

*Andrzej Trautman*

## ROLA SYMETRII W FIZYCE\*

Aby sprawdzić, które z używanych przez nas pojęć wiążą się z przypadkowymi cechami rozwoju życia na Ziemi, a które mogą mieć znaczenie, od tego rozwoju niezależne, wygodnie jest dokonać następującej próby myślowej.

Przypuśćmy, że udaje nam się nawiązać łączność radiową z odległą cywilizacją pozaziemską. Pojęcia, które są związane ze szczególnymi własnościami naszego otoczenia i rozwoju będzie znacznie trudniej wytłumaczyć niż te, które dotyczą np. podstawowych zjawisk fizyki. Łatwo porozumieć się co do pojęcia odległości. Jako jednostkę długości wystarczy przyjąć długość fali określonego rodzaju światła. Opieramy się w tym miejscu na popartym przez obserwacje przekonaniu, że prawa fizyki są wszędzie jednakowe. Do niedawna sądzono, że na drodze „rozmowy kosmicznej” nie można wytłumaczyć, co rozumiemy przez lewą stronę, śrubę prawoskrętną itp. Wynika to stąd, że większość praw fizyki (wszystkie poznane przed r. 1956) nie wyróżnia żadnej skrętności. Oznacza to, że jeśli pominiemy pewne nowe zjawiska, o których będzie mowa później, każdemu możliwemu procesowi fizycznemu odpowiada również możliwy proces, powstający z niego przez odbicie zwierciadlane. To ogólne prawo jest przykładem jednej z wielu zasad symetrii obowiązujących w przyrodzie. Celem niniejszego wykładu jest omówienie istoty i znaczenia zasad symetrii w fizyce.

Wszystkie zjawiska, będące przedmiotem badań fizyki, można podzielić na dziedziny pokrewnych zjawisk, których opis jest zadaniem poszczególnych teorii. Jako przykład może służyć teoria ruchów ciał (gwiazd, planet, sputników) pod wpływem działających między nimi sił przyciągania powszechnego, czyli grawitacji.

Możemy teraz sformułować, co należy rozumieć przez symetrię albo niezmienniczość teorii fizycznej; będzie to naturalne uogólnienie pojęcia symetrii względem odbić. Mówimy, że mamy do czynienia z symetrią, jeśli istnieje przepis, który przyporządkowuje każdemu możliwemu zjawisku pewne, na ogół inne, również możliwe zjawisko. Tę definicję, aby była użyteczna, trzeba uzupełnić pewnymi matematycznymi założeniami o naturze przyporządkowania; np. należy wykluczyć tę możliwość, ażeby przepis, o którym mowa, przyporządkowywał jedno i to samo zjawisko dwóm różnym zjawiskom. Tę nieco abstrakcyjną definicję zilustrujemy teraz prostymi przykładami.

Z nauki o elektryczności wiadomo, że dwa spoczywające ładunki elektryczne przyciągają się lub odpychają, z siłą proporcjonalną do ilo-

---

\* Streszczenie wykładu wygłoszonego na inauguracji roku akademickiego 1965/66 na Uniwersytecie Warszawskim w dniu 1 X 1965 r.

