

Czy proton jest cząstką trwałą?

Dr Danuta KIEŁCZEWSKA

Rozwój poglądów na temat stabilności protonu jest fascynującym przykładem poszukiwania najgłębiej ukrytych przyczyn obserwowanych zjawisk.

W artykule stosujemy następujące

oznaczenia:
p — proton
n — neutron
 ν — neutrino
 e^- — elektron
 e^+ — pozyton
 π — mezon pi

Jądra atomowe składają się z protonów i neutronów. Swobodny neutron rozpada się średnio po 15 minutach na proton, elektron i antyneutrino (tzw. rozpad β). Neutron związany w stabilnym jądrze nie ulega takiemu rozpadowi. Podobnie, trwały ze względu na rozpad β jest proton, gdyż ma masę nieco mniejszą od neutronu. Trwałość protonu (i związanego neutronu) nie wynika jednak z żadnej z podstawowych zasad zachowania. Istnieje wiele cząstek, na które mogłyby się rozpadać z zachowaniem energii, pędu, momentu pędu i ładunku. Wszystkie te wielkości są zachowane na przykład w rozpadzie protonu na dwa pozytony i elektron ($p \rightarrow e^+e^+e^-$). Podobnie dla związanego neutronu do pomyslenia jest rozpad $n \rightarrow e^+e^-\nu$. Nigdy jednak takich procesów nie zaobserwowano.

Nie obserwuje się również rozpadów elektronów, ale elektron jest najlżejszą cząstką obdarzoną ładunkiem i nie mógłby się rozpadać bez pogwałcenia zasady zachowania energii lub ładunku. Przez analogię przyjęto zatem, że proton jest najlżejszą cząstką mającą ładunek barionowy (liczbę barionową) $B = +1$. Neutron ma ładunek barionowy też równy $+1$, a dla antyprotonu i antyneutronu $B = -1$. Postulowano dalej, że suma liczb barionowych jest zachowywana w reakcjach podobnie jak całkowity ładunek elektryczny.

W przypadku istnienia siły „barytropowej” różne jądra byłyby różnie przyciągane przez Ziemię, ponieważ każde jądro ma nieco inny stosunek masy do liczby barionowej. Jednak analiza precyzyjnych eksperymentów badających pole grawitacyjne Ziemi wykazała, że siła przyciągania ciał jest proporcjonalna tylko do masy, a nie do ich ładunku barionowego.

Prawo zachowania ładunku elektrycznego jest zasadniczą cechą elektrodynamiki — teorii opisującej oddziaływanie cząstek naładowanych. Nie istnieje natomiast podobnie ugruntowana teoria, w którą udałooby się wbudować zasadę zachowania ładunku barionowego. W szczególności nie stwierdzono przejawów siły „barytropowej”, która analogicznie do siły Coulomba byłaby proporcjonalna do całkowitego ładunku barionowego.

Podejrzanie co do zachowania liczby barionowej nasuwa również fakt, że we Wszechświecie obserwuje się dużo więcej materii ($B = +1$) niż antymaterii ($B = -1$). Jeżeli odrzucimy nieatrakcyjną hipotezę, że obserwowana obecnie asymetria była zadaniem warunkiem początkowym, to musimy przyjąć, że w pierwszych chwilach Wielkiego Wybuchu zachodziły procesy nie zachowujące ładunku barionowego.

Procesy takie, jeśli występują i dziś, są z pewnością niezwykle rzadkie. Można na przykład ocenić, ile nukleonów (tj. protonów i neutronów) w ciele człowieka może ulec rozpadowi, zanim zostanie przekroczona dopuszczalna dawka promieniowania. Okazuje się, że takiej dawce odpowiada rozpad 3×10^8 nukleonów w 1 kg w ciągu roku, czyli jednego nukleonu na 2×10^{18} . Przyjmując, że dawkę 100 razy większą poczulibyśmy już na pewno, możemy wnioskować, że rozpady zdarzają się nie częściej niż jeden na 2×10^{16} nukleonów w ciągu roku. Wynika z tego, że pojedynczy nukleon żyje średnio dłużej niż 2×10^{16} lat. Jest to imponująca długowieczność, jeśli zważyć, że wiek Wszechświata oceniany jest na zaledwie 10^{10} lat.

