



## Symetria i asymetria zwierciadlana (cz. II)

Antonina Kowalska

Instytut Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego

### Symetria i asymetria oddziaływań

Pierwsza część artykułu zakończyła się pytaniem o to, czy prawa fizyczne wykazują symetrię zwierciadlaną. W związku z tym problemem warto na początku zwrócić uwagę na dwa zagadnienia:

1. Trzeba sobie zdać sprawę z tego, że symetrię czy asymetrię zwierciadlaną zjawiska badamy inaczej, niż gdy przekształceniem jest obrót czy też przesunięcie (translacja). W ostatnich dwóch przypadkach możemy dokonać obrotu urządzeń lub ich przesunięcia i zaobserwować, czy zjawisko zachodzi tak samo, czy inaczej w nowym położeniu. Powszechnie obserwujemy, że takie przekształcenia nie zmieniają przebiegu zjawisk (np. obserwacja zjawiska w dzień czy w nocy daje to samo, chociaż został dokonany obrót wokół osi Ziemi itd.). Z odbiciem zwierciadlanym sprawa ma się inaczej.

Powiemy, że prawo (oddziaływanie) rządzące zjawiskiem:

– jest **symetryczne zwierciadlanie**, jeżeli przebieg zjawiska odbity w lustrze, a następnie odtworzony w rzeczywistości (bardzo dobre niemieckie słowo *Nachbau*, zob. [1]), jest zgodny z tym prawem;

– jest **asymetryczne zwierciadlanie**, inaczej chiralne, jeżeli zjawiska widziane w lustrze nie da się odtworzyć w rzeczywistości.

Powszechnie używa się określeń:

– oddziaływanie symetryczne zwierciadlanie = zachowujące parzystość (ang. *parity conserving*),

– oddziaływanie asymetryczne (chiralne) = niezachowujące parzystości (ang. *parity nonconserving*),

a stąd używa się określenia: **odbicie w lustrze P**.

Trzeba pamiętać, że symbole obrazujące wielkości fizyczne, np. strzałki określające kierunek, trzeba odbijać w „P” zgodnie z ich naturą, a więc zgodnie z tym, czy są to wektory polarne, czy aksjalne.

2. W dalszym ciągu artykułu ważną rolę odegra tzw. **zasada zachowania symetrii** stosowana od starożytności (zob. *Dodatek* zamieszczony na końcu artykułu):

„Jeżeli przyczyny wytwarzają pewne efekty, to elementy symetrii charakteryzujące przyczyny muszą się też znaleźć w wytworzonych przez nie efektach”.

**U w a g a:** Zasadę tę trzeba stosować z wielką ostrożnością, aby nie pomylić się w określeniu symetrii przyczyn. Jak zobaczymy dalej, taki błąd popełniono

w badaniu dwóch podstawowych zjawisk, raz w XIX, drugi raz w XX wieku, właśnie w związku z symetrią oddziaływań.

### Oddziaływania elektromagnetyczne

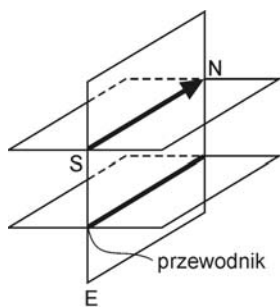
Zacznę od końca. Wiemy dzisiaj, że oddziaływania te są zwierciadlane symetryczne. Ale sprecyzujmy jeszcze raz, co oznacza takie stwierdzenie. Otóż oznacza to, że dowolne zjawisko, w którym te oddziaływania są brane wyłącznie pod uwagę, po zbudowaniu tego, co widzimy w lustrze „P”, prowadzi do zjawiska, które można w rzeczywistym świecie obserwować.

Wróćmy teraz do historii, a więc do pierwszego doświadczenia tego typu, wykonanego w 1820 roku przez duńskiego badacza [6] Hansa Christiana Ørsteda. Był on z wykształcenia farmaceutą, ale uważał siebie za literata. Jego doktorat dotyczył Kanta. Ørsted był pod silnym wpływem modnej wówczas w Europie filozofii natury (*Naturphilosophie*). Jedną z tez tego kierunku była jedność sił natury. Miało to istotny wpływ na zaistnienie opisywanego eksperymentu. W tamtych czasach szczytem technologii była elektryczność, a więc produkcja baterii i badanie ich własności. W roku 1812 Ørsted zaproponował zbadanie wzajemnego oddziaływania magnesu i prądu elektrycznego (wyznawana jedność natury sił). Od tej propozycji upłynęło kilka lat, nim efekt został odkryty.

