

Delta i fizyka cząstek elementarnych (VI): Od LEP-u do LHC: fizyka zapachu i naruszenie CP

Piotr CHANKOWSKI*

Czysta chromodynamika przewiduje (jak się przyjmuje, bo obliczyć tego się jeszcze nie daje) istnienie dwóch cząstek,

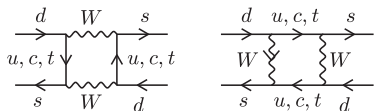
$K^0 (= d\bar{s})$ i $\bar{K}^0 (= \bar{d}s)$, o takich samych masach i dziwnościach $+1$ i -1 . Dziwność nie jest jednak zachowywana przez oddziaływania słabe, co powoduje, że fizycznymi cząstkami są nie K^0 i \bar{K}^0 , lecz ich pewne mieszanki K_L i K_S – długo- i krótkożyciowe neutralne kaony. Gdyby pominąć łamanie CP, tymi fizycznymi mezonami byłyby cząstki o dobrze określonych wartościach CP. Przy zamianie cząstek na antycząstki i odwrotnie kombinacja

$K_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(K^0 + \bar{K}^0)$ zmienia znak, ma

więc CP = -1 , zaś kombinacja

$K_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(K^0 - \bar{K}^0)$ pozostaje

niezmieniona, ma więc CP = $+1$. Na dwa mezony π , które razem mają CP = $+1$, mógłby się więc rozpaść tylko K_1 , a K_2 – tylko na trzy mezony π mające CP = -1 i znacznie mniejszą objętość dostępnej przestrzeni fazowej stanu trzech π tłumaczy wtedy (zob. odcinek I), dlaczego K_2 żyje dużo dłużej niż K_1 . Łamanie CP komplikuje powyższą analizę: $K_L \propto K_2 + \epsilon K_1$, $K_S \propto K_1 - \epsilon K_2$, gdzie ϵ jest liczbą zespoloną o małym module. Są wówczas możliwe dwa sposoby zajęcia niezachowującego CP rozpadu mezonu K_L na dwa mezony π : albo rozpadowi może ulec składowa K_1 mezonu K_L (ten efekt mierzy parametr ϵ), albo na dwa mezony π rozpaść się może bezpośrednio składowa K_2 (ten efekt jest mierzony parametrem ϵ').



Diagramy Modelu Standardowego

odpowiedzialne za mieszanie $K^0 - \bar{K}^0$.

Wartość otrzymywanej z nich amplitudy silnie redukuje opisany w odcinku III mechanizm GIM. Podobny jest mechanizm mieszania mezonów $D^0 - \bar{D}^0$ i $B^0 - \bar{B}^0$. W tym ostatnim przypadku dominujący przyczynik do amplitudy mieszania daje kwark t , co pozwoliło wnioskować o wartości jego masy jeszcze przed bezpośrednim odkryciem (odcinek IV).

Unitarność macierzy CKM koreluje przewidywania Modelu Standardowego dla procesów rzadkich i tych, w których niezachowywane jest CP. W szczególności sprawia ona, że o niezerowej wartości kąta δ (czyli o łamaniu symetrii CP) można wnioskować także na podstawie samych wartości bezwzględnych elementów macierzy CKM wyznaczonych z procesów, w których CP jest zachowywane.

Nawet po odkryciu trzeciej rodziny fermionów (kwarków b i t , leptonu τ i neutrina ν_τ) otwarte pozostawało pytanie, czy słuszna jest propozycja Kobayashiego i Maskawy opisana w odcinku III, według której za niezachowanie symetrii CP, zamieniającej cząstki na ich antycząstki, odpowiada tylko jeden parametr – wspomniany w odcinku I kąt δ . Jeszcze przed powstaniem Modelu Standardowego wysunięta została hipoteza, że za niezachowanie CP jest odpowiedzialne nie oddziaływanie słabe, lecz jakieś inne, jeszcze słabsze oddziaływanie, które zawsze zmienia dziwność hadronu o dwie jednostki. Według tej propozycji rozpad $K_L \rightarrow \pi\pi$ zachodziłby tylko poprzez mieszanie się mezonów K^0 i \bar{K}^0 opisywane parametrem ϵ . Model Standardowy uwzględniający propozycję Kobayashiego i Maskawy przewiduje natomiast, że za rozpad ten odpowiedzialne są dwa mechanizmy: łamanie CP w mieszanii i łamanie bezpośrednie opisywane parametrem ϵ' . Rozstrzygnięcie tej kontrowersji wymagało zmierzenia ϵ'/ϵ . Sytuacja była niepewna aż do końca XX wieku, gdyż dwa eksperymenty, NA31 w CERN-ie i E731 w Fermilabie, dawały sprzeczne wyniki, przy czym wynik drugiej grupy był w granicach błędu zgodny z $\epsilon' = 0$. Dopiero w roku 1999 nowe eksperymenty, NA48 w CERN-ie i KTeV w Fermilabie, zgodnie potwierdziły niezerową wartość ϵ' . Co więcej, rachunki teoretyczne pokazują, że Model Standardowy przewiduje wartość $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon)$ zgodną z danymi.

