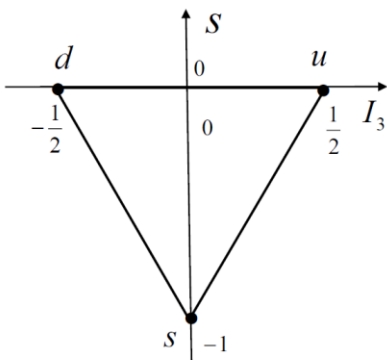


Wykład X

Fizyka cząstek elementarnych

Kwarki

- Współczesna teoria kwarkowej budowy hadronów ma dwojakie pochodzenie – statyczne i dynamiczne. Koncepcja kwarków była, z jednej strony, naturalną konsekwencją odkrycia symetrii SU(3) pozwalającej klasyfikować hadrony ze względu na ich statyczne własności. Z drugiej strony, kwarki, choć nazywane inaczej – asy, partony, pojawiły przy próbach zrozumienia procesów zderzeń z udziałem hadronów, a szczególnie rozpraszania elektronów na protonach, gdzie kwarki wystąpiły jako składniki hadronów. Zaczniemy od symetrii SU(3) i problemu z reprezentacją fundamentalną.
- Jak już było wyjaśnione, liczebność hadronowych multipletów odpowiada wymiarom nieredukowalnych reprezentacji grupy SU(3). Udało się zidentyfikować oktety mezonowy i barionowy, odpowiadające reprezentacji ośmiowymiarowej. Wielkim sukcesem było rozpoznanie dekapletu barionów, odpowiadającego reprezentacji dziesięciowymiarowej, co doprowadziło do przewidzenia, a następnie odkrycia potrójnie dziwnego hiperonu Ω^- . Zagadką pozostawał status fundamentalnej reprezentacji trójwymiarowej.
- W 1964 roku Murray Gell-Mann i Georg Zweig niezależnie od siebie wprowadzili kwarki jako składniki hadronów odpowiadające właśnie fundamentalnej reprezentacji SU(3). Gell-Mann początkowo wyobrażał sobie kwarki jako obiekty bardziej matematyczne niż fizyczne, Zweig natomiast nadawał kwarkom całkiem konkretny materialny sens.
- Nazwę kwarki wprowadził Gell-Mann, odwołując się do zdania *Three quarks for Muster Mark!* z powieści Jamesa Joyce’a *Finnegans Wake*, która jest bardziej językowym eksperymentem niż tradycyjną powieścią, więc sens owego zdania jest mocno niejasny.
- Kwarki są fermionami o spinie $\hbar/2$. Pozostałe liczby kwantowe trypletu kwarków: górnego u (ang. *up*), dolnego d (ang. *down*) i dziwnego s (ang. *strange*), przedstawia diagram, na osiach którego odłożono trzecią składową izospinu I_3 i dziwność s , oraz tabela.

