Pierwszy wyraz znika na mocy równania Eulera–Lagrange'a. Drugi wyraz możemy zapisać w następującej postaci

$$\varepsilon_i \partial_\mu j_i^\mu = 0\,, \tag{5}$$

gdzie

$$j_i^\mu = -i\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \partial_\mu \psi^a}(T_i)^a_b \psi^b\,. \tag{6}$$

Ponieważ parametry ε_i są dowolne, to dostajemy n zachowanych wielkości j_i^μ $(i = 1, \ldots, n)$. Na marginesie poprzedniej strony ilustrujemy nasze dość formalne przekształcenia na przykładzie mechaniki klasycznej punktu materialnego z symetrią względem przesunięć.

Poszukiwania praw zachowania w fizyce można więc sprowadzić do poszukiwania symetrii lagranżjanu opisującego dany układ fizyczny. I na odwrót – znając z doświadczenia symetrię układu, możemy łatwiej skonstruować lagranżjan i tym samym wyprowadzić równania opisujące ten układ. Na przykład odkrycie pełnej symetrii równań elektryczności i magnetyzmu pozwoliło Maxwellowi na sformułowanie jednolitej teorii elektromagnetyzmu. Podobnie sto lat później odkrycie symetrii kwantowej teorii elektromagnetyzmu i teorii oddziaływań słabych (odpowiedzialnych, na przykład, za rozpad β neutronu) doprowadziło do stworzenia jednolitej teorii oddziaływań elektrosłabych.

Bez przesady można powiedzieć, że twierdzenie, które zawdzięczamy Emmie Noether, stało się jednym z podstawowych narzędzi współczesnej fizyki.

W elektrodynamice pole elektromagnetyczne opisywane jest dwoma polami wektorowymi: natężenia pola elektrycznego $\vec{E}(\vec{r},t)$ i indukcji magnetycznej $\vec{B}(\vec{r},t)$. Oba pola można także określić za pomocą potencjałów: skalarnego $\varphi(\vec{r},t)$ i wektorowego $\vec{A}(\vec{r},t)$

$$\vec{E}(\vec{r},t) = -\nabla\varphi + \frac{1}{c}\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\,,$$

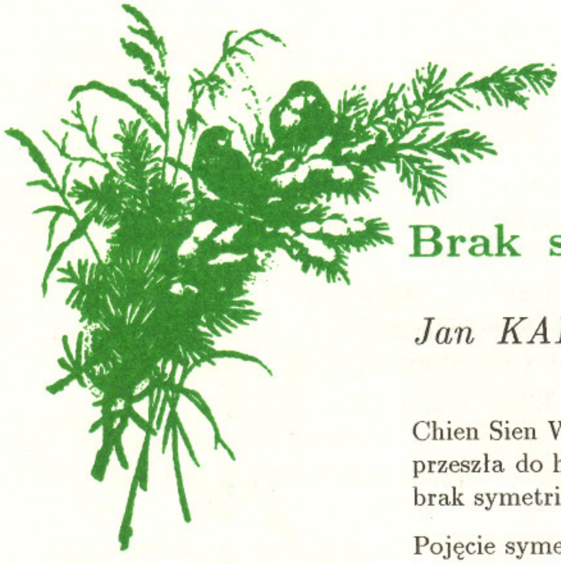
$$\vec{B}(\vec{r},t) = rot\vec{A}\,.$$

Te potencjały nie są określone jednoznacznie. Transformacja

$$\varphi \to \varphi - \frac{1}{c}\frac{\partial f}{\partial t}\,,$$

$$\vec{A} \to \vec{A} + \nabla f\,,$$

gdzie f jest dowolną funkcją $\vec{r}$ i t, nie zmienia pól $\vec{E}$ i $\vec{B}$. Jest więc transformacją symetrii. Jest to przykład transformacji lokalnej, gdyż zależy od punktu w przestrzeni i chwili czasu. Nosi ona nazwę symetrii cechowania i związana jest z nią zasada zachowania ładunku elektrycznego.



