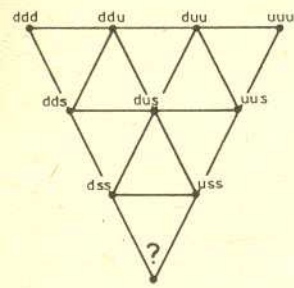
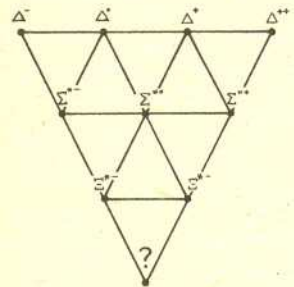


Dr hab. Marek SZCZEKOWSKI



Rys. 1



Rys. 2

W lutym 1964 r. odkryto cząstkę elementarną, która okazała się być kluczem do zrozumienia własności i struktury cząstek elementarnych. Zanim przypomnimy, jak do tego doszło, rozwiążmy na początek prosty test podobny do tych, które stosuje się często w psychologicznych badaniach inteligencji. Na rysunku 1 przedstawiony jest trójkąt z 10 punktami oznaczonymi kombinacjami liter *u*, *d* i *s*. Należy wpisać w brakującym wierzchołku odpowiednią kombinację tych liter. Rozwiązanie testu nie jest trudne – brakującą kombinacją jest, oczywiście, *sss*. Znacznie trudniejsze było ułożenie tego testu w fizyce cząstek elementarnych. Okazuje się bowiem, że tym kombinacjom liter odpowiadają odkryte w przyrodzie cząstki elementarne oznaczone na rysunku 2 symbolami Δ , Σ i Ξ , a sam trójkąt przedstawia związki będące kluczem do zrozumienia ich struktury. Zanim przejdziemy do wyjaśnienia, w jaki sposób otrzymano trójkąt przedstawiony na rysunku 1 i jak powiązano go z cząstkami elementarnymi pokazanymi na rysunku 2, musimy się cofnąć jeszcze o 32 lata, do roku 1932. W lutym tego roku, po dwunastu latach poszukiwań J. Chadwick badając rozpraszanie cząstek α (czyli jąder atomów helu) na berylu stwierdził, że jako produkt końcowy w tej reakcji powstają neutralne cząstki o masie bardzo bliskiej masie protonu. W ten sposób odkryto trzecią w historii, po elektronie (*e*) i protonie (*p*), cząstkę elementarną – neutron (*n*). A cząstka taka była naprawdę potrzebna. Przed odkryciem neutronu próbowano składać znane jądra atomowe z protonów o ładunku $+e$ i wewnętrznym momencie pędu (spinie) $\hbar/2$ (\hbar jest stałą Plancka) i elektronów o ładunku $-e$ i spinie również $\hbar/2$. Nie dawało to jednak dobrych rezultatów. W wielu wypadkach kombinacje elektronów i protonów, dające prawidłowy ładunek, prowadziły do błędnego momentu pędu jądra. Założenie, że jądra składają się tylko z neutronów o zerowym ładunku elektrycznym i spinie $\hbar/2$ i z protonów pozwoliło poprawnie opisać obserwowane własności.

Na początku był izospin

W połowie lat trzydziestych znano więc trzy cząstki elementarne: elektron o masie, którą umownie przyjmujemy za jednostkę masy i oznaczmy przez m_e oraz znacznie cięższy proton o masie $1836 m_e$ i neutron o masie $1839 m_e$. Zbliżone wartości ostatnich dwóch mas oraz kontrast ze znacznie lżejszym elektronem spowodowały, że szybko zaczęto się zastanawiać, czy protonu i neutronu nie można traktować w przybliżeniu jako dwóch stanów tej samej cząstki. Już w 1932 r. W. Heisenberg wprowadził do opisu sił jądrowych dwuwartościową zmienną, którą my oznaczmy przez I_3 przyjmując $I_3 = +1/2$ dla protonu i $I_3 = -1/2$ dla neutronu. Wkrótce pojawiły się pierwsze dane o związkach między siłami jądrowymi *pp*, *nn* i *np* wskazujące na niezależność sił jądrowych od wielkości ładunków elektrycznych *p* i *n*. Po „wyłączeniu” oddziaływań elektromagnetycznych protony i neutrony, zwane łącznie nukleonami, oddziałują tak samo. Siły jądrowe są więc niezależne od wartości I_3 . Do opisu tej sytuacji zastosowano taki sam formalizm matematyczny jak do opisu stanów spinowych cząstek, a wprowadzoną wielkość nazywa się obecnie izospinem i oznacza przez I . Dla nukleonów mamy $I = 1/2$, a proton i neutron tworzą tzw. izodublet.