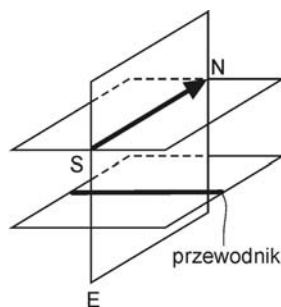
Sytuacja była następująca: z dwóch skrajnych możliwości usytuowania igielki magnetycznej względem przewodnika z prądem: a) równoległej oraz b) prostopadłej (zob. rys. 1), Ørsted wybrał tę drugą. Zrobił to, opierając się na wspomnianej wyżej zasadzie zachowania symetrii:

„jeżeli przyczyny powodują pewne skutki, to elementy symetrii tkwiące w przyczynach muszą występować także w skutkach”.

uważał bowiem, że w a) mamy symetrię względem płaszczyzny E, zatem nie należy się spodziewać wychylenia igielki magnetycznej z tej płaszczyzny, gdyż efekt byłby asymetryczny. Co innego w konfiguracji b), gdy brak symetrii w wyjściowej sytuacji może dawać niesymetryczne efekty.



Rys. 1a



Rys. 1b

Po kilku latach (jak niektórzy twierdzą – przez przypadek, czemu zaprzecza sam Ørsted) efekt wychylenia igielki magnetycznej **został zaobserwowany, ale w konfiguracji równoległej**. Był to intelektualny szok dla ówczesnych badaczy (tak to formuluje w swoich wspomnieniach znany fizyk Ernst Mach). Rzecz w tym, że o symetrii tkwiącej w przyczynach decyduje natura, a nie nasze wyobrażenia! Jak wiemy dziś, mamy tu do czynienia z efektem wychylenia igielki magnetycznej w kierunku pola magnetycznego wywołanego przepływem prądu. Znając ten kierunek, możemy przewidzieć wychylenia igielki w dwóch poniższych sytuacjach:



Rys. 2. Obserwowane wychylenie igielki magnetycznej z pozycji a), gdy w przewodniku zacznie płynąć prąd o natężeniu  $i$  w kierunku, jak wskazuje strzałka

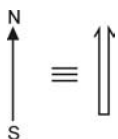


Rys. 3. Obserwowane wychylenie igielki magnetycznej z pozycji a), gdy w przewodniku zacznie płynąć prąd w kierunku przeciwnym do poprzedniego

Przekonamy się teraz, że powyższy efekt odbity w płaszczyźnie E (podobnie jak w każdej innej) jest obserwowalny w rzeczywistości, co potwierdza symetrię zwierciadlaną oddziaływania elektromagnetycznego. W tym celu oprzemy się na obecnym przekonaniu, że magnetyzacja (moment magnetyczny) jest związana z obrotem (ściślej: z krętem). Zatem igielkę magnetyczną, ściślej: jej moment magnetyczny, należy przedstawić jako wektor aksjalny, podczas gdy natężenie prądu związane z liniową prędkością elektronów w przewodniku jest wektorem polarnym.

Składowa wektora aksjalnego równoległa do płaszczyzny E zmienia znak przy odbiciu w E, składowa prostopadła znaku nie zmienia.

Wektor natężenia prądu jako polarny oraz równoległy do E nie zmienia się przy odbiciu w E.

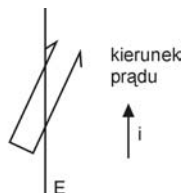


Widzimy z powyższego, że wśród przyczyn zjawiska dla konfiguracji a) mamy brak symetrii względem odbicia w E, zatem dla tej konfiguracji należy się spodziewać wychylenia igielki; przeciwnie w b).

### Odbicie zjawiska Ørsted w płaszczyźnie E



Rys. 4. Igielka magnetyczna nad przewodnikiem bez prądu



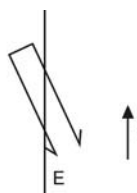
Rys. 5. Igielka magnetyczna po włączeniu prądu

P o o d b i c i u w E



Rys. 4a

P o o d b i c i u w E



Rys. 5a

Ta odbita sytuacja jest **r e a l i z o w a l n a w r z e c z y w i s t o ś c i**, jak to widzimy, porównując rysunek 5a z rysunkiem 3.

