

17 Cząstki egzotyczne

Do tej pory rozważaliśmy tylko bariony złożone z trzech kwarków oraz mezony zbudowane z par kwark-antykwar. Są to najprostsze układy będące singletami ze względu na transformacje SU(3) związane z symetrią cechowania, na której opiera się chromodynamika kwantowa. Postulat, że stany fizyczne muszą być białe wyklucza istnienie swobodnych kwarków, czy też na przykład stanów czterokwarkowych. Jednakże dopuszczalne są pewne kombinacje kwarków i antykwarków, które są singletami lokalnej symetrii SU(3), a wychodzą poza schemat trzech kwarków lub par kwark-antykwar:

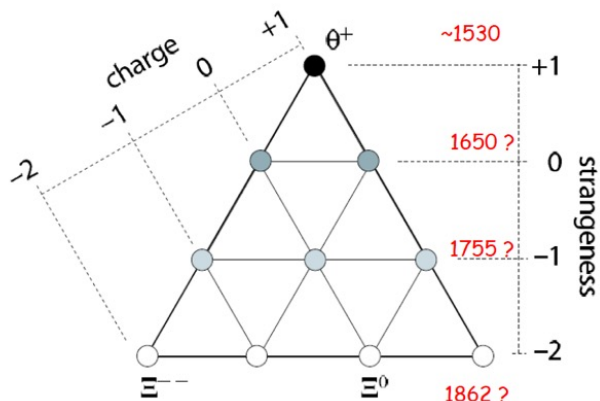
- pentakwarki ($q_1q_2q_3q_4\bar{q}_5$) o liczbie barionowej 1,
- dibariony (np. $uuddss$) o liczbie barionowej 2,
- tetrakwarki ($q_1q_2\bar{q}_3\bar{q}_4$) o liczbie barionowej 0,
- hybrydy – stany związane kwarków i gluonów,
- tzw. *glueball'e*, cząstki będące stanami związanymi gluonów bez kwarków.

Spośród wyżej wymienionych typów cząstek egzotycznych można wyróżnić cząstki o egzotycznych liczbach kwantowych, których nie da się otrzymać ze złożenia trzech kwarków lub kwarków i antykwarków oraz cząstki *kryptoegzotyczne*, to znaczy takie, których liczby kwantowe można otrzymać ze złożenia trzech kwarków lub kwarków i antykwarków, ale ich własności takie jak np. kanały rozpadów nie dają się wyjaśnić bez założenia, że są to cząstki o strukturze egzotycznej. Dodatkową trudnością w interpretacji pewnych stanów jako kryptoegzotycznych jest występujące mieszanie ze stanami nieegzotycznymi o tych samych liczbach kwantowych.

W roku 2003 dwie grupy doświadczalne ogłosiły odkrycie cząstki Θ^+ , która została zinterpretowana jako najlżejszy stan antydekupletu SU(3): ($uudd\bar{s}$), patrz Rysunek 17.1. Spośród dziesięciu cząstek pokazanych na diagramie wagowym na Rys. 17.1 tylko Θ^+ , Ξ^{--} oraz Ξ^+ mają egzotyczne liczby kwantowe, pozostałe elementy antydekupletu są kryptoegzotyczne. Rzeczywiście, mają one liczby kwantowe identyczne jak cząstki w podstawowym oktecie SU(3).

Niestety szereg grup doświadczalnych, które poszukiwały cząstki Θ^+ , nie potwierdziło istnienia tego egzotycznego rezonansu, choć dwie grupy, które ogłosiły jego istnienie (eksperyment LEPS w Japonii i eksperyment Diana w Rosji) podtrzymują swoje pierwotne wyniki. Podobnie wątpliwy status mają ogłoszone w roku 2016 przez grupę eksperymentalną z Fermilabu tetrakwarki o jawnie egzotycznych liczbach kwantowych: $s\bar{b}u\bar{d}$ oraz $s\bar{b}\bar{d}u$.

Jeszcze w latach 70 dwudziestego wieku R.L. Jaffee zapostulował, że całkowicie symetryczny stan SU(3) $uuddss$, nazwany dibarionem lub cząstką H , może mieć masę poniżej mas dwóch hiperonów $\Lambda = uds$. Niestety nie ma do dziś ewidencji doświadczalnej, która potwierdziłaby tę hipotezę. Natomiast dość niespodziewanie w roku 2011 grupa doświadczalna pracująca z użyciem detektora WASA w przy akceleratorze COSY w Jülich ogłosiła