W 1947 r. w trakcie badań promieni kosmicznych odkryto cząstki będące nośnikami sił jądrowych – naładowane mezony π^+ i π^- o masie ok. $273 m_e$ i spinie 0, a w roku 1950 w eksperymencie prowadzonym na akceleratorze w Berkeley znaleziono ich neutralnego partnera – mezon π^0 o masie $264 m_e$. Również i tu mała różnica mas między π^\pm i π^0 sugeruje, że są to trzy stany tej samej cząstki tworzące izotryplet ($I = 1$) i tak samo zachowujące się w oddziaływaniach silnych. W następnych latach odkrycia nowych cząstek potoczyły się lawinowo. Liczba obecnie znanych hadronów, bo tak nazywa się silnie oddziałujące cząstki, przekroczyła już 200. Dzieli się je na dwie grupy: hadrony o spinie całkowitym nazywamy mezonami, a hadrony o spinie połówkowym – barionami.

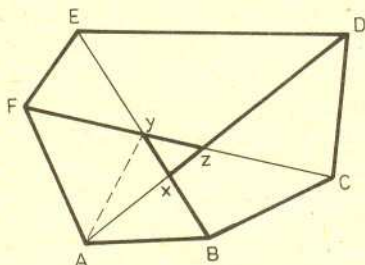
Korzystając z pojęcia izospinu można uporządkować hadrony grupując je w rodziny tak, jak nukleony i piony, ale liczba rodzin w dalszym ciągu pozostaje niepokojąco duża. Fakt, że różnych członków takich rodzin uważamy w przybliżeniu za te same cząstki, odbija się w stosowanych oznaczeniach: cząstki z tej samej rodziny izospinowej oznaczamy tą samą literą, a poszczególnych jej członków rozróżniamy podając ładunek.

Pojęcie izospinu wprowadza się matematycznie jako wektor w abstrakcyjnej przestrzeni trójwymiarowej $\vec{I} = (I_1, I_2, I_3)$. Mechanika kwantowa mówi, że podobnie jak w przypadku spinu, jednocześnie możemy mierzyć tylko długość tego wektora równą $\sqrt{I(I+1)}$ oraz jeden z jego rzutów na wybraną oś, np. I_3 . Wektor opisywany przez I ma $2I+1$ dozwolonych wartości rzutu na oś I_3 : $-I, -I+1, \dots, I$ (patrz rysunek dla $I = 3/2$). Cząstki elementarne opisywać więc można przez podanie dwóch liczb kwantowych: I oraz I_3 . I charakteryzuje całą grupę (multiplet) $2I+1$ cząstek, a I_3 numeruje poszczególne cząstki w multiplicie. Cząstki o różnych wartościach I_3 mają różne wartości ładunku elektrycznego. Niezależność ładunkowa sił jądrowych oznacza w tym opisie, że oddziaływania nie zmieniają się przy obrotach wektora \vec{I} . Nie ma wyróżnionego kierunku w przestrzeni izospinu. Wszystkie cząstki z danego multipletu oddziałują tak samo. Wprowadzenie sił elektromagnetycznych łamie tę symetrię, ponieważ rozróżniają ładunki cząstek, wyróżnia oś I_3 .



Pojawia się dziwność

Rozwiązanie zadania M 569.
Podzielmy sześciokąt $ABCDEF$ przekątnymi głównymi następująco: na czworokąt $ABYF$, $CDXB$ oraz $EFZD$ i trójkąt XYZ (którego może nie być, gdy przekątne przecinają się w jednym punkcie).



Jeden z tych czworokątów, np. $ABYF$, ma pole nie większe niż $\frac{1}{3}$. Podzielmy go dalej na dwa trójkąty ABY oraz FAY . Jeden z nich, np. ABY , ma pole nie większe niż $\frac{1}{6}$. Pozostaje zauważyć, że trójkąty ABF i ABC mają tę samą podstawę AB co trójkąt ABY , a oba równocześnie nie mogą mieć większej wysokości opuszczonej na bok AB niż trójkąt ABY , stąd pole co najmniej jednego z nich jest nie większe niż pole trójkąta ABY .

Od roku 1947 wiadomo było, że niektóre z nowo odkrytych cząstek mają dziwną własność: powstają w oddziaływaniach jądrowych tylko parami. Obserwowano np. reakcję produkcji mezonu K^+ o masie 966 m_e razem z cząstką Σ^+ w zderzeniach mezonów π^+ z protonami



natomiast nie znaleziono przypadków reakcji



choć wszystkie znane wówczas zasady zachowania liczb kwantowych, takich jak np. ładunek elektryczny, pozwalały na istnienie takiego procesu. Ponieważ masa mezonu K^+ jest znacznie większa od masy mezonu π^+ , to reakcja (2) powinna zachodzić nawet częściej niż reakcja (1). Co więcej, nowe cząstki produkowane w oddziaływaniach jądrowych nie chciały rozpaść się na skutek tych samych oddziaływań. Zamiast bardzo szybkiego rozpadu np. mezonu K^+ na π^+ i π^0 obserwowano ten proces, ale przebiegający znacznie wolniej. Sugerowało to, że zachodzi on na skutek oddziaływań słabych – tych samych, które odpowiadają za rozpady β jąder atomowych.

