

Znaczenie symetrii i anomalii QCD w fenomenologii mezonów (OPUS 17, F. Giacosa)

W królestwie cząstek elementarnych symetrie są bardzo ważne: to one wyznaczają właściwości teorii opisujących cząstki. Celem niniejszego projektu jest wykorzystanie symetrii do zrozumienia kwarków i obiektów, które je zawierają.

W jaki sposób kwarki oddziałują ze sobą? Czynią to poprzez wymianę cząstek zwanych gluonami. Jak sama nazwa wskazuje (ang. glue = klej), oddziaływanie to jest bardzo silne. Tak silne, że nie można zaobserwować wyizolowanych kwarków (właściwość o nazwie uwięzienia). Kwark i antykwark mogą się łączyć ze sobą, tworząc stan związany: wiele cząstek tego typu, zwanych mezonami, zostało zaobserwowanych w eksperymentach. Kwarki mogą łączyć się także po 3, tworząc bariony. Takimi barionami są na przykład proton i neutron, tworzące jądro atomu.

Każdy kwark posiada dwie wewnętrzne właściwości. Pierwszą z nich jest „kolor”: kwark może być czerwony, zielony lub niebieski. Nie są to kolory w dosłownym tego słowa znaczeniu, ale odzwierciedlają one zaawansowaną matematyczną analogię, stanowiącą źródło nazwy teorii opisującej kwarki i gluony: chromodynamiki kwantowej (QCD). W przeciwieństwie do kwarków, mezony i bariony są „białe”, tzn. ładunki kolorowe kwarków wchodzących w ich skład wzajemnie się neutralizują. Drugą właściwością kwarków jest „zapach”: w projekcie będziemy rozważać trzy lekkie kwarki, z zapachami - górny (up), dolny (down) i dziwny (strange). Gluony działają demokratycznie: oddziałują z kwarkami górnym, dolnym i dziwnym z tą samą intensywnością. Jest to tak zwana symetria zapachowa, która jest ważną symetrią w chromodynamice kwantowej. W konsekwencji istnieje dziewięć możliwych kombinacji połączeń kwarka i antykwarka: górny i antygórny, górny i antydziwny itd. Zatem, mezony tworzą nonety (nonet = 9) o podobnej masie.

Ale to nie wszystko – kwark zachowuje się jak mała, wirująca kuleczka, która może być prawoskrętna lub lewoskrętna, w zależności od kierunku obrotu. Gluony oddziałują z taką samą siłą z prawoskrętnymi, jak i lewoskrętnymi kwarkami. Konsekwencje tej symetrii, zwanej symetrią chiralną, są bardzo ważne: dla każdego nonetu mezonów istnieje chiralny nonet - partner, który według oczekiwań powinien mieć taką samą masę i właściwości. Tymczasem w eksperymentach nie odnaleziono nonetów chiralnych partnerów o takiej samej masie. Dzieje się tak ze względu na ważne zjawisko występujące w wielu obszarach fizyki: symetria podstawowa (w tym wypadku symetria chiralna) zostaje spontanicznie złamana. Żeby zobrazować, co oznacza spontaniczne złamanie symetrii, możemy wyobrazić sobie meksykański kapelusz z piłką na czubku. System jest symetryczny, ale niestabilny: piłka nie utrzyma się długo na czubku kapelusza, tylko spadnie w pewnym (nieprzewidzianym) kierunku. Można ją będzie znaleźć w rondzie kapelusza – oryginalna symetria nie jest już widoczna. W chromodynamice kwantowej (QCD), takie spontaniczne złamanie powoduje różnicę masy chiralnych partnerów. Ale nawet jeśli partnerzy chiralni nie mają takiej samej masy, to nadal są ze sobą powiązani: w pewnych przypadkach wiemy, które mezony są chiralnymi partnerami, a w innych nie możemy ich zidentyfikować. W ramach proponowanego projektu zamierzamy to poprawić. Jest jeszcze jedna ważna i specyficzna koncepcja w QCD: tzw. anomalie, które pojawiają się kiedy symetria w teorii jest złamana przez fluktuacje kwantowe (tzn. cząstki i antycząstki są tworzone i niszczone w sposób ciągły, nawet w próżni). Dwie anomalie, zwane anomalią skali i osiową, są konsekwencją faktu, że próżnia w QCD jest bardzo skomplikowanym obiektem.

W ramach proponowanego projektu zamierzamy przestudiować zarówno różne mezony w świetle tej (ukrytej) symetrii chiralnej, jak i anomalie. Jak pogrupować mezony w partnerów chiralnych? Jaki mają wpływ ukryte symetrie i anomalie na właściwości mezonów?

W praktyce, użyjemy podstawowych symetrii QCD do budowy teoretycznych modeli opisujących mezony: wówczas obliczymy ich masy i rozpady. Obecnie toczy się i jest zaplanowanych wiele eksperymentów zajmujących się mezonami zbudowanymi z lekkich kwarków. Naszym celem jest powiązanie rozważań teoretycznych opartych na symetriach do bieżących i przyszłych pomiarów tych krótko żyjących obiektów stwarzanych w laboratoriach.