Brak symetrii

Jan KALINOWSKI, Krzysztof REJMER

Chien Sien Wu (urodzona w 1913 r. w Szanghaju, ale pracująca w USA) przeszła do historii fizyki dzięki przeprowadzeniu doświadczenia wykazującego brak symetrii prawo-lewo w mikroświecie.

Pojęcie symetrii w fizyce odgrywa olbrzymią rolę (patrz artykuł „Symetrie i prawa zachowania"). Żądanie symetrii układu prowadzi do daleko idących konsekwencji. Na przykład: z symetrii sferycznej oddziaływania kulombowskiego wynika w dużym stopniu struktura tablicy okresowej Mendelejewa, a istnienie antycząstek wynika z teorii Diraca zbudowanej na podstawie żądania relatywistycznej niezmienniczości teorii.

Jedną z symetrii dyskutowaną od zarania dziejów jest symetria odbicia przestrzennego – zamiany strony prawej na lewą i na odwrót, którą będziemy nazywali symetrią prawo-lewo. W życiu codziennym bardzo rzadko napotykamy sytuacje, które mają idealną symetrię prawo-lewo. W szczególności od czasu badań Pasteura w 1848 r. wiadomo, że substancje organiczne, których cząsteczki mogą występować w dwóch postaciach będących wzajemnym lustrzanym odbiciem, w naturalny sposób powstają tylko w jednej z nich, natomiast syntetyzowane sztucznie produkowane są w obu wersjach.

W odróżnieniu od życia codziennego prawa fizyki wykazują idealną symetrię prawo-lewo. W mechanice kwantowej istnienie symetrii prawo-lewo prowadzi do istnienia pewnego prawa zachowania. Układom fizycznym można przypisać pewną liczbę kwantową zwaną parzystością, która jest zachowana, co pozwala

Rozwiązanie zadania F 417. Zgodnie ze wzorem Laplace'a ciśnienie we wnętrzu bańki wynosi

$$p = \frac{4\sigma}{r}\,,$$

gdzie r jest promieniem bańki. Wynika stąd, że

$$pV^{1/3} = \text{const}\,.$$

Posługując się powyższym równaniem, równaniem stanu gazu doskonałego

$$pV = NRT$$

oraz pierwszą zasadą termodynamiki

$$Nc_V\,dT = Nc_X\,dT - p\,dV$$

znajdujemy szukane ciepło właściwe

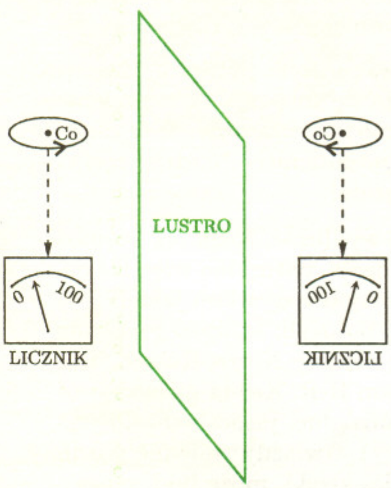
$$c_X = c_V + \frac{3}{2}R\,,$$

gdzie c_V jest ciepłem właściwym gazu przy stałej objętości.

wykluczyć pewne procesy, w których ta liczba ulegałaby zmianie. Prawo zachowania parzystości okazało się bardzo przydatne przy analizie widm atomowych, a później pojęcie parzystości i zasada jej zachowania zostało rozciągnięte na obszar fizyki jądrowej i cząstek elementarnych.

W pierwszej połowie lat 50. fizycy natrafili na pewien paradoks zwany paradoksem $\theta - \tau$. Dzisiaj wiemy, że θ i τ to ta sama cząstka zwana mezonem K, ale wtedy wiedziano jedynie, że θ rozpadała się na dwie cząstki zwane mezonami π, a τ rozpadała się na trzy mezony π. Układ dwóch mezonów π ma parzystość dodatnią, a trzech – ujemną. Jeśli parzystość jest zachowana, to θ i τ muszą się różnić; z drugiej strony, w wyniku długotrwałych badań stwierdzono, że poza rozpadami cząstki θ i τ zachowują się identycznie.

