jednostajnie względem pierwszego), jest nie co innego jak tylko *prawa przyrody*. Jest to – na pierwszy rzut oka – czymś zupełnie niesamowitym, ale – po chwili refleksji – okazuje się czymś zupełnie logicznym: Spoglądamy na świat z różnych, poruszających się jednostajnie, układów odniesienia. Gdy przenosimy się z jednego układu do drugiego, nasza perspektywa ulega zmianie, świat wygląda inaczej. Jeżeli jednak starannie porównamy obrazy świata uzyskane z różnych układów odniesienia, stwierdzamy, że we wszystkich znajdują się pewne takie same elementy. Z morza szczegółów, zmieniających się od układu odniesienia do układu odniesienia, wydobywamy pewien stały schemat, nie ulegający zmianie wraz ze zmianą perspektywy. Schemat ten nie jest więc czymś subiektywnym, związanym z konkretnym punktem widzenia, lecz obiektywną własnością świata. Nic nie stoi na przeszkodzie, by nazwać to zestawem *praw fizyki*.

⁵ *Mathematical Principles of Natural Philosophy*, przekład A. Motte, University of California Press, 1962.

⁶ Ale trzeba pamiętać, że, choć w mechanice newtonowskiej nie ma absolutnej przestrzeni, jest jednak

4. Przestrzeń, czas i prędkość światła

Mówiąc nieco ściślej, określenie, co to jest prawo fizyki, zależy od tego, w jaki sposób dokonujemy przekształcenia od jednego układu odniesienia do drugiego, ale z kolei to, czy dysponujemy właściwym prawem przekształcenia, zależy od wyników pomiarów, na jakich opiera się dane prawo przyrody. To rozumowanie, mające pozór błędnego koła, jest przykładem "nieliniowej" sytuacji, bardzo typowej dla metody wypracowanej przez nowożytną fizykę. Chociaż tego rodzaju strategia często wiodła przez okresy kryzysów, jej ostateczny sukces wymownie świadczy na jej korzyść. Z końcem dziewiętnastego wieku okazało się, że pewne wyniki nowo wykonanych pomiarów sprzeciwiały się znanym podówczas prawom fizyki. Einstein był pierwszym człowiekiem, który w pełni zrozumiał, że należy zmienić prawa przekształceń (pomiędzy inercjalnymi układami odniesienia) w ten sposób, by otrzymać nowe prawa fizyki, które byłyby zgodne z wynikami doświadczeń. Nowy zestaw praw fizyki, uzyskany tą drogą, zawierał jedno, nieznanne dotychczas prawo, a mianowicie prawo stwierdzające, że prędkość światła w próżni jest zawsze stała, niezależnie od wyboru (inercjalnego) układu odniesienia.

Lub, wyrażając to samo nieco inaczej: gdy Einstein porównał różne obrazy świata, widziane z różnych (inercjalnych) układów odniesienia, zauważył, że powtarza się w nich zawsze ten sam element – w każdym z tych obrazów prędkość światła w próżni jest taka sama. Stare przekształcenia (zwane *przekształceniami Galileusza*) nie przewidują tego rodzaju efektu, musiały więc zostać w odpowiedni sposób zmodyfikowane (otrzymane w ten sposób nowe przekształcenia nazywają się *przekształceniami Lorentza*).

Po wprowadzeniu nowych przekształceń niektóre z dotychczas absolutnych elementów stały się elementami względnymi. Współzależność pomiędzy prawami fizyki a strukturą czasu i przestrzeni okazała się do tego stopnia intymna, że z chwilą gdy prędkość światła stała się absolutna, czas i przestrzeń musiały nabrać cech względnych. Na tym polega istota rewolucji znanej w fizyce pod nazwą szczególnej teorii względności. Gdy Einstein stworzył tę teorię w 1905r., spotkała się ona z dużą rezerwą zarówno ze strony fizyków, jak i filozofów i przez wiele lat znajdowała się w centrum gorących dyskusji, ale dziś z perspektywy czasu widzimy, że teoria ta była tylko kolejnym logicznym ogniwem w łańcuchu relatywistycznych rewolucji.

