



## Ciężkie bariony

Michał Praszalowicz

Instytut Fizyki UJ

### 1. Wstęp

W dniu 19 listopada 2014 roku jedna z grup doświadczalnych (tzw. LHCb) działająca w ośrodku badań jądrowych CERN pod Genewą ogłosiła odkrycie dwóch nowych cząstek, które nazwano  $\Xi'_b$  oraz  $\Xi_b^*$ . Istnienie tych cząstek, a także ich własności takie jak spin, czy przybliżone wartości mas, były od dawna przedmiotem spekulacji teoretycznych w ramach modelu kwarków. Jednak precyzyjne wartości mas właśnie, czy czasów życia, oraz tzw. kanałów rozpadu są teoretycznie bardzo trudne do obliczenia. Z tego powodu dokładny pomiar tych wielkości wykonany w CERNie stanowić będzie wyzwanie i zarazem test różnych podejść teoretycznych.

Wyróżniamy kilka typów cząstek subatomowych, dawniej określanych jako elementarne, w zależności od sposobu w jaki oddziałują i jaką mają strukturę. W atomach pierwiastków mamy jądra atomowe zbudowane z protonów i neutronów oraz elektrony, które krążą po orbitach wokół jądra. Elektron jest przykładem cząstki prawdziwie elementarnej zwanej *leptonem*, oprócz elektronu znamy dwa inne leptony naładowane: mion i taon oraz związane z nimi neutrina, które nie posiadają ładunku. Z kolei neutron i proton należą do grupy cząstek zwanej *hadronami*. Hadrony są to cząstki złożone, zbudowane z kwarków. Hadrony z kolei dzielimy na dwie podgrupy: *bariony*, które tak jak proton i neutron składają się z trzech kwarków i *mezony* składające się z kwarku i antykwarku. Dlaczego tylko takie kombinacje kwarków są dozwolone i dlaczego kwarki nie mogą istnieć samodzielnie, jest dziś już dość dobrze zrozumiane w ramach teorii, która nazywa się chromodynamiką kwantową. Odkryte przez grupę doświadczalną LHCb dwie nowe cząstki  $\Xi'_b$  oraz  $\Xi_b^*$  są barionami, a więc składają się z trzech kwarków.

Oprócz leptonów i hadronów znamy jeszcze cząstki związane z oddziaływaniami fundamentalnymi. Są to: foton odpowiedzialny za oddziaływania elektromagnetyczne, bozony pośredniczące W i Z związane z tzw. oddziaływaniami słabymi oraz enigmatyczne *gluony* (od angielskiego słowa *glue* – klej), które „sklejają” w jedną całość kwarki tworzące hadrony.

Wreszcie ostatnim elementem układanki cząstek subatomowych jest odkryty ostatnio także w CERNie tzw. bozon Higgsa.