czynu ich nabożów. Jeśli więc zamienimy te ładunki na inne, których naboże będą takie same co do wielkości, ale przeciwnych znaków, siła działająca między nimi nie ulegnie zmianie. Okazuje się, że to proste spostrzeżenie można uogólnić: jeśli w dowolnym układzie, rządzonego przez siły elektromagnetyczne, zastąpić wszystkie naboże przez im przeciwne, ruch układu nie ulegnie zmianie. Zatem taka zmiana znaków ładunków, zwana sprzężeniem ładunkowym, jest symetrią teorii zjawisk elektromagnetycznych. Symetrię tę można uogólnić tak, aby dotyczyła znacznie szerszego kręgu zjawisk. Wiadomo, że większość cząstek elementarnych występuje parami; jeden ze składników tej pary jest zwany cząstką, drugi antycząstką. Mają one przeciwne ładunki elektryczne oraz niektóre inne cechy, a przy spotkaniu ulegają anihilacji, tzn. zamieniają się w wysokoenergetyczne fotony albo mezony. Niektóre cząstki (np. foton) nie posiadają odpowiadających im i różnych od nich antycząstek; w tym wypadku wygodnie jest mówić, że antycząstki pokrywają się z cząstkami. Jeśli przyjąć tę umowę, to można sformułować następującą uogólnioną zasadę symetrii, która też nosi nazwę sprzężenia ładunkowego: w dowolnym procesie można zastąpić wszystkie cząstki przez antycząstki (i na odwrót). Przy okazji wspomnijmy, że w związku ze sprzężeniem ładunkowym i antycząstkami, niektórzy astrofizycy snują bardzo interesujące spekulacje na temat możliwości istnienia w pewnych częściach Wszechświata gwiazd i galaktyk zbudowanych z antymaterii, tzn. materii, w której każda cząstka została zastąpiona przez antycząstkę. Jeśli taka antygalaktyka albo jej część napotka zwykłą materię, nastąpi anihilacja — zamiana materii i antymaterii na promieniowanie.

Innego, ważnego przykładu symetrii dostarcza teoria ruchu ciał. Jest ona niezmiennicza względem translacji w przestrzeni: jeśli przesunąć wszystkie, biorące udział w ruchu, ciała o tę samą odległość w tym samym kierunku — otrzymamy układ, który będzie się poruszał tak samo, w łatwym do sprecyzowania znaczeniu. Przesunięcia są symetriami w zasadzie wszystkich teorii fizycznych. To stwierdzenie jest równoważne wyrażonemu na wstępie przekonaniu, że prawa fizyki są wszędzie jednakowe. Zupełnie podobnie można określić i zinterpretować niezmienniczość względem przesunięć czasowych: doświadczenia wykonywane w tych samych warunkach, ale w różnych czasach, dają te same wyniki. Niezmienniczość względem przesunięć czasowych i przestrzennych jest więc koniecznym warunkiem tego, aby nauka mogła się rozwijać, aby w ogóle można było odkrywać prawa przyrody, a nawet można zaryzykować twierdzenie, że jest ona warunkiem koniecznym samego istnienia takich praw.

Ze względu na uniwersalny, niezależny od rodzaju teorii, charakter niezmienniczości względem przesunięć mówi się, że symetrie te wyrażają własności czasu i przestrzeni, albo krótko — czasoprzestrzeni. Podobny charakter ma niezmienniczość względem obrotów; tę własność często wyraża się inaczej, mówiąc, że żaden kierunek w przestrzeni nie jest wyróżniony. Wśród symetrii czasoprzestrzeni najmniej oczywiste są te, które wiążą się z niezależnością praw przyrody od jednostajnego ruchu postępowego. Od czasów Galileusza panuje przekonanie o względności ruchu, o niemożliwości określenia stanu absolutnego spoczynku przy pomocy doświadczeń mechanicznych. Łatwo się przekonać, że zasada względności Galileusza stanowi wyraz symetrii mechaniki. Istotnie mówi ona, że powiększając prędkość wszystkich ciał biorących udział w ruchu o tę samą wielkość, czyli nadając układowi, jako całości, stały

ruch postępowy, otrzymujemy znowu układ zgodny z prawami mechaniki. Przypominamy, że popularna wersja tej zasady brzmi tak: przy pomocy doświadczeń wykonywanych wewnątrz wagonu jednostajnie poruszającego się pociągu nie można określić jego prędkości ani nawet kierunku ruchu. Łatwo zauważyć, że wszystkie te sformułowania są równoważne. Przez pewien czas sądzono, że zasada względności nie dotyczy zjawisk elektromagnetycznych, jednak doświadczenia pokazały, że tak nie jest. Okazało się, że przy pomocy żadnych doświadczeń nie można wyróżnić stanu absolutnego spoczynku. Wszystkie inercjalne układy odniesienia są równie dobre do opisu zjawisk przyrody — postulat ten został sformułowany po raz pierwszy przez Einsteina i stanowi podstawę teorii względności. Innymi słowy, istotą przejścia od fizyki newtonowskiej do fizyki relatywistycznej jest, wynikające z doświadczenia, rozszerzenie ważności zasady względności ze zjawisk mechanicznych na wszystkie procesy zachodzące w przyrodzie. Mamy tutaj pierwszy przykład znaczenia zasad symetrii w fizyce: każda zmiana w treści czy zasięgu tych zasad powoduje bardzo istotne zmiany w naszych poglądach na przyrodę. Można również poprzednie rewolucje w naszych wyobrażeniach o świecie rozpatrywać z tego punktu widzenia.

