

Czym są cząstki elementarne?

Prof. Marian DANYSZ i prof. Jerzy GIERULA

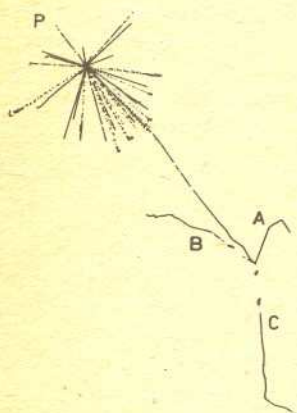
Problemy, 3 (108)/1955

Fizyk jest dziś nieco zakłopotany, gdy stawiamy mu to pytanie. W dziejach nauki pojęcie elementarności ulegało bowiem bogatej ewolucji. Ewolucji tej ulega i nadal, w miarę pogłębiania się naszych wiadomości o otaczającym nas świecie. (...) Wprowadzenie na miejsce czterech żywiołów starożytnych stu zasadniczo różnych pierwiastków chemicznych oraz promieniowania można by scharakteryzować jako przymusowy odwrót od prostoty pierwotnego ujęcia. Odwrót ten pobudził do prób nowej redukcji elementarnych składników materii. Fakty mówiły nieodparcie o istnieniu atomów, o ich różnorodności, w której gubiła się pierwotna prostota ujęcia. Nie można było negować istnienia różnych atomów — można było jednak doszukiwać się wewnętrznej prostoty, przyjmując, że atomy nie są bynajmniej ostatecznym kresem podzielności materii, przyjmując, że i one mają wewnętrzną strukturę i że przez zbadanie wewnętrznej struktury atomów będzie można w sposób prosty wyjaśnić obserwowane bogactwo różnorodności form atomów pierwiastków chemicznych. Pierwszą z takich prób była hipoteza francuskiego chemika Prousta (początek XIX w.). Zgodnie z tą hipotezą atomy różnych pierwiastków miały reprezentować różne stopnie kondensacji podstawowego składnika materii — wodoru. W tym ujęciu ciężary atomowe poszczególnych pierwiastków powinny byłyby być całkowitymi wielokrotnościami ciężaru atomowego wodoru, wskazując jednocześnie, z ilu atomów wodoru rozpatrywany atom jest zbudowany. Dokładne pomiary ciężaru atomowego różnych pierwiastków wykazały jednak, że hipoteza Prousta była niesłuszna. Została ona zarzucona, aby odżyć w zmienionej nieco formie dopiero prawie w sto lat później, dzięki odkryciu izotopów.

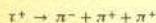
Na przełomie XIX i XX wieku stało się jasne, że atomy muszą być rozważane jako układy złożone z części dodatnio i ujemnie naelektryzowanych i że siły elektrycznego przyciągania stanowią więź decydującą o trwałości całego układu. Odkrycie elektronu — cząstki naładowanej ujemnie i blisko 2000 razy lżejszej od najbliższego atomu — atomu wodoru, skłoniło angielskiego fizyka Thomsona do wysunięcia hipotezy, w myśl której atomy pierwiastków miałyby się składać z dodatnio naelektryzowanej substancji, substancji ciężkiej i lekkich, ujemnie naładowanych elektronów. W wyniku kondensacji kilku atomów wodoru, tworzących atom ciężkiego pierwiastka, w dodatnio naładowanej, ciężkiej substancji atomowej znajdowałyby się odpowiednia liczba lekkich, ujemnie naładowanych elektronów, na kształt rodzynek w cieście babki wielkanocnej. Thomsonowski model atomu został jednak obalony przez doświadczenie. W 1911 r. Rutherford wykazał, że atomy mogą być istotnie rozpatrywane jako układy składające się z ciężkiej dodatnio naładowanej części i lekkich ujemnie naelektryzowanych elektronów. Obserwacje jego wykazały jednak ponadto, że ciężka dodatnio naelektryzowana substancja nie wypełnia całej objętości atomu, lecz jest skupiona w bardzo małym obszarze centralnym — w tzw. jądrze. (...)