## 2. Cząstki subatomowe i model kwarków

Chociaż mówimy tu o cząstkach, co sugeruje, że mamy na myśli jakieś obiekty trwałe, to trzeba sobie zdać sprawę z tego, że zarówno cząstki elementarne jak i złożone rozpadają się na lżejsze cząstki i to w ciągu ułamków sekundy. Rozpady te zachodzą ze względu na znaną z Teorii Względności Einsteina równoważność energii i masy zawartą w najbardziej znanym wzorze fizycznym  $E = mc^2$ . Wzór ten mówi, że np. spoczywająca cząstka o dużej masie może zamienić się na lżejsze cząstki, których suma mas jest mniejsza od masy cząstki rozpadającej się. Ponieważ energia musi być zachowana, to te lżejsze cząstki w przeciwieństwie do cząstki wyjściowej będą się poruszać tak, aby ich energia kinetyczna wraz z ich masami sumowały się do masy cząstki wyjściowej. Oczywiście rozpady te zachodzą według pewnych ścisłych reguł. Jedną z nich jest zasada zachowania energii, o której już wspomnieliśmy. Inną bardzo ważną regułą jest zasada zachowania ładunku. Ponieważ elektron jest najlżejszą cząstką naładowaną, zatem nie ma na co się rozpaść tak, aby ładunek był zachowany. Z tego powodu elektron nie rozpada się na przykład na fotony, mimo że rozpad taki byłby zgodny z zasadą zachowania energii (fotony są bezmasowe – mają masę dokładnie równą zero). Inną zasadą zachowania jest zasada zachowania liczby kwarkowej (zwanej fachowo liczbą barionową). Tak więc np. neutron, który jest cięższy od protonu, rozpada się na proton, elektron i antyneutrino. Rozpad taki jest zgodny z zasadą zachowania energii, gdyż masa elektronu jest dwa tysiące razy mniejsza od masy neutronu, a neutrino jest w dobrym przybliżeniu bezmasowe. Rozpad ten jest też zgodny z zasadą zachowania ładunku i z zasadą zachowania liczby kwarków. Szczęśliwie dla nas proton nie może się na nic rozpaść, bo jest najlżejszą cząstką zawierającą kwarki (warto pamiętać, że istniejące mezony są lżejsze od protonu, ale składają się z kwarku i antykwarku, więc mają liczbę kwarkową równą zeru). Dzięki temu, że proton i elektron są absolutnie stabilne, mogą istnieć atomy, a zatem świat, jaki nas otacza, a także życie. Swobodne neutrony, które jak już wspomnieliśmy, nie są stabilne, związane wewnątrz jąder w zdecydowanej większości przypadków mają zablokowane tzw. kanały rozpadu. Jednak w niektórych jądrach może dochodzić do takich rozpadów i wtedy mamy do czynienia z promieniotwórczością naturalną.

Okazuje się, że aby oszacować masy barionów wystarczy po prostu dodać masy trzech kwarków, które wchodzi w skład danego barionu. Trudno tu zagłębiać się w dyskusję, dlaczego taka reguła działa. Choć w życiu codziennym masę obiektów złożonych obliczamy dodając masy ich składników, to w fizyce kwantowej do całkowitej masy wchodzi także energia oddziaływania, energia oddziaływania spinów i jeszcze wiele innych efektów. O ile dla barionu dodanie mas jego składników daje dobre przybliżenie masy, o tyle dla niektórych mezonów z reguły tej dostaje się wyniki kompletnie mijające się z rzeczywistością.

Zobaczmy zatem jakie kwarki udało się dotychczas „zaobserwować” w różnorodnych eksperymentach. Słowo „zaobserwować” ujęliśmy w cudzysłów, gdyż

ze względu na to, że nie można wyizolować pojedynczego kwarku, o ich istnieniu i własnościach wnioskujemy na podstawie badań układów złożonych (barionów i mezonów), których składnikiem jest interesujący nas kwark. Dodatkową trudnością jest pewna osobliwa właściwość oddziaływań kwantowych, powodująca, że masa kwarku zależy od otoczenia, w jakim się znajduje. Aby to zrozumieć można posłużyć się analogią z fizyką klasyczną związaną z prawem Archimedesesa, które mówi, że np. jednokilogramowy odważnik zanurzony w wodzie „traci na wadze” i jest lżejszy niż w zwykłych warunkach.

W tabeli 1 zamieściliśmy wszystkie znane kwarki, podając skrótowe oznaczenia i angielskie nazwy, ładunki i przybliżone masy. Masy cząstek podajemy w jednostkach zwanych elektronowoltami (które oznaczamy jako eV). Są to jednostki dopasowane do świata cząstek subatomowych. Masa protonu i neutronu (neutron jest nieco cięższy od protonu, ale na potrzeby oszacowań, jakie tu będziemy wykonywać, przyjmiemy, że ich masy są równe) wynosi 0,939 GeV (gigaelektronowolta, przedrostek *giga* oznacza miliard), czyli prawie jeden GeV. Masa protonu wyrażona w kilogramach wynosi  $1,67 \times 10^{-27}$  kg. Widać więc, że jest to jednostka bardzo niewygodna. Patrząc na tabelę 1 zauważamy, że kwarki można podzielić na trzy grupy: kwarki lekkie: u, d i s, kwarki ciężkie c i b oraz bardzo ciężkie, czyli kwark t. Podobnie jak w przypadku masy ładunek cząstek subatomowych przyjęło się określać jako wielokrotność ładunku elementarnego, czyli ładunku elektronu  $-e$  (ze znakiem minus). Widzimy, że kwarki mają ładunki ułamkowe. Są one jednak dobrane w taki sposób, że złożone z nich cząstki mają zawsze ładunek, który jest całkowitą wielokrotnością  $-e$ .