Póki znane były tylko trzy kwarki u , d i s , fizyka zapachu była z konieczności ograniczona do badania procesów, w których zmianie ulega dziwność, a najciekawszymi cząstkami pod tym względem były neutralne kaony, gdyż tylko w ich rozpadach i mieszanii obserwowane były efekty łamania symetrii CP (Δ_{89}^4 , Δ_{99}^4). Opisane w odcinku IV odkrycie cięższych kwarków c i b i w końcu kwarka t otworzyło przed badaniami nowe obszary (ponieważ rodzaje kwarków nazywa się zapachami, ten dział fizyki nazywa się zachęcająco „fizyką ciężkich zapachów”). Ważnym polem badań zarówno doświadczalnych, jak i teoretycznych stało się wyznaczanie elementów macierzy CKM z rozpadów, w których zapach kwarka ulega zmianie wskutek wymiany jednego wirtualnego bozonu W , który przechodzi później w parę leptonów (pozwala to wyznaczać tylko wartości bezwzględne elementów macierzy CKM) i następnie sprawdzanie, czy procesy rzadkie, w tym także te, w których niezachowane jest CP, są poprawnie opisane przez Model Standardowy. Ponieważ procesom rzadkim odpowiadają tylko diagramy z zamkniętymi pętlami, ich amplitudy mogłyby łatwo być modyfikowane przez dodatkowe pętle, których linie odpowiadają cząstkom spoza Modelu Standardowego. W związku z tym bardzo poważnie liczone na to, że właśnie w fizyce ciężkich zapachów i naruszenia CP odkryte zostaną odstępstwa od przewidywań tej teorii objawiające się niezgodnościami przy wyznaczaniu elementów macierzy CKM z kombinacji danych dotyczących różnych procesów.

W XXI wieku dzięki uruchomieniu w SLAC (USA) i KEK (Japonia) eksperymentów BaBar i BELLE, czyli akceleratorów stanowiących „fabryki” mezonów B , udało się przeprowadzić dokładne pomiary wielu słabych rozpadów tych cząstek, w tym także rozpadów niezachowujących CP. Zmierzone zarówno efekty bezpośredniego łamania symetrii CP, jak też i efekty łamania CP zachodzącego przez mieszanie mezonów B^0 i \bar{B}^0 (Δ_{01}^{11} , Δ_{02}^{12}), analogiczne do mieszania neutralnych kaonów. W odróżnieniu od efektów łamania CP w rozpadach kaonów (Δ_{89}^4), które są bardzo małe (na poziomie 10^{-3} , a więc występują w jednym rozpadzie na tysiąc), w przypadku rozpadów mezonów B efekty takie są rzędu od 0,1 do 1. W tych przypadkach, w których udaje się przeprowadzić wystarczająco dokładne rachunki (np. dla $B^0 \rightarrow J/\psi K_S$), przewidywania Modelu Standardowego są zgodne z danymi (Δ_{02}^{12}). Badanie procesów, w których CP nie jest zachowywane, jest obecnie z powodzeniem kontynuowane przez eksperyment LHCb przy LHC. W szczególności udało się tam po raz pierwszy zaobserwować efekty bezpośredniego łamania CP w rozpadach zawierających kwark c lub \bar{c} mezonów powabnych D (Δ_{12}^1).

Mimo iż najczęściej rozpatrywane uogólnienia Modelu Standardowego (zwłaszcza teorie supersymetryczne) przewidywały, że efekty „nowej fizyki” powinny najwyraźniej przejawiać się w oddziaływaniach najcięższych kwarków (b i t), do dziś nie zarejestrowano tu żadnych przekonujących (w sensie statystycznej istotności) odstępstw od przewidywań Modelu Standardowego.

*Wydział Fizyki,
Uniwersytet Warszawski