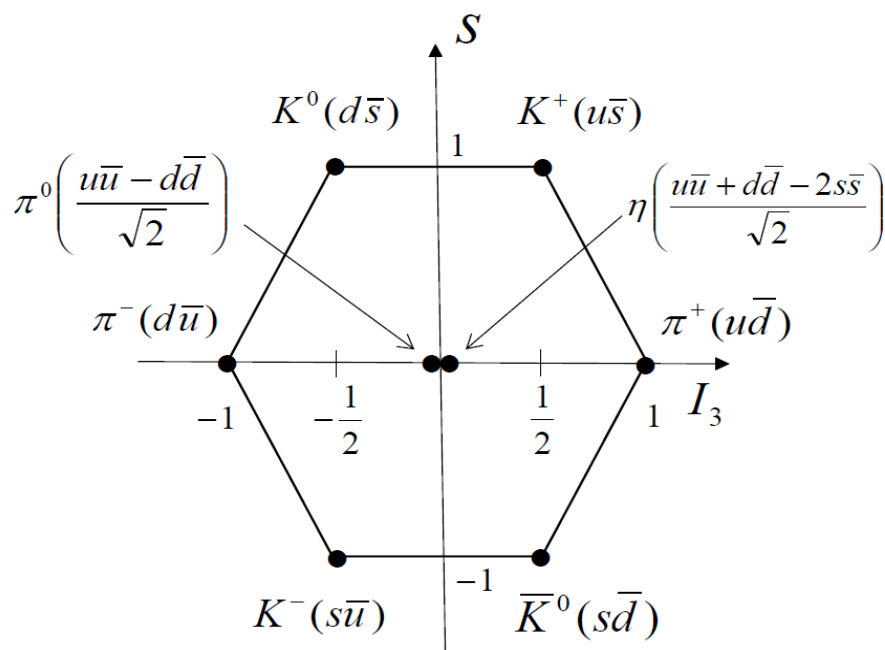


Kwarki				
nazwa	symbol	ładunek elektryczny	liczba barionowa	dziwność
górnny	u	$2/3 e$	$1/3$	0
dolny	d	$-1/3 e$	$1/3$	0
dziwny	s	$-1/3 e$	$1/3$	- 1

Wykład X cd.

Fizyka cząstek elementarnych

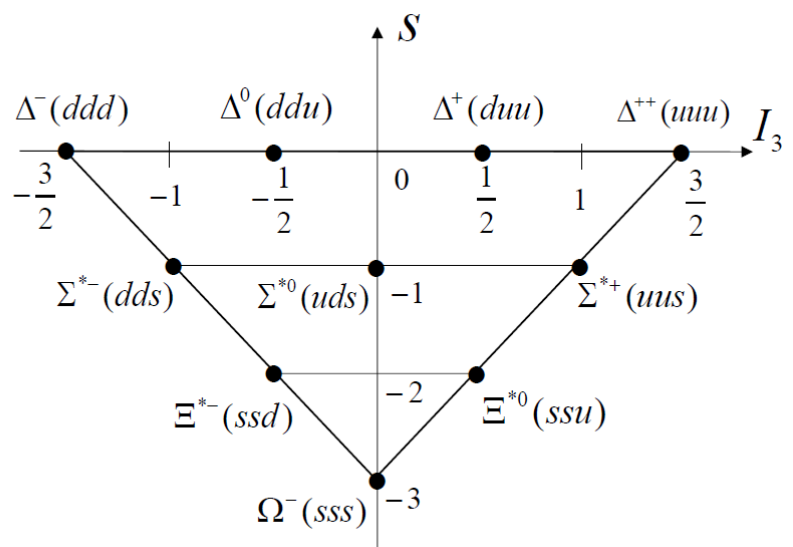
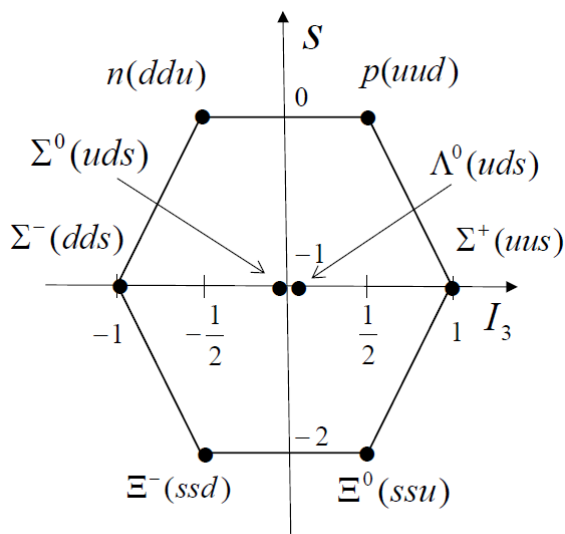
- Kwarków nie obserwowano w przyrodzie, a ich ułamkowy ładunek elektryczny czynił ich byt nader wątpliwym, gdyż kolejne mutacje słynnego eksperymentu Milikena zdawały się pokazywać, że natura dopuszcza istnienie obiektów tylko o ładunku będącym wielokrotnością ładunku elementarnego. Koncepcja kwarków jako składników hadronów sprawdzała się natomiast znakomicie przy założeniu, że kwarki są permanentnie uwięzione w hadronach.
- Mezony to, zgodnie z zamysłem Gell-Manna i Zweiga, układ kwarku i antykwarku. Mezonom więc odpowiada reprezentacja grupy SU(3) będąca iloczynem zewnętrznym reprezentacji fundamentalnej (kwarku) i reprezentacji sprzężonej do fundamentalnej (antykwarku), co zapisujemy jako $\mathbf{3} \otimes \bar{\mathbf{3}}$. Jak już wspomniano, taka iloczynowa reprezentacja jest redukowalna i rozpada się wedle schematu $\mathbf{3} \otimes \bar{\mathbf{3}} = \mathbf{1} \oplus \mathbf{8}$, czyli na singlet i oktet.
- Mezony o określonych liczbach J^P tworzą więc singlet i oktet.
- W przypadku najbliższych mezonów, czyli mezonów pseudoskalarnych 0^- , singletem jest mezon η' o masie 958 MeV i układzie kwarkowym $\frac{u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s}}{\sqrt{2}}$. Skład kwarkowy znanego już nam oktetu mezonów pseudoskalarnych 0^- prezentuje diagram.