Tu jednak zaczęły się piętrzyć trudności. Przyjmując, że pierwotnym budulcem materii są protony i elektrony o równych, ale przeciwnego znaku nabożach elektrycznych, należałoby np. przyjąć, że atom tlenu 16 razy większy od atomu wodoru, powinien składać się z 16 protonów i 16 elektronów. Z innych jednak danych wiadomo, że w atomie tlenu znajduje się jedynie osiem elektronów otaczających jądro. Pozostałe osiem elektronów powinny byłyby więc być zawarte w jądrze wraz z protonami. Istniały jednak zasadnicze trudności teoretyczne, przemawiające przeciwko przyjęciu takiej możliwości. Sytuacja uprościła się z chwilą wykrycia istnienia „neutralnych protonów” — cząstek o prawie tej samej masie co protony, ale pozbawionych naboju elektrycznego — elektrycznie neutralnych nazywanych neutronami. Był to czas (lata trzydzieste XX w.), gdy dążenie do prostoty w odniesieniu do podstawowych elementów i praw świeciło znowu jeden z przejściowych okresów swego triumfu. Elementarnym budulcem materii, cząstkami elementarnymi miały więc być elektrony, protony i neutrony. Lekkie ujemnie naładowane elektrony stanowiłyby zewnętrzną powłokę atomów, powłokę otaczającą maleńkie, ciężkie, dodatnio naładowane jądro. Jądra zaś składałyby się z kolei z protonów i neutronów — cząstek zwanych łącznie nukleonami. (...)

Listę cząstek elementarnych tego okresu należałoby jeszcze uzupełnić: fotonami będącymi niejako ziarnami energii promienistej, dodatnimi elektronami zwanymi pozytonami, różniącymi się od elektronów ujemnych jedynie znakiem naboju elektrycznego, wreszcie jeszcze lżejszymi cząstkami bez naboju elektrycznego zwanymi neutrino. Lista cząstek elementarnych pozostała więc krótka, zgodnie z naszym ogólnym dążeniem do prostoty.

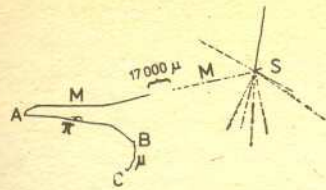


Rozpad mezonu π^+ . Proton pierwotnego promieniowania kosmicznego P w zderzeniu z jądrem wywołuje jego eksplozję. Jeden z odłamków po zatrzymaniu się rozpada się na trzy naładowane cząstki, dające ślady A, B i C. Cząstka A ginie „przez pożarcie”. Czarny prosty tor wystający z końca toru A — to rezultat eksplozji jądra (inne odłamki były widocznie elektrycznie obojętne, gdyż nie pozostawiły śladów w emulsji). Cząstka A była widocznie naładowana ujemnie (π^-). Powstałe cząstki — B i C rozpadają się podobnie jak mezon π z rysunku na stronie obok. (Niestety, potomek cząstki C uciekł z kłisy i dlatego nie możemy zaobserwować jego rozpadu). To, co zaszło w miejscu A, możemy zapisać w skrócie:



Jądra atomowe odpychają dodatnio naładowane mezony.