Bariony zbudowane z lekkich kwarków znane są od dawna. Przyjmując uproszczony model, mówiący, że masa barionu równa jest sumie mas kwarków, dostajemy, że masa kwarków u i d równa jest około 0,31 GeV. Bierze się to stąd, że jak już zauważyliśmy proton (p) i neutron (n), o następującej strukturze kwarkowej

$$p = (uud), n = (udd)$$

mają w przybliżeniu równe masy wynoszące 0,939 GeV. Jednakże znane są jeszcze inne bariony, które składają się z tych samych kwarków u i d. Są to tzw. rezonanse  $\Delta$  o następującej strukturze:

$$\Delta^- = (ddd), \Delta^0 = (udd), \Delta^+ = (uud), \Delta^{++} = (uuu),$$

gdzie indeks górny oznacza ładunek cząstki  $\Delta$ . Rezonanse  $\Delta$ , choć zbudowane są z tych samych kwarków co neutron i proton (określanych wspólnie mianem nukleonu), mają masę o prawie 0,3 GeV od nich większą:  $m_\Delta = 1,232$  GeV. Aby zrozumieć skąd bierze się ta różnica, musimy odwołać się do bardzo ważnej własności cząstek, mianowicie do spinu.

Spin stanowi charakterystykę cząstki, która ma czysto kwantowy charakter. Klasycznym analogiem spinu jest tzw. moment pędu, zwany też czasem krętem, który charakteryzuje cząstki poruszające się po torach zakrzywionych. Na przy-

kład cząstka o masie  $m$  poruszająca się z prędkością  $v$  po okręgu o promieniu  $r$  posiada moment pędu o wartości  $L = mvr$ . Moment pędu jest wektorem, jego kierunek i zwrot określa tzw. reguła śruby prawoskrętnej. Podobnie jak kręt, spin jest także wektorem, ale może przyjmować tylko pewne dyskretne wartości, mianowicie:  $1/2$ ,  $1$ ,  $3/2$  itd. Często w literaturze popularnej znajdujemy stwierdzenie, że spin jest *wewnętrznym momentem pędu* cząstki. Jest to jednak analogia bardzo ułomna, gdyż spin posiadają także cząstki, które nie mają masy, jak np. foton, co w myśl wyżej przytoczonego wzoru na  $L$  prowadzi do sprzeczności.

Tabela 1. Kwarki wraz z ich angielskimi nazwami, ładunkami i przybliżonymi masami, których wartości dobrano w sposób opisany w tekście

kwark	nazwa	ładunek	masa [GeV]
u	up	+2/3	0,31
d	down	-1/3	0,31
s	strange	-1/3	0,46
c	charm	+2/3	1,65
b	bottom	-1/3	5
t	top	+2/3	173,

Wszystkie kwarki z tabeli 1 mają spin równy  $1/2$ . Mechanika kwantowa mówi, że dwie cząstki o spinie  $1/2$  mogą mieć całkowity spin  $1$  lub  $0$ . Można to sobie wyobrazić w następujący sposób. Wybierzmy jedną dowolną oś, np. oś  $z$  w kartezjańskim układzie współrzędnych i wyobraźmy sobie, że spin jest wektorem, który leży na tej osi, ale może mieć zwrot „do góry” ( $+1/2$ ) lub „w dół” ( $-1/2$ ). Dwa kwarki mogą mieć spiny skierowane „do góry” lub „do dołu”, wówczas sumaryczny rzut spinu na oś  $z$  wynosi odpowiednio  $1$  lub  $-1$ , a długość takiego wektora w obu przypadkach wynosi  $1$ . Dwa spiny mogą też być skierowane przeciwnie i wtedy ich sumaryczny rzut na oś  $z$  wynosi  $0$ . Dokładając trzeci spin musimy rozważyć trzy przypadki. Jeżeli dwa pierwotne kwarki mają sumaryczny spin  $0$  to dołożenie do nich kwarku o spinie  $1/2$  daje całkowity spin równy także  $1/2$ . Natomiast, jeżeli dwa pierwotne kwarki mają spin  $1$ , to dołożenie kolejnego kwarku o spinie  $1/2$  może dać w sumie albo  $3/2$  (wszystkie spiny mają ten sam zwrot wzdłuż osi  $z$ ) lub  $1/2$  (rzuty dwóch spinów skierowane są w jedną stronę, a rzut trzeciego w przeciwną).