By dopełnić historii einsteinowskiej rewolucji z 1905r., musimy podkreślić, że względność czasu i przestrzeni (tzn. ich zależność od wyboru inercjalnego układu odniesienia), nie oznacza, że w pomiarach czasu i przestrzeni "wszystko jest dozwolone" (tzn., że możemy otrzymać cokolwiek, wybierając odpowiedni układ odniesienia). Chociaż pomiary czasu i pomiary przestrzeni (wzięte oddzielnie) zależą od wyboru układu odniesienia, muszą one spełniać pewien warunek: zestawione z nich *wielkości czasoprzestrzenne* nie mogą zależeć od wyboru układu odniesienia. Dotychczas czasoprzestrzeń była tylko użytecznym narzędziem do radzenia sobie z czasem i przestrzenią, które w mechanice klasycznej miały mniej lub bardziej paralelne własności; od tej chwili czasoprzestrzeń staje się niezbędnym teoretycznym pojęciem, łączącym w sobie czas i przestrzeń za pośrednictwem niezmienniczey prędkości światła.

5. Względność i krzywizna czasoprzestrzeni

Jaki będzie następny krok w ciągu relatywistycznych rewolucji? Odpowiedź narzuca się sama: musimy pozbyć się uproszczenia, polegającego na tym, że dotychczas braliśmy pod rozwagę tylko inercjalne układy odniesienia. Ale jak to osiągnąć – nie jest łatwym problemem do rozstrzygnięcia. Einstein poświęcił mu kilka najlepszych lat swego życia. Dotychczasowa strategia; uczynić coś względnym, by otrzymać nowy absolut, tym razem nie wydaje się funkcjonować w żaden prosty sposób. Musi być ona jakoś wzbogacona, by wydać oczekiwane owoce.

Wielkie osiągnięcie Einsteina polegało na spostrzeżeniu, że przyspieszenie jest *lokalnie* równoważne polu grawitacyjnemu (słynna einsteinowska *zasada równoważności*). Dziś, w erze naddźwiękowych odrzutowców i kosmicznych misji z rzeczywistych eksperymentów wiemy to, co Einstein trafnie odgadł przy pomocy sprytnych doświadczeń myślowych, a mianowicie, że pole grawitacyjne zawsze można lokalnie wyeliminować przez wybór układu odniesienia swobodnie spadającego w tym polu; i na odwrót, pole grawitacyjne można zawsze lokalnie wykreować, odpowiednio dobierając przyspieszony układ odniesienia.

Słowo "lokalnie" ma tutaj znaczenie zasadnicze. Jest tym nowym elementem całej strategii. Wprawdzie lokalnie możemy zawsze wyeliminować lub wytworzyć pole grawitacyjne, ale celem zachowania niezmienniczego obrazu, musimy w jakiś sposób skompensować ten efekt. Tu z pomocą przychodzi geometria. Matematyczne rozważania pokazują, że aby skompensować lokalnie wprowadzone lub wyeliminowane pole grawitacyjne, musimy globalnie zakrzywić czasoprzestrzeń. Innymi słowy: grawitacja przejawia się jako zakrzywienie czasoprzestrzeni.

Na tym polega zasadnicza idea einsteinowskiej ogólnej teorii względności. Równania pola tej teorii ilościowo określają, jak dany rozkład materii, będący źródłem pola grawitacyjnego, zakrzywia czasoprzestrzeń.

6. Rewolucja postrelatywistyczna

Używając modnego dziś żargonu, można powiedzieć, że współczesna fizyka weszła w swoją postrelatywistyczną fazę. Okazuje się, że nowa strategia (zapoczątkowana przez ogólną teorię względności) kompensowania lokalnych modyfikacji globalnymi strukturami może być z powodzeniem rozciągnięta na nowe dziedziny. Następujące uwagi pomogą to lepiej zrozumieć.