Stan ten nie trwał jednak długo. Wkrótce odkryto nowe cząstki — mezony lekkie, mezony ciężkie, hiperony. Lista cząstek elementarnych rośnie dziś szybko, i w tym jej wzroście gubi się pierwotna prostota związana z pojęciem elementarności. Toteż nasuwa się wniosek, że pojęcie elementarności jest pojęciem względnym, a treść jego zmienia się w miarę poznawania rzeczywistości. Stosujemy je chętnie tam, gdzie leżą chwilowe granice naszego poznania. Można by nawet powiedzieć, że jest ono w pewien sposób związane ze stanem naszej niewiedzy. Badania lat ostatnich dotyczące głównie zjawisk zachodzących przy zderzeniach mikrocząstek o bardzo wielkich energiach doprowadziły do wykrycia nowych, nietrwałych cząstek — nowych nietrwałych form materii. Koniec ich życia — to zazwyczaj samoistny rozpad, prowadzący ostatecznie do powstania znanych już dawniej form trwałych. Ponieważ nie znamy jeszcze praw pozwalających na ujęcie w całość wszystkich odkrytych w tej dziedzinie procesów, stać nas jedynie na wprowadzenie pewnego porządku przypominającego ustawienie książek na półce według ich wielkości. A więc nietrwale cząstki elementarne klasyfikujemy dziś zależnie od wielkości ich masy. Cząstki o masach pośrednich pomiędzy masą elektronu i protonu nazywamy m e z o n a m i, cząstkom zaś o masach pośrednich pomiędzy masą neutronu i deuteronu, tj. jądra atomu ciężkiego wodoru, nadajemy miano h i p e r o n ó w. Mezony dzielimy na lekkie i ciężkie. Do mezonów lekkich zaliczamy mezony o masie równej 273 masom elektronowym (masie mezonu π) oraz wszystkie mezony lżejsze; do mezonów ciężkich zaś — wszystkie mezony cięższe od mezonów π . Hiperony oznaczamy w skrócie literą Y, mezony ciężkie — literą K, lekkie zaś — literą L. W przypadku gdy indywidualność jakiejś cząstki zaznacza się wyraźnie, gdy znamy np. jej masę, średni czas życia i produkty rozpadu — nie poprzestajemy tylko na zaliczeniu jej do określonej kategorii, ale nadajemy jej jeszcze „imię chrzestne”. Stosujemy tu przy tym zasadę oznaczania określonych hiperonów dużymi literami greckimi, mezonów zaś — literami greckimi małymi. Ponieważ cząstki o takim samym „imieniu chrzestnym” różnić się jeszcze mogą znakiem naboju elektrycznego, więc litery greckie zaopatrujemy często wskaźnikiem +, - lub 0. Jeśli wreszcie nie wiemy jeszcze tyle o jakiejś cząstce, abyśmy mieli podstawę do nadania jej „imienia chrzestnego”, to oznaczamy ją często symbolem kategorii do której należy, zaopatrzonym u dołu wskaźnikiem, który zawiera część informacji posiadanych o danej cząstce. Np. symbol K_{π}^{\pm} oznacza cząstkę, która jest ciężkim mezonem, naładowanym dodatnio lub ujemnie, rozpadającym się z wyrzuceniem mezonu π . Te same własności ma co prawda mezon τ^{\pm} , ale zdradził on nam dużo więcej ze swych własności i dlatego nadaliśmy mu już „imię chrzestne”. Możliwe zreszta, że część przynajmniej cząstek typu K_{π}^{\pm} jest w rzeczywistości także mezonami τ^{\pm} , imienia tego nie możemy im jednak nadać, gdyż nie pokazały nam one jeszcze swego pełnego „dowodu osobistego”. Dlatego też nazywamy je ostrożnie obywatelami K rodzącymi potomka π .



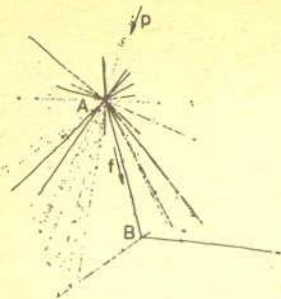
„Cztery pokolenia”. Nienaladowana cząstka (nie pozostawiająca więc śladu w emulsji fotograficznej) zderza się w miejscu S z jądrem atomu w emulsji wywołując jego eksplozję. Jeden z odłamków, ciężki mezon (M), zatrzymuje się w miejscu A, gdzie rozpada się na naładowany mezon π i cząstki nie zostawiające śladu w emulsji. Mezon π zatrzymuje się w miejscu B i rozpada się tu na mezon μ i nienaladowane cząstki. Mezon μ zatrzymuje się w miejscu C, gdzie rozpada się na cząstki nie dające śladu i elektron dający charakterystyczny, rzadki ślad. Wszystkie te cząstki giną „śmiercią naturalną”. Są więc dodatnie.