Widzimy zatem, że z trzech kwarków możemy zbudować barion o spinie  $1/2$  lub  $3/2$ . Neutron i proton mają spin  $1/2$  natomiast rezonanse  $\Delta$  mają spin  $3/2$ . Różnica w całkowitym spinie powoduje, że rezonanse  $\Delta$  są cięższe od nukleonu. Jest to pierwsze odstępstwo od prostej zasady, że masa barionu równa jest sumie mas kwarków. Dodatkowo własności spinowe i inne własności kwantowe tłumaczą, dlaczego nie można utworzyć cząstki o sumarycznym spinie  $1/2$  z trzech identycznych składników o spinie  $1/2$  każdy. Wiąże się to z tym, że

dwa identyczne kwarki mogą mieć tylko spin 1, natomiast wykluczony jest spin 0. Oznacza to, że z trzech kwarków u lub d możemy utworzyć jedynie cząstki o spinie 3/2 (rezonanse  $\Delta^- = (ddd)$  i  $\Delta^{++} = (uuu)$ ).

Do lekkich barionów zaliczamy także cząstki zawierające jeden kwark s zwany kwarkiem dziwnym (strange). Istnieją cztery bariony o spinie 1/2 zawierające jeden kwark dziwny. Są to cząstki  $\Sigma$ :

$$\Sigma^-(1,197) = (sdd), \quad \Sigma^0(1,192) = (sud), \quad \Sigma^+(1,189) = (suu)$$

oraz cząstka  $\Lambda^0$

$$\Lambda^0(1,116) = (sud),$$

gdzie liczby w nawiasach oznaczają masy w GeV. Widzimy, że z kwarków s, u i d można utworzyć dwie neutralne cząstki  $\Sigma^0$  i  $\Lambda^0$  o różnych masach, choć mają one ten sam skład kwarkowy. Wiąże się to ze wspomnianym wyżej faktem, że barion o spinie 1/2 można utworzyć na dwa różne sposoby składając wyjściowe spiny dwóch kwarków na 0 lub 1. To właśnie jest powodem różnicy mas między cząstkami  $\Sigma^{0,\pm}$ , (które mają wszystkie bardzo zbliżone masy) a cząstką  $\Lambda^0$ . Tego problemu nie ma w przypadku spinu 3/2, gdzie istnieją tylko cząstki analogiczne do cząstek  $\Sigma^{0,\pm}$ , oznaczane gwiazdką jako  $\Sigma^{*0}$  lub  $\Sigma^{*\pm}$  o masie około 1,385 GeV. Wśród cząstek o spinie 3/2 nie ma więc analogu barionu  $\Lambda^0$ .

Idąc dalej tym tropem, jest jasne, że powinny istnieć także cząstki zawierające dwa kwarki s. Rzeczywiście zaobserwowano takie cząstki zarówno o spinie 1/2

$$\Xi^-(1,322) = (ssd), \quad \Xi^0(1,315) = (ssu)$$

jak i 3/2

$$\Xi^{*-}(1,535) = (ssd), \quad \Xi^{*0}(1,532) = (ssu).$$

Czy może istnieć cząstka złożona z trzech kwarków s? Oczywiście tak, ale z powodów, o których wspomnieliśmy powyżej, może mieć ona tylko spin 3/2. Czy możemy pokusić się o „przewidzenie”, jaką mogłaby ona mieć masę? Zauważmy, że różnice mas między cząstkami o spinie 3/2, które różnią się liczbą kwarków dziwnych wynoszą:

$$\Sigma^*(1,38) - \Delta(1,23) = 0,15 \text{ GeV},$$

$$\Xi^*(1,53) - \Sigma^*(1,38) = 0,15 \text{ GeV}.$$

A zatem w grupie cząstek o spinie 3/2 podmienienie kwarku u lub d na kwark s wiąże się ze zwiększeniem masy o około 0,15 GeV. Zatem cząstka (sss) powinna mieć około 1,68 GeV. Cząstkę taką odkryto w roku 1964 w ośrodku BNL (Brookhaven National Laboratory) pod Nowym Jorkiem, po tym jak została ona przewidziana w modelu kwarków przez Murraya Gell-Manna w pracach z roku 1962. Obecnie przyjmuje się, że masa tej cząstki nazwanej  $\Omega^- = (sss)$  wynosi 1,682 GeV. Zauważmy jeszcze, że wśród cząstek o spinie 1/2 podmienienie kwarku u lub d na s zwiększa masę o około 0,2 GeV, a dokładna wartość tej

różnicy zależy od tego, czy mamy do czynienia z cząstkami  $\Sigma$ , czy z cząstką  $\Lambda^0$ . Widzimy tu kolejne odstępstwa od prostej zasady, że masa barionu jest sumą mas jego składników, co wiąże się ze skomplikowaną strukturą spinową lekkich barionów o spinie  $1/2$ . Na potrzeby dalszej analizy, przyjęliśmy w tabeli 1, że kwark dziwny jest o  $0,15$  GeV cięższy od kwarków  $u$  i  $d$ .

Oprócz lekkich kwarków w tabeli 1 znajdują się dwa kwarki ciężkie:  $c$  i  $b$ . Kwarki te są niestabilne i bardzo szybko rozpadają się na jeden z kwarków lekkich, lepton i odpowiednie neutrino. Zatem wykrycie cząstek, w których skład wchodzi ciężkie kwarki, wymaga wyrafinowanych metod doświadczalnych. Dodatkowo, aby takie cząstki powstały, musimy zderzyć ze sobą dwie cząstki stabilne (np. protony jak to ma miejsce w zderzaczach LHC) o bardzo dużej energii. Oczywiście znacznie łatwiej wyprodukować cząstki z kwarkiem  $c$  niż z kwarkiem  $b$ .

### 3. Bariony z jednym ciężkim kwarkiem

Opis teoretyczny barionów zawierających jeden ciężki kwark wydaje się w pewnym sensie prostszy od opisu barionów lekkich. Związane jest to z faktem, że środek masy takiej cząstki pokrywa się z miejscem, gdzie znajduje się ciężki kwark. Zatem w układzie spoczynkowym takiego barionu ciężki kwark spoczywa, a wokół niego poruszają się po zamkniętych orbitach pozostałe dwa lekkie kwarki. Dla lekkich barionów taki obrazek byłby nieprawdziwy, bo wszystkie trzy kwarki są lekkie i poruszają się w skomplikowany sposób po zmiennych orbitach. Dodatkowo okazuje się, że dwa lekkie kwarki można potraktować z dobrym przybliżeniem jako jeden obiekt zwany dikwarkiem. Ponieważ dikwark może mieć spin  $1$  lub  $0$ , mamy trzy możliwe konfiguracje spinowe przedstawione na rysunku 1. Najlżejszy będzie barion o spinie  $1/2$ , w którym dikwark ma spin  $0$ . Cięższe będą bariony, w których dikwark ma spin  $1$ . Całkowity spin barionu może być w takim przypadku  $1/2$  lub  $3/2$ .

#### 3.1. Bariony z kwarkiem $c$

Skoro już poznaliśmy reguły budowania barionów z kwarków, a także szacowania ich mas, spróbujmy zastosować je do barionów z kwarkiem  $c$ . Najlżejszy będzie barion zawierający kwark  $c$  i dwa lekkie kwarki o sumarycznym spinie  $0$ . Można utworzyć tylko jeden taki stan o spinie  $1/2$ , który nazwano  $\Lambda_c^+$ :

$$\Lambda_c^+ = (cud)_{1/2}.$$

Jeżeli założymy, że masa  $\Lambda_c^+$  jest sumą jego składników, to musimy przyjąć, że masa kwarku  $c$  jest równa  $1,65$  GeV (patrz tabela 1), gdyż masa  $\Lambda_c^+$  wynosi  $2,29$  GeV. Jest to masa nieco większa od przyjmowanej powszechnie wartości około  $1,5$  GeV.