W sytuacji, w której coś pozostaje bez zmian, pomimo zmian innych elementów, stajemy wobec pewnej *symetrii*. Na przykład odbicie mojej twarzy w lustrze zachowuje zasadnicze cechy oryginału, chociaż jego lewa strona zmienia się w prawą, i odwrotnie. Stąd też mówimy o lustrzanej symetrii. W tym sensie można uważać, że prawa przekształceń pomiędzy różnymi układami odniesienia, pozostawiające pewne wielkości bez zmian, odzwierciedlają symetrie czasoprzestrzeni. W przypadku mechaniki klasycznej symetrie te nazywają się *symetriami Galileusza*, a w przypadku teorii względności – *symetriami Lorentza*. Zasadniczą ideę ogólnej teorii względności można teraz wyrazić w następujący sposób.

Rozważmy czasoprzestrzeń wyposażoną w pewne globalne symetrie. Ponieważ są one globalne, nie da się ich zaobserwować. Nie ma bowiem niczego, z czym można by je porównać. Jeżeli wszystko jest zdeformowane w ten sposób, deformacja ta pozostaje niewykrywalna. By tę globalną symetrię uczynić obserwowalną, należy ją lokalnie złamać (tzn. należy tę symetrię lokalnie zaburzyć), ale efekt ten należy skompensować przez wprowadzenie pola grawitacyjnego, które przejawia się jako zakrzywienie czasoprzestrzeni.

Podstawowa zasada domaga się, by fizyczna rzeczywistość zawsze pozostawała niezmiennicza ze względu na przejście od jednego jej opisu do drugiego, obojętne czy będzie to opis w języku globalnych symetrii, czy też w języku lokalnych symetrii plus pola kompensujące. Zasada "opis globalny równa się opisowi lokalnemu plus pola kompensujące" nazywa się *zasadą cechowania*. Jak widzieliśmy, ogólna teoria jest w tym sensie teorią cechowania, z polem grawitacyjnym jako polem kompensującym czyli tzw. *polem cechowania*.

Cała powyższa idea wydaje się tak banalna jak banalny jest fakt niezależności wyników pomiarów od wyboru jednostek, w jakich przyrząd pomiarowy został skalibrowany czyli "wycechowany" (stąd zresztą wywodzi się nazwa całej metody). Globalne przekształcenie jednostek (wszędzie w ten sam sposób) nie zmienia wyników pomiaru, ale lokalna zmiana jednostek (różne jednostki w różnych miejscach zadania – notoryczny błąd początkujących!) w oczywisty sposób fałszuje opis. Sfalszowane to można oczywiście zawsze naprawić, wprowadzając wszędzie do opisu odpowiednie czynniki korygujące (odpowiednik pól cechowania).

Jest rzeczą absolutnie zadziwiającą, że jeżeli zmienimy przekształcenia jednostek na bardziej wyrafinowane transformacje (określające pewne symetrie), otrzymujemy – na mocy powyższej procedury – tak podstawowe teorie fizyczne, jakimi są współczesne teorie cechowania.

Podstawowym problemem jest wybór właściwej symetrii. Jeżeli wybierzemy symetrię Lorentza, otrzymamy ogólną teorię względności. Jeżeli wybierzemy inne symetrie, otrzymamy inne teorie cechowania współczesnej fizyki. Ważną różnicą pomiędzy ogólną teorią względności a innymi teoriami cechowania jest to, że w przypadku ogólnej teorii względności symetrie (Lorentza) mają charakter czasoprzestrzenny, podczas gdy w przypadku innych teorii cechowania symetrie nie są bezpośrednio związane z czasem i przestrzenią. Są one bardziej abstrakcyjnej natury, ale zasada pozostaje zawsze ta sama: mamy zbiór przekształceń (który tworzy matematyczną strukturę zwaną *grupą*) i pewne wielkości, które nie zmieniają się po wykonaniu tych przekształceń. W ten sposób reguły przekształceń określają symetrie, jakim układ ma podlegać. Abstrakcyjne symetrie współczesnych teorii cechowania oznaczają się symbolami odpowiadających im grup; na przykład symbol $U(1)$ oznacza symetrie oddziaływań elektromagnetycznych, $SU(2)$ – symetrie słabych oddziaływań jądrowych, $U(1) \times SU(2)$ – symetrie zunifikowanych oddziaływań elektromagnetycznych i słabych jądrowych (zwanymi łącznie *elektrosłabymi*), a $SU(5)$ – symetrie kandydujące do dokonania unifikacji oddziaływań elektrosłabych i silnych jądrowych. Nowoczesne teorie dążące do zunifikowania wszystkich fizycznych oddziaływań (łącznie z grawitacją), takie jak teoria supergrawitacji czy superstrun, są w istocie także teoriami cechowania. Ich zasadniczym problemem jest zidentyfikowanie właściwej symetrii (lub supersymetrii). Uчени wierzą, że z chwilą gdy problem zostanie rozwiązany, unifikacja fizyki będzie już tylko kwestią kilku technicznych zabiegów.