Mezonom naładowanym ujemnie grozi „śmierć przez pożarcie”, tzn. wchłonięcie ich przez dodatnio naładowane jądra atomowe otaczającej materii. „Śmierć przez pożarcie” zostaje jednak „pomszczona”: wchłonięty mezon powoduje eksplozję jądra, rozrywając je na części.

Typ cząstki	Symbol	Masa w masach elektronu	Energia rozpadu w MeV	Średni czas życia w sec	Schemat rozpadu
Hiperony (Y)	Λ^0	2181 ± 1	$36,9 \pm 0,2$	$3,6 \pm 5 \cdot 10^{-10}$	$\Lambda^0 \rightarrow P + \pi^-$ $(\Lambda^0 \rightarrow N^0 + \pi^0)$
	Ω^+	2330 ± 10	115 ± 5	10^{-10}	$\Omega^+ \rightarrow P + \pi^0$ $\Omega^+ \rightarrow N^0 + \pi^+$
	Y_{kask}^-	2581 ± 10	65 ± 5	10^{-10}	$Y_{\text{kask}}^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$
	Θ^0	966 ± 10	214 ± 5	$1,7 \pm 0,5 \cdot 10^{-10}$	$\Theta^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$
Mezony ciężkie K	τ^{\pm}	$965 \pm 0,7$	$74,7 \pm 0,3$	10^{-8}	$\tau^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} + \pi^+ + \pi^-$
	K_{π} $\begin{cases} \chi^{\pm} \\ K^{\pm} \end{cases}$	970 ± 20 1000	$E = 100$ $E = 50$	10^{-10} 10^{-10}	$\chi^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} + \gamma^0$ $K^{\pm} (\equiv \tau^{\pm}) \rightarrow \pi^{\pm} + \pi^0 + \pi^0$
	K_{μ} $\begin{cases} \chi^{\pm} \\ K_{\mu}^{\pm} \end{cases}$	$1200 - 1300$ 912 ± 20	— —	10^{-10} $5 \cdot 10^{-9}$	$\chi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \gamma^0 + \gamma^0$ $K_{\mu}^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \gamma^0$
	K_e^{\pm}	$1000 - 1300$	—	10^{-10}	$K_e^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \gamma^0 + \gamma^0$
Mezony lekkie L	π^{\pm}	273	—	$2,5 \cdot 10^{-8}$	$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu$
	π^0	264	—	$5 \cdot 10^{-15}$	$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$
	μ^{\pm}	207	—	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$\mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + 2\nu$

Podane wiadomości stanowią klucz do odszyfrowania załączonej tablicy streszczającej to, co wiemy dziś o mezonach i hiperonach. Nie omawiając bliżej danych tablicy zwrócimy jeszcze uwagę na niektóre fakty — nie dające się z tablicy odczytać.



Rozpad jądra zawierającego hiperon Λ^0 . Proton pierwotnego promieniowania kosmicznego p zderza się w miejscu A z jądrem emulsji i wywołuje jego eksplozję. Jeden z odłamków daje ślad f . Charakter śladu świadczy o tym, że cząstka ta jest jądrem złożonym z kilku nukleonów, zatrzymujących się w miejscu B . Tu nastąpił jej rozpad; widać ślady trzech odłamków. Energia wyzwolona w tym rozpadzie jest za duża na to, by rozpad mógł być wyjaśniony zwykłym uszkodzeniem jądra. Rozpad da się natomiast wyjaśnić ilościowo, jeżeli założymy, że jądro f zawierało poza zwykłymi nukleonami także cząstkę Λ^0 .

Mezony θ i τ rozpadają się na dwa i trzy mezony π , będące układami różnej parzystości. Zaliczenie ich w 1956 r. do grupy (tzw. multipletu) mezonów K oznaczało odrzucenie zasady zachowania parzystości dla rozpadów (oddziaływań słabych) [Red.].