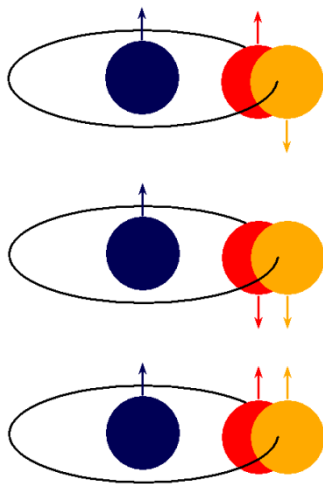
Dwa kwarki mogą mieć także spin 1, ale wtedy oprócz dikwarku ( $ud$ ), który w wersji o spinie 0 występuje w  $\Lambda_c^+$ , mamy jeszcze do dyspozycji dikwarki złożone z identycznych kwarków: ( $uu$ ) i ( $dd$ ). Z tego wynika, że poprzez dodanie kwarku  $c$  możliwe jest utworzenie trzech cząstek zarówno o spinie  $3/2$  jak i  $1/2$ :

$$\begin{aligned}\Sigma_c^{*++} &= (cuu)_{3/2}, \quad \Sigma_c^{*+} = (cud)_{3/2}, \quad \Sigma_c^{*0} = (cdd)_{3/2}, \\ \Sigma_c^{++} &= (cuu)_{1/2}, \quad \Sigma_c^+ = (cud)_{1/2}, \quad \Sigma_c^0 = (cdd)_{1/2}.\end{aligned}$$

Dla lekkich barionów rezonanse  $\Delta$  są cięższe o około  $0,3$  GeV od barionów o spinie  $1/2$ . Spodziewamy się zatem, że masy cząstek  $\Sigma_c^*$  powinny być rzędu  $2,6$  GeV. Rzeczywiście dane doświadczalne są bardzo bliskie tej liczby. W rzeczywistości masa cząstek  $\Sigma_c^*$  wynosi  $2,52$  GeV. Jeżeli chodzi o cząstki  $\Sigma_c$ , gdzie spin lekkiego dikwarku i kwarku  $c$  składają się przeciwnie na spin  $1/2$ , moglibyśmy oczekiwać, że mają one masę równą cząstkom  $\Sigma_c^*$ . Z drugiej strony można argumentować, że ponieważ całkowity spin tych cząstek jest  $1/2$ , powinny mieć one masę zbliżoną do  $\Lambda_c^+$ . Natura wybrała rozwiązanie pośrednie: masa  $\Sigma_c$  leży mniej więcej w połowie „odległości” między  $\Lambda_c^+$  a  $\Sigma_c^*$  i wynosi  $2,45$  GeV, czyli mniej więcej  $0,15$  GeV powyżej  $\Lambda_c^+$  i  $0,15$  GeV poniżej  $\Sigma_c^*$ .

Następna możliwość to tzw. bariony  $\Xi_c$  zawierające kwark  $c$  i jeden kwark  $s$ . Mamy tu tylko dwie możliwości jeżeli chodzi o skład: ( $csd$ ) i ( $csu$ ), ale trzy możliwości jeżeli chodzi o spin (patrz rysunek 1):

$$\begin{aligned}\Xi_c^+ &= (csu)_{1/2}, \quad \Xi_c^0 = (csd)_{1/2}, \\ \Xi_c^{*+} &= (csu)_{3/2}, \quad \Xi_c^{*0} = (csd)_{3/2}, \\ \Xi_c^{*+} &= (csu)_{3/2}, \quad \Xi_c^{*0} = (csd)_{3/2}.\end{aligned}$$



Rys. 1. Poglądowy schemat barionu z jednym ciężkim kwarkiem (w środku), wokół którego krążą dwa lekkie kwarki tworzące jeden dikwark. Strzałki oznaczają spin  $1/2$  (a dokładnie rzut spinu na oś  $z$ ). Dikwark może mieć całkowity spin równy zero (rysunek górny) i wówczas cały barion ma spin  $1/2$  niesiony przez ciężki kwark. Całkowity spin dikwarku może być też równy 1 i wtedy całkowity spin barionu może być równy  $1/2$  (rysunek środkowy) lub  $3/2$  (rysunek dolny)

W cząstkach  $\Xi_c$  dikwark zawierający lekkie kwarki ma spin 0, natomiast w cząstkach  $\Xi'_c$  oraz  $\Xi_c^*$  dikwark ten ma spin 1.