Po 130 latach większość badaczy nie ustrzegła się przed podobnym błędnym rozumowaniem, jakie prowadziło do „paradoksu” Ørsted. Problem dotyczył tzw. słabych oddziaływań, co teraz zostanie omówione.

### Oddziaływania słabe

Zacznę znów od końca. Obecnie wiemy, że **słabe oddziaływania naruszają symetrię zwierciadlaną, są chiralne**.

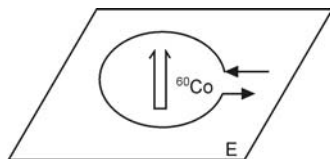
Historia tego odkrycia jest następująca [1, 3]:

Do roku 1956 panowało ogólne przekonanie, że oddziaływania fizyczne nie naruszają symetrii zwierciadlanej. Píše o tym na przykład H. Weyl w swojej monografii *Symmetry* z 1952 roku. Radykalna zmiana poglądów nastąpiła na przełomie lat 1956 i 1957. Już wiosną 1956 roku, podczas konferencji w Rochester, w czasie dyskusji nad tzw. zagadką *theta-tau* (chodziło o cząstkę, mezon K, który czasem rozpadał się na dwa mezony, czasem na trzy), Feynman zasugerował:

„Może mamy tu do czynienia z niezachowaniem parzystości, co jest mało prawdopodobne, ale przecież możliwe”.

Na konferencji tej byli obecni dwaj młodzi fizycy pochodzenia chińskiego: Tsung Dao Lee oraz Chen Ning Yang. Podczas lata 1956 przedyskutowali oni wiele eksperymentów związanych ze słabymi oddziaływaniami, dochodząc do wniosku, że podczas gdy oddziaływania grawitacyjne, elektromagnetyczne i silne (jądrowe) nie budzą podejrzeń co do symetrii zwierciadlanej, to oddziaływania słabe nie zostały pod tym względem przebadane. Zaproponowali oni szereg doświadczeń testujących symetrię zwierciadlaną, pisząc o tym w słynnym artykule w *Physical Review* w październiku 1956 roku. Preprint artykułu posłali zapewne do wielu fizyków, m.in. do Dysona, który dwa lata później wspomina te zdarzenia, mówiąc o braku wyobraźni i niedoczeniu wagi problemu przez siebie i innych. Jednak pani Chien Shiung Wu, i jej współpracownicy z Uniwersytetu Columbia postanowili przetestować jeden z zaproponowanych eksperymentów, a mianowicie rozpad promieniotwórczego **kobaltu**:  $^{60}\text{Co}$  [4].

Kryształ kobaltu w bardzo niskiej temperaturze włożono do środka solenoidu z prądem. Pole magnetyczne solenoidu kieruje spiny jąder kobaltu prostopadle do płaszczyzny E, w górę (zob. rys. 6), gdyż momenty magnetyczne jąder kobaltu, proporcjonalne do spinu, mają ten sam zwrot co spin (współczynnik żyromagnetyczny jest dla jąder kobaltu dodatni). Ponieważ spiny zachowują się jak wektory aksjalne, więc nie zmieniają się przy odbiciu w płaszczyźnie E.

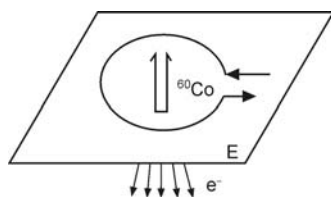


Rys. 6. Zaznaczono aksjalny wektor spinu

Stąd spodziewano się, że produkty rozpadu, a więc na przykład elektrony, będą z równym prawdopodobieństwem wylatywać nad płaszczyznę E, jak i w kierunku przeciwnym. Spodziewany wynik był tak oczywisty, że wcześniej nikt tego nie sprawdzał (owszem, była próba z końcem lat dwudziestych, ale przeszła niezauważona). Tak znamienici fizycy, jak Pauli czy Feynman, gotowi byli założyć się o duże sumy, twierdząc, że będzie tyle samo zliczeń elektronów nad, jak i pod płaszczyznę E. Do swojego ucznia Weisskopfa Pauli pisał:

„Nie wierzę, że Bóg jest słabym mańkutem, i jestem gotów założyć się o wysoką sumę, że eksperyment da rezultat symetryczny”.