Nie potrzeba dziś nikogo przekonywać o wielkim znaczeniu teorii względności, zarówno ze względu na jej implikacje światopoglądowe, jak i pośrednie zastosowania praktyczne. W pewnym sensie nawet opanowanie przez człowieka energii jądrowej związane jest z teorią względności: ilość energii wyzwolanej w procesach jądrowych szacuje się na podstawie einsteinowskiego wzoru wiążącego masę z energią. Byłoby wielkim uproszczeniem wysnuwać stąd taki wniosek: zajmujmy się symetriami, gdyż to doprowadzi do wykrycia nowych rodzajów energii. Można wątpić w to, aby jakkolwiek uczonego mógł w przekonaniu w ten sposób uzasadniać celowość swoich badań nad rzeczami podstawowymi. Co więcej, należy strzec się przed stwarzaniem warunków, które by skłaniały badaczy do szukania i używania tego rodzaju uzasadnień. Znaczenie dociekań nad podstawowymi zagadnieniami fizyki leży w czym innym — w tym, że dają one coraz pełniejszy obraz świata, pozwalając coraz głębiej wniknąć w istotę zjawisk i znaleźć między tymi zjawiskami nieoczekiwane powiązania. Coraz lepsze rozumienie przez nas praw przyrody prędzej czy później da owoce w postaci gospodarczych korzyści, ale osiągnięcie takich korzyści nie może być stawiane za cel badań podstawowych.

Do najważniejszych konsekwencji symetrii należą wynikające z nich prawa zachowania. Prawo zachowania jest to wypowiedź orzekająca, że pewna wielkość zależna od stanu układu fizycznego nie zmienia swej wartości w czasie trwania ruchu tego układu. Do najbardziej znanych należą prawa zachowania energii i ładunku. Okazuje się, że prawa zachowania wynikają z symetrii teorii. Natura związku między symetriami i wielkościami zachowanymi zależy od szczegółów budowy teorii. Np. w teoriach klasycznych, takich jak mechanika, elektrodynamika, prawa zachowania otrzymuje się dla ciągłych grup symetrii (przesunięcia, obroty), natomiast nie ma praw zachowania dla odbić. W teoriach kwantowych odpowiedniość jest pełniejsza. Związek między symetriami i prawami zachowania jest tak ścisły, że przy pewnych dodatkowych, ale ogólnych założeniach prawdziwe jest twierdzenie odwrotne: istnienie praw zachowania implikuje symetrie.

Znaczenie rozważań opartych o metodę symetrii oraz wagę dokładnej

znajomości tych symetrii zilustrujemy dwoma przykładami: pierwszy pokazuje jak nie należy sugerować się powierzchniowymi symetrami zjawisk, a drugi dotyczy jednego z najważniejszych odkryć w fizyce w ciągu ostatniego dziesięciolecia.

Ernest Mach opowiada, że jako chłopiec nie mógł zrozumieć następującego szkolnego doświadczenia z fizyki: pod igłą magnetyczną (kompasem) i równoległe do niej umieszczony jest prostoliniowy przewodnik. Jeśli przez przewodnik przepuszczać stały prąd elektryczny — igła wychyla się, w płaszczyźnie poziomej, w pewną stronę. Rozumowanie Macha było następujące: układ igła magnetyczna—przewodnik jest symetryczny względem płaszczyzny przechodzącej przez osie tych dwóch ciał. Przepływ prądu nie narusza tej symetrii. Jeśli tak, to w jaki sposób igła magnetyczna może zdecydować, w którą stronę się obrócić? Oczywiście, błąd leży w wykorzystaniu fałszywego założenia o tym, że igła magnetyczna jest symetryczna względem płaszczyzny przechodzącej przez jej oś. Ta symetria dotyczy tylko zewnętrznych, mechanicznych własności igły. Z grubsza biorąc, własności magnetyczne związane są z tym, że w igle płyną prądy, które można sobie wyobrazić jako wywołane ruchem ładunków po okręgach prostopadłych do osi igły. Taki układ nie posiada symetrii, o której była mowa.