7. Istnienie fizyki

Wydaje się, że jedyną strategią, jaka jest możliwa w fizyce jest: (1) próbowanie różnych opisów tego, co się mierzy, (2) poszukiwanie tych elementów, które pozostają niezmienione, gdy przechodzimy od jednego opisu do drugiego i (3) porównywanie konsekwencji tej procedury z wynikami nowych pomiarów. Lub innymi słowy: ponieważ w zasadzie chwytamy jedynie "różnice" a nie "absolutne wielkości", gdyby świat był globalnie symetryczny pod jakimś aspektem, aspekt ten nie mógłby być przez nas obserwowany (mierzony). Symetria staje się obserwowalna (mierzalna) dopiero wówczas, gdy zostaje *lokalnie* złamana. Jednakże w takim przypadku, ażeby nie zmienić świata przygotowując go do obserwacji (do mierzenia), musimy wprowadzić "kompensacje cechowania".

Gdy mamy do czynienia z procesami dziejącymi się w czasie i przestrzeni, najważniejszym elementem fizycznego opisu jest zależność lub niezależność tego, co obserwujemy lub mierzymy, od wyboru konkretnego układu odniesienia. Porównanie naszych teoretycznych przewidywań z bardzo dokładnymi danymi empirycznymi wykazało, że właściwymi symetriasami potrzebnymi do opisu czasoprzestrzennych własności świata są symetrie Lorentza.

Pojęcie układu odniesienia okazuje się kluczowym pojęciem, gdy idzie o symetrie czasoprzestrzenne. Jednakże w fizyce znane są zjawiska, w których nie tylko czas i przestrzeń odgrywają ważną rolę. Co więcej, wydaje się, że w pewnych dziedzinach fizyki (np. w pewnych wersjach kwantowej teorii grawitacji) czas i przestrzeń w ogóle nie istnieją. W takiej sytuacji musimy poszukiwać innych niż czasoprzestrzenne symetrii, podstawowych dla danej teorii. W tym sensie metoda cechowania jest uogólnieniem lub rozszerzeniem zasady względności. Metoda ta wydaje się jedynie możliwą strategią ekstrahowania informacji, stanowiącej strukturę świata, z poplątanej sieci wzajemnych uwarunkowań naszego języka, układów odniesienia, poznawczych perspektyw i obiektywnej rzeczywistości, która – jak sądzimy – tkwi jednak u podłoża tego wszystkiego.

Pojęcia układu odniesienia nie da się zredukować do roli technicznego środka, przy pomocy którego możemy sensownie określać prędkości i przyspieszenia ciał. Z punktu widzenia współczesnych teorii fizycznych jasno widzimy, że pojęcie to nie tylko wiodło proces rozumienia świata krętymi ścieżkami historii, ale również, że jest ono istotnie związane z samym istnieniem fizyki. Z pewnością pojęcie układu odniesienia pozostaje czymś więcej niż tylko dobrym symbolem metody, przy użyciu której badamy Wszechświat: zawsze w odniesieniu do naszego położenia i do naszych poznawczych wyposażań. Ale – rzecz zdumiewająca – przekształcając nasze pojęcia do innych tego rodzaju układów pojęciowych, w poszukiwaniu niezmiennych elementów poznania, udaje się nam wykroczyć poza własne ograniczenia i uchylić rąbka tajemnicy Wszechświata.