Tymczasem wynik był zaskakujący: przewaga elektronów w kierunku przeciwnym do kierunku pola magnetycznego.



Rys. 7

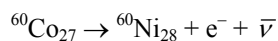
Późniejsze doświadczenia wielokrotnie wykazały naruszenie symetrii zwierciadlanej słabych oddziaływań. Rozpoczęła się wielka rewolucja w fizyce. Może warto zacytować tu uwagi M. Gardnera z jego książki zatytułowanej *Zwierciadłany Wszechświat* [8]:

„Zastanówmy się nad tym, dlaczego nie fizycy Zachodu, ale Wschodu wpadli na pomysł naruszenia symetrii zwierciadlanej. Może zadecydowała o tym spuścizna kulturalna, która predysponowała właśnie Chińczyków do tego odkrycia. Starożytny symbol religijny Wschodu, tzw. YIN i YANG, jest asymetrycznym symbolem życia wyrażającym dwoistość: dobra-zła, prawdy-falszu, symetrii-asymetrii itd., z małą przymieszką jednego w drugim. Małe plamy, biała i czarna, pokazują, że po stronie każdej własności jest coś z drugiej, każda prawdziwa teoria zawiera element niepewności. Kultura Zachodu natomiast od najdawniejszych czasów preferuje doskonałą symetrię zwierciadlaną”.



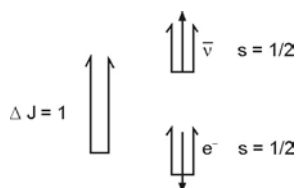
Rys. 8. YIN i YANG

Dlaczego płaszczyzna E w doświadczeniu pani Wu nie jest płaszczyzną symetrii (tak jak błędnie przewidywano, podobnie jak 130 lat wcześniej w doświadczeniu Ørsteda)? Otóż w rozpadzie kobaltu produkowane są nie tylko elektrony, ale także antyneutrino:



Antyneutrino,  $\bar{\nu}$  występuje **zawsze** jako **prawoskrętne**: rzut spinu tej cząstki na kierunek jej ruchu jest zawsze dodatni. Ta związana z antyneutrinem „śruba”

wnosi w zjawisko element chiralności. Antyneutrino widziane w lustrze „P” w miejscu płaszczyzny E byłoby „śrubą” lewą, a taki stan nie realizuje się w naszym świecie. W omawianej reakcji spin kobaltu zmienia się o jednostkę, gdy kobalt przechodzi w nikiel. Zasada zachowania krętu powoduje, że zarówno wylatujące elektrony, jak też wylatujące antyneutrino mają swoje spiny ( $1/2$ ) skierowane w górę (spin kobaltu zmienia się z 5 na 4,  $\Delta J = 1$ ). Antyneutrino jako prawoskrętne muszą więc wylatywać w górę (w kierunku pola magnetycznego). Zgodnie z zasadą zachowania pędu, elektrony wylatują więc przeciwnie do pola magnetycznego.



Podkreślę jeszcze raz fakt, na którym się tu opieramy, że neutrino występuje zawsze jako lewoskrętne (rzut na kierunek pędu ujemny – łącznie mamy tu realizację śruby lewej), jego antycząstka, antyneutrino, występuje wyłącznie jako prawoskrętne.

**Te dwie cząstki są na poziomie cząstek elementarnych analogonem odkrytych przez Pasteura lewo- i prawoskrętnych molekuł kwasu winowego.**

Tylko tzw. słabe oddziaływania wykazują naruszenie symetrii zwierciadlanej. Mówimy w takim wypadku o słabym złamaniu symetrii zwierciadlanej. Nie wykazują jej pozostałe znane nam oddziaływania; dlaczego – nie wiemy.

Słabe oddziaływania występują także, jak się okazało, w oddziaływaniu elektron–kwark, a stąd na przykład w oddziaływaniu elektron–proton, czyli stanowią pewną niezwykle małą domieszkę do oddziaływania elektromagnetycznego, głównego oddziaływania odpowiedzialnego za strukturę atomu. **Zatem atomy są chiralne**, nie mają dokładnej symetrii sferycznej.