Drugi, niebanalny przykład dotyczy odkrycia niezachowania parzystości w pewnego rodzaju procesach atomowych. Parzystość to nazwa wielkości, której zachowanie jest konsekwencją symetrii względem odbić. Niezachowanie parzystości oznacza tyle samo, co naruszanie niezmienniczości względem odbić zwierciadlanych, a więc symetrii, równouprawnienia śrub lewo- i prawoskrętnych. Wyobraźmy sobie następujące doświadczenie, które rzeczywiście było wykonane. Bierzymy próbkę substancji promieniotwórczej, której atomy, a raczej jądra tych atomów, podlegają rozpadowi  $\beta$ . Rozpad ten polega na tym, że jeden z neutronów wchodzących w skład jądra zamienia się w proton, przy czym na zewnątrz zostaje wyrzucony elektron oraz pewna inna cząstka, zwana neutrinem (ściśle biorąc, fizycy cząstkę tę nazywają antyneutrinem; z pewnych ubocznych względów będzie nam wygodnie zmienić przyjętą nomenklaturę). Do niedawna — w szczególności do czasu doświadczeń, o których będziemy mówili — o neutrinie wiedziano tylko tyle, że jest to cząstka poruszająca się zawsze z prędkością światła (tak jak fotony), pozbawiona ładunku elektrycznego; od fotonów różni się wielkością wewnętrznego momentu pędu (zwanego przez fizyków spinem). Na jedno neutrino przypada akurat połowa tej ilości wewnętrznego ruchu obrotowego co na jeden foton. Jeśli będziemy obserwowali przez pewien czas próbkę substancji, której atomy ulegają rozpadowi  $\beta$ , to zauważymy, że elektrony i neutrony wylatują z niej w różnych, zupełnie przypadkowo rozłożonych kierunkach; żaden kierunek w przestrzeni nie jest wyróżniony. Wyobraźmy sobie dalej, że umieszczamy ten materiał promieniotwórczy (w konkretnych doświadczeniach był to pewien izotop kobaltu) w polu magnetycznym; np. w środku poziomo położonego przewodnika kołowego, przez który płynie stały prąd elektryczny. Stawiamy pytanie: jaki będzie teraz rozkład kierunków, w których będą wyrzucane elektrony? Odpowiedź, którą dawano do 1956 r. brzmiała, że rozkład ten powinien być symetryczny względem płaszczyzny wyznaczonej przez kołowy przewodnik z prądem. Argumentacja była taka: gdyby tak nie było, oznaczałoby to, że więcej elektronów jest wyrzucanych ku górze. W ten sposób jeden z kierunków góra—dół byłby uprzywilejowany; w połączeniu z prądem

płynącym w płaszczyźnie poziomej wyróżniałoby to pewną skrętność. Jeśli wierzymy, że w przyrodzie żadna ze skrętności nie jest uprzywilejowana, to należy tę możliwość odrzucić. Jednak doświadczenia wykonane w 1957 r. wykazały co innego: jeden z dwóch kierunków góra—dół był wyraźnie preferowany przez elektrony; to, który z nich, zależało od kierunku płynięcia prądu. Inaczej mówiąc, gdzieś w przyrodzie jest „śruba”, która w większości zjawisk nie ujawnia się, a która powoduje naruszenie symetrii zwierciadlanej w doświadczeniu z kobaltem. Podejrzenie od razu pada na neutrino, które tutaj występuje, a w większości zjawisk ich nie ma. Pamiętamy, że neutrino posiada ruch obrotowy — jest bakiem, którego oś pokrywa się z kierunkiem jego prędkości. W zasadzie mogłyby więc istnieć dwa rodzaje neutrin, odpowiadające dwóm możliwym kierunkom obrotu.