Spróbujmy teraz oszacować masy. Dla cząstki  $\Xi_c$  mamy:

$$\Xi_c : \underbrace{1,65 + 0,46 + 0,31}_{\text{suma mas kwarków}} = 2,42 \text{ GeV [dośw.: 2.47]}.$$

Z kolei dla  $\Xi_c^*$  musimy dodać 0,3 GeV w związku ze spinem 3/2:

$$\Xi_c^* : \underbrace{1,65 + 0,46 + 0,31}_{\text{suma mas kwarków}} + \underbrace{0,30}_{\text{spin 3/2}} = 2,72 \text{ GeV [dośw.: 2.65]},$$

a dla  $\Xi'_c$  tylko 0,15 GeV, przez analogię z cząstkami  $\Sigma_c$

$$\Xi'_c : \underbrace{1,65 + 0,46 + 0,31}_{\text{suma mas kwarków}} + \underbrace{0,15}_{\text{spin 1/2}} = 2,57 \text{ GeV [dośw.: 2.58]}.$$

Widzimy, że ten bardzo naiwny sposób liczenia mas daje zaskakująco dobre wyniki.

Tabela 2. Bariony zawierające jeden kwark b. W kolumnie *model* podano wyniki oszacowań omówionych w tekście. Wyniki doświadczalne oznaczone gwiazdką odpowiadają nowym cząstkom odkrytym ostatnio przez LHCb

barion	spin	model	dośw.
$\Lambda_b$	1/2	5,62	5,62
$\Sigma_b$	1/2	5,77	5,81
$\Sigma_b^*$	3/2	5,92	5,83
$\Xi_b$	1/2	5,77	5,79
$\Xi'_b$	1/2	5,92	5,94*
$\Xi_b^*$	3/2	6,07	5,96*

Możemy także utworzyć cząstkę o składzie (css), którą nazwano  $\Omega_c^0$ . Ma ona masę 2,7 GeV, a jej spin jest nieznan. Ponieważ dwa kwarki s mogą uformować tylko dikwark o spinie 1, mamy więc dwa przewidywania co do masy  $\Omega_c^0$ :

$$\Omega_c^0 : \underbrace{1,65 + 0,46 + 0,46}_{\text{suma mas kwarków}} + \underbrace{0,15}_{\text{spin 1/2}} = 2,72 \text{ GeV},$$

$$\Omega_c^0 : \underbrace{1,65 + 0,46 + 0,46}_{\text{suma mas kwarków}} + \underbrace{0,30}_{\text{spin 3/2}} = 2,87 \text{ GeV}.$$



Zatem najprawdopodobniej spin  $\Omega_c^0$  wynosi 1/2. Znana jest też druga cząstka  $\Omega_c^0$  o masie 2,77 GeV, której spin jest też nieznan. Z naszej analizy wynika, że powinna to być cząstka  $\Omega_c^{*0}$  o spinie 3/2.

### 3.2. Bariony z kwarkiem b

Analizę przedstawioną w poprzednim paragrafie dla barionów z kwarkiem c można praktycznie bez zmian powtórzyć dla barionów z kwarkiem b. Skład i sposób liczenia mas pozostanie bez zmian, za wyjątkiem tego, że masę kwarku c należy zamienić na masę kwarku b, którą na potrzeby naszej analizy przyjmujemy równą 5 GeV. Druga różnica bierze się stąd, że ładunek kwarku b wynosi  $-1/3$  w porównaniu z ładunkiem  $+2/3$  kwarku c. A zatem bariony zawierające kwark b będą miały ładunek o jeden mniejszy niż ładunek analogicznych barionów z kwarkiem c i będą cięższe o 3,35 GeV. Przewidywania teoretyczne wraz z danymi doświadczalnymi w GeV, łącznie z najnowszymi rezultatami grupy LHCb oznaczonymi gwiazdką, są zawarte w tabeli 2.

Widzimy z tabeli 2, że wyniki naszego oszacowania są w miarę „przyzwoite”, aczkolwiek dane wyraźnie wskazują, że konfiguracje, w których dikwark o spinie 1 składa się na dwa różne sposoby ze spinem 1/2 kwarku b, mają w przybliżeniu równe masy. Zatem nasze założenie, że te różnice mas są jednakowe dla wszystkich barionów, jest zapewne błędne. Dyskusja tych subtelnych efektów wykracza poza ramy tego artykułu.