Od 1954 roku próbowano doświadczalnie wyznaczać dolną granicę czasu życia protonu. Stosowano do tego celu detektory zaprojektowane do rejestracji neutrin kosmicznych. W 1974 roku fizycy amerykańscy pod kierunkiem F. Reinesa, po przeanalizowaniu danych zebranych w ciągu 9 lat pracy dwudziestotonowego detektora umieszczonego w kopalni złota w Afryce Południowej, otrzymali dolną granicę czasu życia nukleonu równą 3×10^{29} lat. Ta sama grupa fizyków wystąpiła wtedy z propozycją budowy większego detektora, jednakże nie otrzymała potrzebnych funduszy. Rozpad protonu nie wydawał się wówczas dostatecznie ważnym zagadnieniem.

Tymczasem w fizyce cząstek elementarnych uzyskano wiele nowych wyników. Opisano w jednolity sposób oddziaływanie elektromagnetyczne wiążące m.in. elektrony z jądrami w atomach, oraz oddziaływania słabe, odpowiedzialne np. za rozpad β . W ramach tego opisu podstawowymi składnikami materii są kwarki oraz leptony. Z kwarków zbudowane są nukleony, a także wszystkie inne cząstki oddziałujące za pośrednictwem oddziaływań silnych. Do leptonów zaliczane są te cząstki materii, które silnie nie oddziałują, np. elektron i neutrino. Kwarki i leptony stanowią więc dwie różne i niezależne rodziny.



Mezony π to cząstki 7 razy lżejsze od nukleonów, zbudowane z kwarków i antykwarków.



Rozwiązanie zadania M 450. Obliczamy kolejno

- $b_1 := a_1 + a_2,$
- $b_2 := a_1 \cdot a_2,$
- $b_3 := a_3 + a_4,$
- $b_4 := a_3 \cdot a_4,$
- $b_5 := b_1 + b_3,$
- $b_6 := b_5 + a_5 = p,$
- $b_7 := b_5 \cdot a_5,$
- $b_8 := b_2 + b_4,$
- $b_9 := b_1 \cdot b_3,$
- $b_{10} := b_8 + b_9,$
- $b_{11} := b_{10} + b_7 = q,$
- $b_{12} := b_{10} \cdot a_5,$
- $b_{13} := b_1 \cdot b_4,$
- $b_{14} := b_2 \cdot b_3,$
- $b_{15} := b_{13} + b_{14},$
- $b_{16} := b_{12} + b_{15} = r,$
- $b_{17} := b_{15} \cdot a_5,$
- $b_{18} := b_2 \cdot b_4,$
- $b_{19} := b_{17} + b_{18} = s,$
- $b_{20} := b_{19} \cdot a_5 = t.$

A czy może być łącznie mniej niż 20 działań?

Naładowana cząstka poruszająca się w przezroczystym ośrodku z prędkością większą od prędkości światła w tym ośrodku emituje światło, tzw. promieniowanie Czerenkowa. Światło to wysyłane jest wzdłuż stożka wokół kierunku lotu cząstki, analogicznie do fal akustycznych wysyłanych przez samoloty ponaddźwiękowe. W odległości pięciu metrów od toru cząstki natężenie promieniowania jest tak małe jak od żarówki umieszczonej w odległości Księżyca.

Miony są to cząstki oddziałujące podobnie jak elektrony, o masie 200 razy większej od masy elektronu.



Rozwiązanie zadania M 448. Rozpatrzmy dzielniki liczby n , które nie przewyższają \sqrt{n} .

Jest ich nie więcej niż $\frac{k+1}{2}$, ponieważ

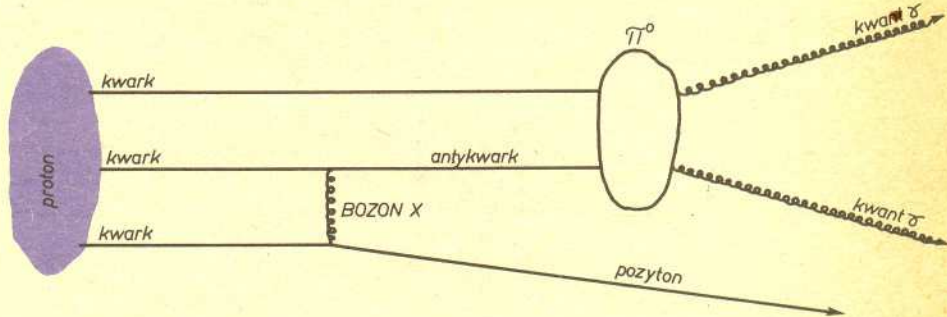
każdemu dzielnikowi $d < \sqrt{n}$ można

przyporządkować dzielnik $\frac{n}{d} > \sqrt{n}$ —

takie przyporządkowanie jest różnowartościowe.

Stąd $\frac{k}{2} < \frac{k+1}{2} \leq \sqrt{n}$, czyli $k^2 < 4n$.