Obecnie miony μ zaliczamy do rodziny leptonów uczestniczących jedynie w oddziaływań elektromagnetycznych i słabych. Mezony natomiast, np. π lub K , wraz z nukleonami i hiperonami biorą również udział w oddziaływań silnych. W lawinie nowo odkrytych cząstek znaleziono wiele mezonów cięższych od protonu. Cechą wyróżniającą wszystkie mezony jest wartość ich spinu (wewnętrznego momentu pędu) — 0, 1, 2, ... [Red.].

Chociaż dzisiaj nie uważa się hiperonów za stany wzbudzone nukleonów, to jednak grupuje się je w pojedynczą rodzinę barionów — cząstek oddziałujących silnie o spinach 1/2, 3/2, ... [Red.].

Dziś Y_{kask}^- oznacza się Ξ^- [Red.].

W ciągu ostatnich dwudziestu lat odkryto kilkaset dalszych cząstek i proces ten wydaje się nie mieć końca. Zapostulowano istnienie nowej grupy cząstek nie podlegających bezpośredniej obserwacji — kwarków — z których powinny być zbudowane wszystkie mezony i bariony. Wymyślono też teorię oddziaływań „elektrosłabych” łączącą w całość oddziaływania elektromagnetyczne i słabe cząstek. Wkrótce zapewne powstanie jednolita teoria zawierająca również oddziaływania silne. Opierają się tej unifikacji jedynie oddziaływania grawitacyjne. Próbuje się więc zarzucić czasoprzestrzenny, teoriopowy obraz świata proponowany przez Einsteina (patrz artykuł L. Infelda) wprowadzając obraz cząstkowo-kwantowy wraz z nową cząstką, grawitonem, odpowiedzialną za własności oddziaływań grawitacyjnych [Red.].

Zacznijmy od kilku informacji dotyczących mezonów π i μ . W próżni mezony π są cząstkami nietrwałymi, żyjącymi średnio około kilku stumilionowych części sekundy i rozpadającymi się na mezon μ i neutrino. Mezony μ w tych warunkach żyją przeciętnie prawie sto razy dłużej i rozpadają się na elektron i dwa neutrino. W materii zarówno losy mezonów π , jak i μ zależą wybitnie od znaku ich naboju elektrycznego. Jeśli materia jest dostatecznie gęsta, poruszające się w niej mezony π i μ mogą być zahamowane tak szybko, że nie zdążą się rozpaść w locie. Mezony naładowane dodatnio po zahamowaniu giną „śmiercią naturalną” rozpadając się normalnie — natomiast mezonom naładowanym ujemnie grozi „śmierć przez pożarcie”, przez wchłonięcie ich przez dodatnio naładowane jądra atomowe otaczającej materii. „Śmierć przez pożarcie” zostaje jednak „pomszczona”: wchłonięty mezon powoduje eksplozję jądra, rozrywając je na części.

Inną nietrwałą cząstką, o której mamy dziś stosunkowo dużo informacji, jest hiperon Λ^0 . Żyje on średnio sto razy krócej od mezonów π , a rozpada się na proton i mezon π^- . Hiperony Λ^0 mogą wchodzić w skład jąder atomowych, odgrywając w nich rolę podobną do zwykłych nukleonów. Anormalne jądra atomowe zawierające w miejscu jednego z nukleonów cząstkę Λ^0 są jednak układami bardzo nietrwałymi. Cząstka Λ^0 rozpadając się powoduje bowiem eksplozję rozrywającą jądro, eksplozję świadczącą zresztą o anormalnym stanie jądra. Niezmiernie duża, a jednocześnie dokładnie określona energia rozpadu zdradza przy tym, że za ładunek materiału wybuchowego zawartego w jądrze odpowiedzialna jest cząstka Λ^0 . Rozszyfrowanie takiego właśnie przypadku eksplozji jądra zawierającego hiperon Λ^0 , którego dokonano przeszło dwa lata temu w Zakładzie Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego, wykazało po raz pierwszy, że niektóre przynajmniej z hiperonów na równi z nukleonami mogą być składnikami jąder atomowych.