Wykład X cd.

Fizyka cząstek elementarnych

- W przypadku najlżejszych mezonów skalarnych (o zerowym spinie) spiny kwarku i antykwarku są przeciwnie skierowane.
- Bariony to stan związany trzech kwarków, a odpowiadająca im reprezentacja grupy SU(3) jest iloczynem zewnętrznym trzech reprezentacji fundamentalnych, co zapisujemy jako $\mathbf{3} \otimes \mathbf{3} \otimes \mathbf{3}$. Jednak taka iloczynowa reprezentacja jest redukowalna i rozpada się wedle schematu $\mathbf{3} \otimes \mathbf{3} \otimes \mathbf{3} = \mathbf{1} \oplus \mathbf{8} \oplus \mathbf{8} \oplus \mathbf{10}$, czyli na singlet, dwa oktety i dekuplet.
- Bariony o określonych liczbach J^P mogą więc tworzyć singlet, oktet i dekuplet, jednak ze względu na obowiązywanie zakazu Pauliego, nie wszystkie multiplety są możliwe przy danej wartości J^P .
- Skład kwarkowy znanych nam oktetu i dekupletu barionów $\frac{1}{2}^+$ oraz $\frac{3}{2}^+$ przedstawiają diagramy.



- W przypadku oktetu najlżejszych barionów $\frac{1}{2}^+$ spin jednego z kwarków tworzących barion jest skierowany przeciwnie do spinu pozostałych.
- W przypadku dekupletu najlżejszych barionów $\frac{3}{2}^+$ spiny wszystkich trzech kwarków są zgodne.

Wykład X cd.

Fizyka cząstek elementarnych

- Wszystkie znane hadrony są mezonami, czyli parami kwark-antykwar, lub barionami, czyli trójkami kwarków. Pojawiały się doniesienia o zaobserwowaniu tetrakwarków ($qqqq$) i pentakwarków ($qqqq\bar{q}$), lecz brak całkiem przekonujących dowodów o istnieniu takich i podobnie egzotycznych hadronów.
- W 1974 roku odkryto czwarty kwark *powabny* c (ang. *charm*), a później w 1977 i 1995 roku odkryto jeszcze kwarki *piękny* lub *denny* b (ang. *bottom* lub *beauty*) i *prawdziwy* lub *szczytowy* t (ang. *true* lub *top*). Pełną listę sześciu kwarków wraz z ich masami i nowymi addytywnymi liczbami kwantowymi przedstawia tabela.

Kwarki								
nazwa	symbol	masa (MeV)	ładunek elektryczny (e)	liczba barionowa	powab	dziwność	prawdziwość	piękność
górnny	u	2	2/3	1/3	0	0	0	0
dolny	d	5	-1/3	1/3	0	0	0	0
powabny	c	1 275	2/3	1/3	-1	0	0	0
dziwny	s	95	-1/3	1/3	0	-1	0	0
prawdziwy	t	174 000	2/3	1/3	0	0	-1	0
piękny	b	4 180	-1/3	1/3	0	0	0	-1

- Ciężkie kwarki c i b wraz z lżejszymi u , d , s tworzy liczne mezony i bariony. Czas życia kwarku t (10^{-24} s) jest na to zbyt mały.
- Kwarki jako uwięzione w hadronach ich składniki, odpowiadające fundamentalnej reprezentacji grupy symetrii, początkowo SU(3) rozszerzonej ostatecznie do mocno naruszonej grupy SU(6), pozwoliły zrozumieć spektroskopię hadronów. Upłynęła jeszcze dekada nim pojawiła się dynamiczna teoria opisująca oddziaływania kwarków – *chromodynamika kwantowa*.