W celu wyjaśnienia dziwnego zachowania się niektórych cząstek M. Gell-Mann, T. Nakano i K. Nishijima wprowadzili w 1953 r. pojęcie nowej własności materii, podobnej do ładunku elektrycznego, którą nazwali „dziwnością”. Tylko część cząstek elementarnych miałaby dziwność różną od zera, $S \neq 0$. Jeśli ta własność jest zachowywana w oddziaływaniach jądrowych, to cząstki dziwne mogą być wytwarzane w zderzeniach hadronów tylko w taki sposób, aby suma przypisanych cząstkom liczb kwantowych dziwności S była przed i po reakcji taka sama. Jeśli przyjmiemy $S(K^+) = +1$ i $S(\Sigma^+) = -1$, to wówczas reakcja (1) może zachodzić, a reakcja (2) jest zabroniona.

Zachowanie dziwności zabrania również rozpadów cząstek dziwnych na same cząstki niedziwne wskutek oddziaływań jądrowych. Rozpady ze zmianą dziwności mogą zachodzić tylko na skutek oddziaływań słabych, w których dziwność nie jest zachowywana i może zmieniać się o 1 ($|\Delta S| = 1$).

Pojęcie dziwności pozwoliło na wprowadzenie nowego schematu klasyfikacji cząstek. Można je podzielić na grupy w zależności od tego, jaką dziwność ma dana cząstka. Widać wyraźnie, że w miarę wzrostu S w każdej grupie spinowej rośnie masa cząstek. Obserwowane regularności sugerują rozszerzenie symetrii izospinowej oddziaływań jądrowych.



Rozwiązanie zadania M 570.
Wykażemy ogólnie, że spośród dowolnych $n+2$ wektorów $\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_{n+2}$ w przestrzeni n -wymiarowej pewne dwa nie tworzą kąta rozwartego.
Dowód indukcyjny. Dla $n = 1$ jest to oczywiste. Przypuśćmy, że jest to prawda w przestrzeni $(n-1)$ -wymiarowej. Obierzmy układ współrzędnych w ten sposób, by wektor \vec{a}_1 miał kierunek wektora \vec{x}_1 . Wówczas albo któryś z wektorów $\vec{a}_2, \dots, \vec{a}_{n+1}$ tworzy z wektorem \vec{a}_1 kąt nierozwarty, albo pierwsza współrzędna każdego z tych wektorów jest ujemna. Dla wektora $\vec{a}_i = (a_i^1, \dots, a_i^n)$ oznaczmy $\tilde{a}_i = (a_i^2, \dots, a_i^n)$. Wówczas, na mocy założenia indukcyjnego, dla pewnych dwu spośród wektorów $\tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_{n+1}$, np. dla \tilde{a}_i oraz \tilde{a}_j mamy $\tilde{a}_i \cdot \tilde{a}_j \geq 0$. Również $a_i \cdot a_j = a_i^1 a_j^1 + \tilde{a}_i \cdot \tilde{a}_j \geq 0$, co oznacza, że kosinus kąta między tymi wektorami jest nieujemny, a więc kąt ten nie jest rozwarty.

	cząstki niedziwne		cząstki dziwne	
	$S = 0$	$S = -1$	$S = -1$	$S = -2$
cząstki o spinie 0	π^\pm (273) π^0 (264)	K^- (966) \bar{K}^0 (974)	-	-
cząstki o spinie 1/2	n (1839) p (1836)	Σ^+ (2328) Σ^0 (2334) Σ^- (2343) Λ^0 (2183)	Ξ^0 (2573) Ξ^- (2586)	
cząstki o spinie 3/2	Δ^{++} (2411) Δ^+ (2411) Δ^0 (2411) Δ^- (2411)	Σ^{*+} (2710) Σ^{*0} (2710) Σ^{*-} (2710)	Ξ^{*0} (2994) Ξ^{*-} (2994)	

Przykłady cząstek elementarnych z różnymi liczbami kwantowymi dziwności. W nawiasach podane są masy w jednostkach masy elektronu.

Wyższa symetria

Chcemy zebrać razem większą liczbę hadronów (o tym samym spinie) niż można to było zrobić tylko za pomocą pojęcia izospinu. Różnice mas są teraz znaczne, więc nie jest wcale oczywiste, które cząstki należy grupować razem. Próbowano to robić na wiele sposobów.