Do czasu owych doświadczeń myślano, że na równych prawach występują neutrino obu rodzajów; na uzasadnienie tego przekonania można było przytoczyć to, że zupełnie podobnie jest z fotonami. W wyniku doświadczeń z promieniotwórczym kobaltem nasze poglądy uległy radykalnej zmianie: aby wytłumaczyć te doświadczenia, musimy przyjąć, że wszystkie neutrino są tego samego rodzaju, mianowicie typu śruby prawoskrętnej. Łatwo zrozumieć bez wchodzenia w szczegóły rachunkowe, że występowanie takich wyróżniających skrętność cząstek w omawianym doświadczeniu może spowodować asymetrię góra—dół. Przed 1956 r. każdy fizyk, zapytany o wynik doświadczenia z rozpadem  $\beta$  w polu magnetycznym popełniłby ten sam błąd, co młody Mach: mianowicie, wnioskowałby o wynikach tego doświadczenia na podstawie niepełnej znajomości własności symetrii występujących w nim elementów. Okazuje się, że istnieją określone ilościowe powody, dla których niezachowanie parzystości zostało tak późno odkryte: występuje ono jedynie w tak zwanych słabych oddziaływaniach. Są to specjalnego rodzaju siły działające między cząstkami elementarnymi; ich natężenie jest znacznie mniejsze niż sił elektromagnetycznych oraz pozostałych sił jądrowych. We wszystkich oddziaływaniach innych niż słabe parzystość jest zachowana i w związku z tym obserwacje większości zjawisk nie wskazują na jej naruszenie.

Na podstawie doświadczenia z rozpadem  $\beta$  w polu magnetycznym możemy teraz zaproponować pewien sposób przekazania pojęcia strony lewej i prawej naszym hipotetycznym rozmówcom z odległej planety. Jak wiemy, wyniki tego doświadczenia wyróżniają pewną skrętność. Jak już wspomnieliśmy, cząstki elementarne występują parami: cząstka—antycząstka. W szczególności istnieje antyneutrino, które również pojawia się w wyniku rozpadu niektórych jąder. Na podstawie rozważań teoretycznych, popartych obserwacjami, przekonano się, że antyneutrino mają przeciwną skrętność niż neutrino (antyneutrino są lewoskrętne). Brak symetrii względem odbić w doświadczeniu z kobaltem można wytłumaczyć następująco: na podstawie samej definicji symetrii, na to, ażeby była niezmienniczość względem odbić, musi być prawdą, że dokonując odbicia zwierciadlanego danego procesu otrzymuje się znowu proces zgodny z prawami fizyki. Bez trudu można poddać takiemu odbiciu prąd oraz próbkę z kobaltem i wylatujące z niej elektrony, ale nie można tego zrobić z neutrinami; neutrino jest śrubą prawoskrętną, a ta po odbiciu staje się śrubą lewoskrętną; neutrino jednak nigdy nie są lewoskrętne! Nasuwa się myśl, której pierwszym autorem był Landau, ażeby równocześnie dokonać odbicia i zastąpić neutrino przez antyneutrino. Okazuje

się, że taka operacja będzie symetrią, pod warunkiem, że wszystkie cząstki zastąpi się przez antycząstki. W ten sposób, w pewnym sensie, zachowanie parzystości zostało uratowane, ale za cenę istotnej modyfikacji samej operacji symetrii: trzeba łączyć odbicie zwierciadlane ze sprzężeniem ładunkowym. Mamy więc nową symetrię o szerszym zakresie ważności. Przez pewien czas sądzono, że jest ona zupełnie uniwersalna; ostatnio wykonano doświadczenia, które zdają się wskazywać, że tak nie jest.