W 1974 roku zaproponowano teorię (oznaczoną symbolem SU(5)), która do jednolitego opisu włączała również oddziaływania silne, zachodzące między kwarkami. Wymagało to połączenia kwarków i leptonów w jedną rodzinę, a więc w konsekwencji dopuszczenie możliwości przekształceń jednych w drugie. Na przykład jeden z trzech kwarków protonu mógłby przejść w e^+ , a drugi w antykwark, który z trzecim kwarkiem utworzy nienaładowany mezon π^0 (rys.). Proces ten następowałby przez wymianę między kwarkami hipotetycznej cząstki (bozonu X), którego istnienie jest niezbędnym elementem jednolitego opisu oddziaływań elektroślabyh i silnych.



Czas życia protonu wyznaczony w ramach teorii SU(5) jest krótszy niż 2×10^{31} lat. Wynik ten jest już w zakresie możliwości doświadczalnych, bo jeśli w 1 g materii znajduje się około 6×10^{23} nukleonów (liczba Avogadra), to w 1000 tonach powinno średnio zajść ponad 26 rozpadów w ciągu roku. W 1979 roku eksperyment podobny do zaproponowanego 5 lat wcześniej został zaakceptowany. Do jego realizacji przystąpili najpierw fizycy z uniwersytetów w Irvine (Kalifornia) i Michigan oraz z laboratorium w Brookhaven. Potem przyłączyły się inne laboratoria w tym również z Uniwersytetu Warszawskiego.

Aby uzyskać maksymalną ilość badanej materii tanim kosztem, wypełniono detektor 8 tysiącami ton wody. Promieniowanie Czerenkowa emitowane przez naładowane szybkie cząstki przechodzące przez detektor rejestrowane jest przez 2048 fotopowielaczy umieszczonych w ścianach detektora. Impulsy z fotopowielaczy analizowane są następnie przez komputer.

Jak powinien wyglądać w takim detektorze wspomniany rozpad $p \rightarrow e^+ \pi^0$? Każdy z produktów rozpadu powinien mieć całkowitą energię bliską połowie masy protonu. Ponieważ proton rozpada się niemal w spoczynku, pęd pozytonu powinien być przeciwny do pędu mezonu π^0 . Pozyton wysyła stożek światła przebywając drogę około 2,5 metra. Mezon π^0 rozpada się prawie natychmiast na dwa fotony, które w przybliżeniu zachowują jego kierunek i po przebyciu w wodzie drogi średnio 36 cm produkują pary $e^+ e^-$. W efekcie fotopowielacze oświetlone przez rozpadający się proton powinny znajdować się w przybliżeniu w dwóch pierścieniach na przeciwnych ścianach detektora.

W detektorze mogą zachodzić też inne zjawiska, które wywołują sygnały podobne do oczekiwanych z rozpadów nukleonów. Najpoważniejszy problem stanowią cząstki promieniowania kosmicznego. Dlatego detektor zbudowano w kopalni soli, około 600 m pod jeziorem Erie. Na tę głębokość docierają tylko miony i neutrino.

Po dwóch latach pracy detektora zebrano dane, spośród których wybrano około 400 zdarzeń. Zarówno liczba zdarzeń, jak i ich własności zgadzają się z tym, czego oczekiwaliśmy od oddziaływań neutrin atmosferycznych. Nie można jednak wykluczyć, że niektóre ze zdarzeń są rozpadami nukleonów. Takich „kandydatów” na różne sposoby rozpadu jest ponad 20. Na podstawie tych przypadków obliczono górne granice prawdopodobieństw 34 sposobów rozpadu. Odpowiadające im dolne granice czasu życia nukleonu wynoszą od 10^{31} lat do 50×10^{31} lat.

Żadne z 400 zdarzeń nie przypomina oczekiwanego rozpadu $p \rightarrow e^+ \pi^0$. Jeżeli więc byłby to główny sposób rozpadu protonu, to jego czas życia jest dłuższy niż 25×10^{31} lat, co ponad dziesięciokrotnie przewyższa przewidywania teorii SU(5). Doświadczenie wykazuje zatem, że prosty koncepcyjnie schemat ujednoczenia oddziaływań nie sprawdza się i należy szukać innych.

Nie znamy w tej chwili definitywnej odpowiedzi na pytanie, czy proton jest cząstką trwałą. Gdy po raz pierwszy badano to zagadnienie doświadczalnie, powszechna była wiara fizyków w trwałość protonu. Obecnie ogół fizyków sądzi, iż proton nie jest cząstką trwałą, mimo że trzydzieści lat doświadczeń obniżyło górną granicę prawdopodobieństwa rozpadu aż 10^{15} razy.