Rozwiązanie tego paradoksu zawdzięczamy T.D. Lee i C.N. Yangowi, którzy wysunęli radykalną hipotezę, że parzystość nie jest zachowana w procesach słabych, takich jak rozpad β neutronu czy też rozpad $\theta - \tau$. Ta śmiała hipoteza przyniosła jej autorom Nagrodę Nobla. Lee i Yang stwierdzili, że prawo zachowania parzystości, testowane wielokrotnie w oddziaływaniach elektromagnetycznych i jądrowych, nie było bezpośrednio sprawdzone w oddziaływaniach słabych i wiara w zachowanie parzystości w tych oddziaływaniach opierała się na stwierdzeniu: *bo nie może być inaczej.* Jeśli jednak parzystość w nich nie jest zachowana, to cząstki θ i τ mogą być jedną cząstką, która może rozpadać się na stany o różnej parzystości i nie ma w tym żadnego paradoksu.



Aby sprawdzić hipotezę niezachowania parzystości, należy zbudować dwa różne układy fizyczne będące wzajemnym lustrzanym odbiciem, w których zachodzą oddziaływania słabe. Jeśli wyniki eksperymentów przeprowadzonych w tych układach będą się różnić, to jest to dowód niezachowania parzystości. Wolfgang Pauli gotów był się założyć nawet o dużą sumę, że wynik zawsze będzie identyczny. Pierwszy tego typu eksperyment został przeprowadzony pod kierunkiem pani Chien Sien Wu. Rysunek przedstawia ideowy schemat układu doświadczalnego. W doświadczeniu zliczane były przypadki rozpadu β jąder kobaltu Co^{60}. Zwróćmy uwagę, że prąd płynący w pętli okrążającej jądro kobaltu jest istotnym elementem układu, gdyż bez niego oba układy byłyby identyczne i musiałyby dać identyczne wyniki. Aby wpływ prądu na jądra kobaltu był przez nie odczuwany, należało wyeliminować wpływ zakłóceń wywoływanych przez wzbudzenia termiczne. Dlatego też eksperyment należało przeprowadzić w bardzo niskiej temperaturze, rzędu 0,01 kelwina. Wyniki eksperymentów przeprowadzonych przez zespół pani Wu pokazały bardzo dużą różnicę w zliczeniach liczników pokazanych na rysunku, jednoznacznie wykazując brak symetrii prawo-lewo w oddziaływaniach słabych. Łamanie symetrii zwierciadlanej wiąże się także z naruszeniem innych symetrii. Na gruncie relatywistycznej teorii pola Lüders i Pauli udowodnili słynne twierdzenie CPT, zgodnie z którym prawa przyrody rządzące mikroświatem są niezmiennicze względem złożenia trzech symetrii: odbicia zwierciadlanego P, odwrócenia biegu czasu T i sprzężenia ładunkowego (tzn. zamiany cząstki na antycząstkę) C, co w symbolicznym języku zapisuje się równaniem: $CPT = 1$. Oznacza to, że złamanie jednej z tych trzech symetrii pociąga za sobą złamanie którejś z pozostałych.

Odkrycie niezachowania parzystości było szokiem i jednocześnie silnym impulsem w rozwoju fizyki. Odżyła hipoteza struktury neutrina stworzona przez Hermanna Weyla (jeszcze w 1929 r.) na bazie prostoty i elegancji rozumowania matematycznego, a odrzucona z powodu braku symetrii prawo-lewo. Jak powiedział Weyl w 1952 r. (a więc na kilka lat przed odkryciem niezachowania parzystości), asymetria rzadko jest po prostu brakiem symetrii. Nie może być przypadkiem, że Natura zdradza siebie częściowo dla piękna rozumowania matematycznego.