Często mówi się, że we Wszechświecie istnieje „ręczność” (*handedness*). Niektórzy próbowali tłumaczyć to anizotropią przestrzeni, jej asymetrią, skręceniem w każdym punkcie. Nawet naturę dodatnich i ujemnych ładunków próbowano tłumaczyć chiralnością. Jeżeli jednak, jak na to wiele wskazuje, przestrzeń jest izotropowa, wówczas trzeba przyjąć, że pewne cząstki mają w swojej strukturze asymetrię. Jest to tzw. **złamanie explicite** praw fizyki (zob. *Dodatek*). Nie można wykluczyć, że kiedyś okaże się to **złamanie spontanicznym** pewnej wysokiej symetrii, która przez to złamanie została tylko ukryta.

Jest również możliwe, że to „coś”, co powoduje asymetrię słabych oddziaływań, mogło też odgrywać rolę w tworzeniu się asymetrycznych prymitywnych związków organicznych, a więc i naszych organizmów. Nasze estetyczne upodo-

banie w symetrii zwierciadlanej i w równoczesnym słabym jej naruszeniu oddającym elementy ruchu, życia, jest być może odbiciem tego, co obserwujemy we Wszechświecie, w którym ta symetria jako symetria praw fizyki na ogół obowiązuje i jest tylko słabo złamana.

Okazało się, że do opisu symetrii oddziaływań należy wprowadzić oprócz „lustra P” jeszcze dodatkowe „lustra” [5].

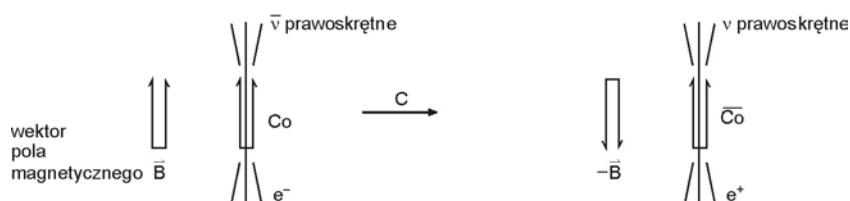
### Lustro C

Wróćmy do roku 1956. Fizykom bardzo się nie podobało złamanie symetrii zwierciadlanej „P” i wymyślili tzw. lustro „C” oraz lustro „CP” (w dalszym ciągu symbol luster będzie pisany bez cudzysłowu). Lustro C opiera się na tym, że każda **cząstka** ma swoją **antycząstkę** (czasem, jak dla fotonu, cząstka i antycząstka są identyczne).

**Odbicie C** (od angielskiego terminu: *charge conjugation* – sprzężenie ładunkowe) jest to transformacja, która każdą cząstkę przeprowadza w jej antycząstkę (ładunek cząstki jest przeciwny do ładunku antycząstki, masa, spin, czas życia – te same; współczynnik żyromagnetyczny różni się znakiem itd.).

Przeprowadźmy odbicie w **lustrze C** doświadczenia z kobaltem.

Niech  $\bar{Co}$  oznacza antykobalt, pole magnetyczne zmieni znak jako wywołane przez ruch pozytonów (w miejsce elektronów), antyneutrino  $\bar{\nu}$  przejdzie w neutrino  $\nu$ .



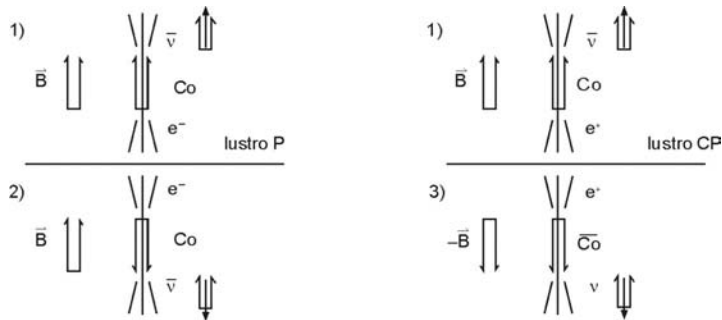
Po odbiciu C pojawiło się **neutrino prawoskrętne**, które w naszym świecie nie występuje; powiemy więc, że **w tym zjawisku jest naruszona symetria względem odbicia C**.

### Lustro CP

Odbicie w lustrze CP jest złożeniem transformacji odbicia P oraz odbicia C (kolejność nie gra roli). Okazuje się, że **prawie wszystkie** zjawiska są symetryczne względem CP. Poniżej omówię dwa przykłady.