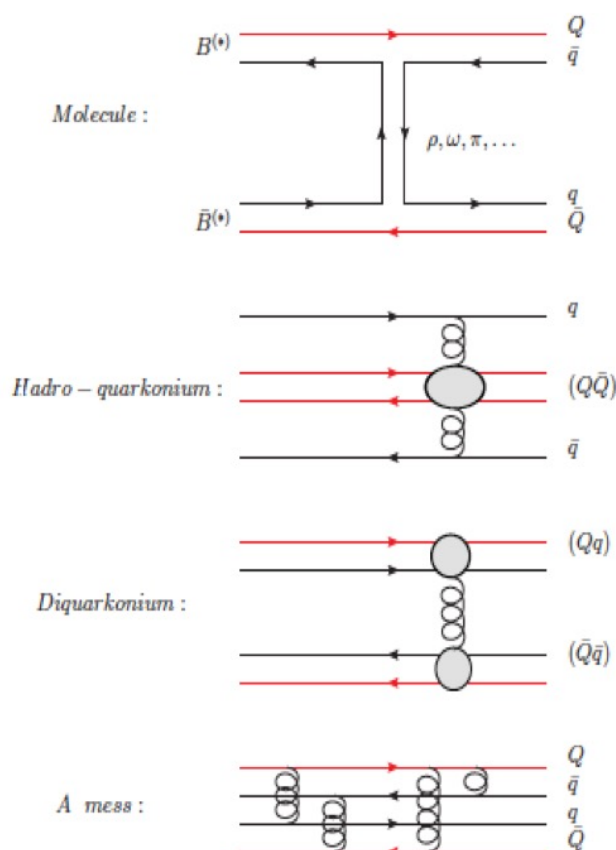


Rysunek 17.1: Reprezentacja $\overline{10}$ grupy SU(3). Zaznaczono hipotetyczne masy lekkich pentakwarków (w MeV).

odkrycie rezonansu dibarionowego $I(J^P) = 0(3^+)$ o masie 2,37 GeV, którego naturalną interpretacją jest stan złożony z dwóch rezonansów Δ .

W roku 2003 japoński eksperyment Belle ogłosił odkrycie cząstki o masie 3871,69 MeV o liczbach kwantowych $I^G(J^{PC}) = 0^+(1^{++})$, którą nazwano $X(3872)$. Cząstka ta była zaobserwowana poprzez rozpad na $\pi^+\pi^-J/\psi$. Początkowo sądzono, że jest to stan wzbudzony J/ψ , który deekscytuje to stanu podstawowego z emisją dwóch cząstek π . Późniejsze badania wykazały, że głównym kanałem rozpadu są rozpady na $D^0\overline{D}^0\pi^0$ i $D^0\overline{D}^{*0}$. Ten schemat rozpadów oraz fakt, że masa $X(3872)$ jest praktycznie równa $m_{D^0} + m_{\overline{D}^{*0}} = 3871,68$ MeV sprawia, że cząstkę tę interpretuje się jako tetrakwark o strukturze molekuly $D^0\overline{D}^{*0}$. Odkrycie $X(3872)$ rozpoczęło okres intensywnego poszukiwania tetrakwarków zawierających układ $c\bar{c}$ lub $b\bar{b}$ (tetrakwaki z ukrytym powabem (ang. *hidden charm*), ukrytą pięknoscią (ang. *hidden beauty*)). Następną zagadkową cząstką był $X(3915)$ odkryty w rozpadzie na $\omega J/\psi$. Jedną z możliwych interpretacji jest silnie związany stan tetrakwarkowy $c\bar{c}s\bar{s}$. Innym stosunkowo szybko odkrytym stanem typu charmonium była cząstka nazwana $Y(4260)$ o liczbach kwantowych $(J^{PC}) = (1^{--})$, czyli takich jak cząstka J/ψ . Inerpretacja tego stanu nie jest jasna, ale są pewne wskazówki, że jest to stan hybrydowy $c\bar{c} - gluon$. Wkrótce odkryto egzotyczne cząstki naładowane (cząstki typu X i Y są neutralne, przy czym przez Y oznacza się stany $(J^{PC}) = (1^{--})$) oznaczane jako Z . Pierwszym potwierdzonym kandydatem na cząstkę naładowaną zawierającą parę $c\bar{c}$ był odkryty w roku 2007 przez eksperyment Belle stan $Z^+(4430)$. Obecnie znanych jest kilkadziesiąt stanów XYZ , których interpretacja jest ciągle kwestią dyskusji. Ogólnie rzecz biorąc rozważa się możliwości pokazane na Rysunku 17.2.

W roku 2015 działający w CERN-ie przy akceleratorze LHC eksperyment LHCb ogłosił odkrycie pentakwarków oznaczonych jako $P_c^+(4450)$ oraz $P_c^+(4380)$ (liczby w nawiasach to masy w MeV). Stany te zinterpretowano jako $uudc\bar{c}$. Późniejsza analiza z roku 2019 na większej liczbie danych wykazała, że pierwotnie uważany z jeden stan $P_c^+(4450)$ ma strukturę dwóch położonych blisko siebie rezonansów $P_c^+(4440)$ i $P_c^+(4457)$. Pierwotnie



Rysunek 17.2: Różne typy wewnętrznej dynamiki ciężkich mezonów XYZ . Źródło: M. Voloshin arXiv:1905.13156 [hep-ph].

postulowany stan $P_c^+(4380)$ w nowej analizie zniknął, natomiast pojawił się nowy, lżejszy stan $P_c^+(4312)$. Mimo tych eksperymentalnych zawirowań wyniki te uważa się za odkrycie ciężkich pentakwarków z ukrytym powabem.

Ponieważ w chromodynamice kwantowej gluony samoodziałują, bardzo wcześnie postulowano istnienie stanów związanych złożonych tylko z gluonów, które z angielska nazywamy kulami gluonowymi (ang. *glueball*). Ich eksperymentalna identyfikacja jest utrudniona z powodu wspomnianego wyżej mieszania z mezonami typu $q\bar{q}$. Symulacje komputerowe chromodynamiki kwantowej, a także modele fenomenologiczne sugerują, że najbliższy glueball $J^{PC} = 0^{++}$ powinien mieć masę około 1500 MeV. Rzeczywiście w tablicach cząstek znajdujemy dwie kandydaty na kulę gluonową, cząstki $f_0(1500)$ oraz $f_0(1710)$.