Fakty te, wraz z pewnymi ilościowymi danymi dotyczącymi wytwarzania hiperonów Λ^0 w zderzeniach bardzo wielkich energii, rzucają trochę światła na samą zagadnienie istoty hiperonów. Wydaje się, że hiperony nie są cząstkami zasadniczo różnymi od nukleonów, że są, jak to mówimy, nukleonami w stanie wzbudzonym. Przyjęcie tego poglądu pociąga jednak za sobą konieczność dalszego uogólnienia i pogłębienia podstawowych praw umożliwiających stworzenie konsekwentnej teorii cząstek elementarnych. Wydaje się, że zapora, na której oparł się nasz pochód w głąb materii, zapora, której na imię nukleony lub mówiąc ogólniej cząstki elementarne, poczyna trzeszczeć. Przez szpary błyskają nowe perspektywy — zarysowywać się zaczyna dalsza droga.

Omawiając hiperony warto zatrzymać się chwilę na najcięższej ze znanych dziś cząstek tego typu — hiperonie Y_{kask}^- . Nazwa cząstki związana jest z charakterystycznym dla niej procesem rozpadu, który prowadzi do emisji dwu nietrwałych cząstek: hiperonu Λ^0 i mezonu π^- , zapoczątkowując kaskadę wtórnych procesów. Przechodząc do środkowej części tablicy, do mezonów ciężkich, podkreślić należy, że choć faktów dotyczących cząstek tego typu znamy dużo — trudno jeszcze mówić o jakimś logicznym powiązaniu całości, o jakichś wyraźnie zaznaczających się regularnościach. Najlepiej znanym ciężkim mezonem jest mezon τ^\pm . Wiemy, że rozpada się na trzy mezony π , znamy wcale dokładnie jego masę i średni czas życia.

Nasze informacje dotyczące innych ciężkich mezonów — z wyjątkiem może mezonu neutralnego θ^0 , są już znacznie uboższe. Nie zatrzymując się dłużej nad dalszym analizowaniem własności poszczególnych cząstek wymienionych w tablicy, przejdziemy do pytania, które zapewne narzuca się Czytelnikowi, pytania: skąd wiemy o tym wszystkim?

Wspomnieliśmy już kilkakrotnie, że zarówno mezony, jak i hiperony wytwarzane są w zderzeniach bardzo wielkich energii, zderzeniach, gdzie pociskami są cząstki elementarne trwale lub nietrwałe, albo zwarte ich układy — jądra atomowe, tarcza zaś — zwykła materia. Otóż najważniejszym laboratorium fizyka badającego tę głęboko ukrytą strukturę materii, laboratorium dostarczającym najpotężniejszych pocisków — jest naturalnie laboratorium promieni kosmicznych. Atmosfera ziemska bombardowana jest ustawicznie rojem mikropocisków docierających do nas z głębi wszechświata. Pociski te — to jądra atomowe pierwiastków, głównie pierwiastków najlżejszych, poruszające się z zawrotnymi prędkościami, zbliżonymi do prędkości światła. Cząstki pierwotnego promieniowania kosmicznego zderzając się z jądrami atomów atmosfery stają się źródłem procesów, w których rodzą się cząstki nietrwałe: mezony i hiperony. Zachodzące przy tym procesy głęboko odbiegają od świata naszych wyobrażeń. Procesy te wydadzą się nam może mniej dziwne, gdy uświadomimy sobie lepiej, jak niesłychanie daleki pod względem skali jest świat, w którym się odbywają. Skala zjawisk objętych ludzkim poznanem jest dziś niezmiernie wielka. Sięga w górę czy też w dal — ku mgławicom wszechświata, w dół zaś czy też w głąb — do wnętrza jądra atomowego. Nasz świat, świat naszej skali znajduje się gdzieś pośrodku między tymi „krańcami”. W chwili obecnej interesuje nas kraniec dolny. Obiektom, które tam właśnie spotykamy, dajemy chętnie miano elementarnych, przez poznanie praw rządzących nimi chcielibyśmy wydedukować prawa rządzące procesami zachodzącymi w naszym świecie.