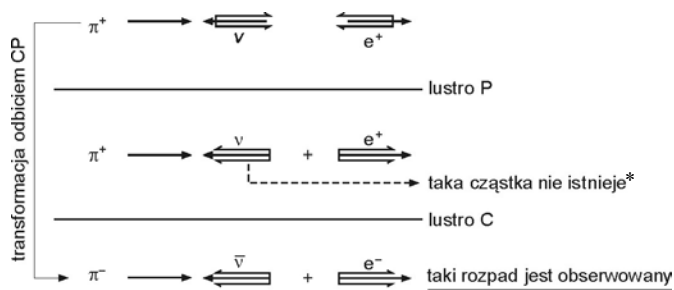
## I. Eksperyment z kobaltem



Widzimy, że w 3) nie napotykamy żadnej sprzeczności z obserwacjami w naszym świecie (inaczej niż w 2), a więc chociaż antykobaltu nie umiemy jeszcze wyprodukować, uważamy, że zjawisko to ma symetrię CP.

## II. Eksperyment z rozpadem mezonu $\pi$ (pionu)

Jest to cząstka bezspinowa (kret początkowy zerowy). Wiadomo, że mezon  $\pi$  spoczywający jest identyczny ze swoim odbiciem P.  $\pi^+$  (mający ładunek dodatni) rozpada się na neutrino oraz pozyton, biegnące w przeciwnych kierunkach, o spinach przeciwnie skierowanych. Jest faktem doświadczalnym, że pozytony ( $e^+$ ) zachowują się w tym rozpadzie jak śruby lewe (a więc neutrino także jak śruby lewe):



Do 1964 roku sądzono, że połączenie odbić P oraz C, czyli odbicie CP, jest transformacją, względem której prawa fizyki są niezmiennicze. W tym właśnie roku V. L. Fitch oraz J. W. Cronin wykryli naruszenie tej symetrii w rozpadach

\* Obecne badania wykazały, że taka cząstka wprawdzie istnieje, ale nie może powstać w tym procesie.

neutralnego mezonu K. Do dziś mechanizm tego naruszenia nie jest do końca rozstrzygnięty i dlatego badania nad naruszeniem CP są prowadzone i planowane w przyszłości.

### Lustra T oraz CPT

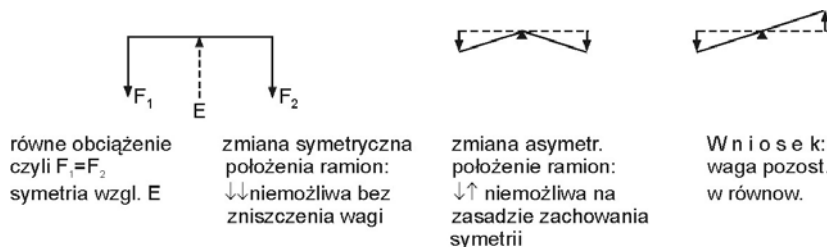
**Odbicie w lustrze T** jest to nie tylko zmiana znaku przy zmiennej czasowej  $t$ , ale równocześnie zmiana znaku pewnych wielkości, takich jak przykładowo: pęd, moment pędu, spin, bez zmiany znaku takich wielkości, jak na przykład: położenie, energia kinetyczna, energia potencjalna.

**Odbicie w lustrze CPT** jest złożeniem wszystkich trzech odbić (kolejność nie gra roli). Przy bardzo ogólnych założeniach wykazano, że oddziaływania fizyczne są symetryczne względem odbicia CPT. Ponieważ słabe oddziaływania naruszają czasem symetrię względem odbicia CP, stąd wynika, że w tych bardzo nielicznych przypadkach byłaby też naruszona symetria względem odbicia T. Jest to chyba najbardziej tajemnicze złamanie symetrii, którego interpretacja i badanie są wciąż aktualne.

## DODATEK

### O zasadzie zachowania symetrii oraz jej naruszeniu

Wydaje się, że pierwszym, który swoje rozumowanie oparł na zasadzie zachowania symetrii, był Anaksymander z Miletu (VI wiek p.n.e.). Dowodził on w ten sposób, że ziemia jest stabilna. Także postulat Archimedesusa (III wiek p.n.e.) o równowadze równo obciążonej wagi można uzasadnić na podstawie tej zasady [2]:



W wiekach średnich zasadę tę zobrazowano za pomocą osiołka, zwanego później **osiołkiem Buridana**. Jean Buridan, rektor uniwersytetu w Paryżu (XIV wiek) twierdził, że osiołek, umieszczony symetrycznie między dwiema jednakowymi kopcami siana, zdechnie z głodu, gdyż ze względu na symetrię względem płaszczyzny przechodzącej przez środek jego ciała nie ma powodu, aby zaczął jedzenie, wybierając jedną z dwóch kopek.