Symetrie, takie jak przesunięcia i obroty, mają prostą interpretację, można je uważać za odbicie w fizyce geometrycznych własności przestrzeni. Trudniej jest w ten sposób zinterpretować sprzężenie ładunkowe, a już zupełnie tajemnicze są pewne symetrie w dziedzinie cząstek elementarnych, które ostatnio coraz bardziej zajmują uwagę fizyków. Jakiego są one rodzaju, wyjaśnimy na następującym przykładzie.

Jak wiadomo, w skład jąder atomowych wchodzi dwa rodzaje cząstek, zwanych ogólnie nukleonami: protony i neutrony. Protony są naładowane, neutrony — elektrycznie obojętne. Protony odpychają się na skutek działania siły Coulomba; z tego, że jądra są stabilne, można wnioskować, że pomiędzy nukleonami występują jakieś inne, nieelektromagnetyczne siły przyciągające, które utrzymują jądra w równowadze. Siły te mają wielkie natężenia na małych odległościach, ale szybko maleją z odległością; nazywa się je silnymi oddziaływaniami. W zjawiskach, w których nukleony znajdują się od siebie na bardzo małych odległościach, oddziaływania silne odgrywają rolę decydującą, a siły elektromagnetyczne można w pierwszym przybliżeniu w ogóle pominąć. Okazuje się, że dla tego rodzaju zjawisk operacją symetrii jest zastąpienie neutronów przez protony, a protonów przez neutrony. Oczywiście jest to symetria przybliżona — oddziaływanie elektromagnetyczne między dwoma protonami jest inne niż między dwoma neutronami i ta różnica psuje symetrię. W miarę dokładniejszego poznawania silnych oddziaływań i odkrywania nowych cząstek biorących w nich udział znajdowano inne symetrie oraz prawa zachowania tego typu; wspólną cechą tych wszystkich symetrii jest ich przybliżony charakter oraz nieznanne podłoże. Jednak na podstawie tych symetrii osiągnięto poważne sukcesy: już kilkakrotnie przy ich pomocy udało się przepowiedzieć istnienie nowych cząstek, które następnie zostały wykryte doświadczalnie; uczyniono również cały szereg przewidywań ilościowych w dziedzinie fizyki cząstek elementarnych, które też się potwierdziły. Możliwość przewidywania wiąże się w istotny sposób z tym, że zbiór symetrii dowolnej teorii zawsze tworzy grupę. Na podstawie obserwacji i znajomości praw zachowania możemy odgadnąć część symetrii; następnie, na podstawie teorii grup wnioskujemy, że występują inne, a stąd z kolei wnosimy o istnieniu nowych cząstek.

Przewidywania oparte na symetriach silnych oddziaływań nie są jednak pozbawione ciemnych stron i niektórzy fizycy mają wątpliwości czy kryje się za nimi coś głębokiego, czy nie są to po prostu przypadkowe związki, którym ludzie z braku czegoś lepszego nadają rangę teorii. Nie wiadomo zupełnie, dlaczego takie symetrie miałyby występować; niepokojący jest ich przybliżony charakter. Ostatnio fizycy poszli jeszcze dalej i wprowadzili symetrie, które są naruszane już przez silne oddziaływania (w przeciwieństwie do tych, o których mówiliśmy poprzednio i które są naruszane przez oddziaływania elektromagnetyczne i słabe). Z tych hipotetycznych symetrii wydaje się wynikać istnienie całych ro-

dzin cząstek, m.in. o ładunkach, które są ułamkami ładunku elektronu, a których nie udało się dotąd znaleźć w przyrodzie.

Niezależnie od tego, kto będzie miał rację w przypadku silnych oddziaływań, metody wykorzystujące symetrie teorii fizycznych już przyniosły pożyteczne wyniki, uprościły rachunki i wprowadziły ład do rozwiązań. Jednym ze względów decydujących o wadze tych metod jest to, że ich stosowalność nie zależy od szczegółowej postaci teorii. Jakakolwiek by nie była teoria, z niezmienniczości względem przesunięć wynika prawo zachowania energii i pędu, a z symetrii obrotowej — momentu pędu. Symetrie reprezentują najbardziej trwałe, a więc najbardziej głębokie elementy teorii.