Wreszcie ostatnim elementem naszej układanki są bariony typu  $\Omega^b$  z dwoma kwarkami s. Z naszej analizy wynika, że powinny istnieć dwa takie stany o spinie 1/2 i masie około 6,07 GeV, i o spinie 3/2 i masie około 6,22 GeV. Jak wygląda sytuacja doświadczalna? Otóż jak na razie odkryto tylko jedną cząstkę  $\Omega_b^-$  o masie 6,05 GeV o nieznanym spinie. Porównując te dane z naszym przewidywaniem skłaniałobyśmy się do stwierdzenia, że jest to cząstka o spinie 1/2. Musimy być tu jednak ostrożni, gdyż dla barionów z kwarkami b nasze przewidywania dotyczące różnicy mas między stanami o spinie 3/2 i 1/2 dla cząstek  $\Sigma_b$  i  $\Xi_b$  były zawyżone.

### 4. Zakończenie

Ogłoszone w listopadzie przez LHCb odkrycie cząstek  $\Xi_b^-$  oraz  $\Xi_b^{*}$  dopełnia układankę barionów z jednym ciężkim kwarkiem i co najwyżej jednym kwarkiem s. Do kompletu brakuje nam cząstek typu  $\Omega_Q$  zawierających dwa kwarki s i jeden ciężki kwark Q (c lub b). Model kwarków przewiduje istnienie dwóch takich stanów z kwarkiem c lub b, o spinie 1/2 oraz 3/2. Na razie znaleziono tylko po jednej takiej cząstce, ale nie zmierzono ich spinu. Osobnym zagadnieniem są podwójnie ciężkie bariony: (ccq), (bcq) i (bbq), gdzie q oznacza jeden z lekkich kwarków s, u lub d. Na razie istnieje dość niejasna ewidencja cząstki

typu (ccq). W Japonii w ośrodku badawczym JParc planuje się uruchomienie programu poszukiwania takich cząstek. Przed nami jeszcze odkrycia cząstek potrójnie ciężkich, jak np. (bbb), (ccc) czy mieszanych (ccb) lub (bbc).

Omawiając sposób obliczenia mas barionów przyjęliśmy pewne uproszczenia i – jak to już zaznaczyliśmy – nieprawdziwe założenie co do stałości rozszczepienia między stanami o spinie 1/2 i 3/2. Próba lepszego opisu wykracza poza ramy tego artykułu, jednak zainteresowanym czytelnikom podamy pewną wskazówkę. Otóż zauważmy, że

$$\frac{\Xi_c^* - \Xi_c'}{\Xi_b^* - \Xi_b'} = 3,5 \simeq \frac{m_b}{m_c} = 3,03$$

co sugeruje, że rozszczepienie między stanami, w których lekki dikwark o spinie 1 składa się na całkowity spin 3/2 lub 1/2 jest odwrotnie proporcjonalne do masy ciężkiego kwarku, wokół którego taki dikwark się porusza. Oczywiście powyższy wzór jest przybliżony, ale widać, że jest bliższy prawdy niż nasze poprzednie założenie, że stosunek ten jest rzędu jedynki.

Niestety, choć dysponujemy kwantową teorią oddziaływań silnych – jest to wspomniana na wstępie chromodynamika kwantowa, to obliczenie mas cząstek, a w szczególności barionów, wymaga bardzo zaawansowanych metod komputerowych. Inną metodą podejścia do tego zagadnienia jest próba konstruowania uproszczonych modeli, takich jak schemat omówiony w tym artykule, które z jednej strony uwzględniają pewne aspekty chromodynamiki, jak np. ten, że dwa identyczne kwarki mogą tworzyć jedynie dikwark o spinie 1, a z drugiej operują pewnymi uproszczonymi założeniami, jak np. ten, że masa cząstki jest w pierwszym przybliżeniu równa sumie mas jej składników. Wykonane przez LHCb pomiary oraz planowane eksperymenty stanowią wyzwanie dla tych modeli, ale także dla naszego myślenia o tym, jak zbudowany jest mikroświat.