Leibniz (XVIII wiek) sformułował ideę Buridana, wprowadzając tzw. zasadę wystarczającej racji (jednakże sam Leibniz zauważa, że z osiołkiem nie jest wszystko tak bardzo symetryczne, biorąc pod uwagę asymetrię jego wnętrzości oraz rozkładu gwiazd wokół niego [2]).

Pierre Curie (1894 rok) sformułował zasadę zachowania symetrii w dwóch częściach:

– jeżeli efekty wykazują pewien brak symetrii (dyssymetrię), to musi on też wystąpić w przyczynach, które dane efekty wytworzyły;

– jeżeli przyczyny wytwarzają pewne efekty, to elementy symetrii charakteryzujące przyczyny muszą się też znaleźć w wytworzonych przez nie efektach.

A. V. Shubnikov [7], posługując się językiem teorii grup, uogólnił założenia prowadzące do tej zasady, tak że dziś mówi się o zasadzie Curie-Shubnikova.

Drugą część wyżej sformułowanej zasady zachowania symetrii należy stosować z wielką ostrożnością. Naruszenie symetrii może być pozorne, gdy nie zna się faktycznej symetrii przyczyn zjawiska. Tak było w przewidywaniu wyników doświadczenia Ørstedta i wiele lat później, w doświadczeniu pani Wu.

Faktyczne naruszenie symetrii to:

a) Tzw. **spontaniczne łamanie symetrii**

Niech zjawiska w pewnym układzie fizycznym będą rządzone równaniem o pewnej symetrii. Załóżmy, że równanie to ma rozwiązanie o tejże samej symetrii, ale niestabilne, oraz zbiór rozwiązań stabilnych, ale o niższej symetrii. Układ znajdujący się w stanie o wyższej symetrii (ale też o wyższej energii) może przejść spontanicznie (np. wskutek fluktuacji energii) do jednego ze stanów o energii niższej i niższej symetrii.

**Symetria praw rządzących naturą zjawiska nie zmienia się**, ale zostaje niejako ukryta w przyjętym przez układ stanie o niższej symetrii.

b) Tzw. **złamanie *explicite*** (termin pochodzący od Wignera i Weyla)

W tym przypadku dotyczy to **naruszenia symetrii praw fizycznych**. W obecnych teoriach złamanie symetrii zwierciadlanej w tzw. słabych oddziaływaniach ma właśnie tę naturę, ale do końca nie wiadomo, czy sięgając głębiej, teorie te nie będą konsekwencjami spontanicznie złamanej wyższej symetrii [1].

## Literatura

[1] Genz H.: *Symmetrie – Bauplan der Natur*, Piper 1987.

[2] Altmann S. L.: *Icons and Symmetries*, Clarendon Press, Oxford 1992.

[3] Gardner M.: *Zwierciadlany Wszechświat*, PWN 1969.

[4] Wu C. S., Ambler E., Hayward R. W., Hoppes D. D., Hudson R. P.: „Phys. Rev.”, **105**, 1957, 1413.

[5] Wigner E. P.: „Sc. American”, No. 6, 1965, 28.

**Uwaga od Redakcji:**

W tekście przedstawiono opis oddziaływań słabych zgodny z oryginalną wersją tzw. modelu Glashowa-Weinberga-Salama, którego twórcy zostali wyróżnieni Nagrodą Nobla w roku 1979. W tym modelu masa neutrin jest dokładnie równa zeru. Od kilku lat wiadomo, że masa neutrin jest niezerowa; za doświadczenia, które tego dowiodły, Raymond Davis Jr. i Masatoshi Koshiba otrzymali Nagrodę Nobla w roku 2002. Jednak obecne oszacowania masy neutrin dają wartości o sześć rzędów wielkości (milion razy) mniejsze niż najmniejsza zmierzona dotąd masa cząstki – masa elektronu. Tak mała masa nie daje żadnych możliwości do zmierzenia poprawek wielkości dyskutowanych w tekście.