Rozdział 2

Model kwarków

Systematyka cząstek w modelu kolorowych kwarków i gluonów

Konstrukcja multipletów mezonowych i barionowych



A SCHEMATIC MODEL OF BARYONS AND MESONS *

M.GELL-MANN

California Institute of Technology, Pasadena, California

Received 4 January 1964

If we assume that the strong interactions of baryons and mesons are correctly described in terms of the broken "eightfold way" 1-3, we are tempted to look for some fundamental explanation of the situation. A highly promised approach is the purely dynamical "bootstrap" model for all the strongly interacting particles within which one may try to derive isotopic spin and strangeness conservation and broken eightfold symmetry from self-consistency alone 4). Of course, with only strong interactions, the orientation of the asymmetry in the unitary space cannot be specified; one hopes that in some way the selection of specific components of the Fspin by electromagnetism and the weak interactions determines the choice of isotopic spin and hypercharge directions.

Even if we consider the scattering amplitudes of strongly interacting particles on the mass shell only and treat the matrix elements of the weak, electromagnetic, and gravitational interactions by means ber $n_{t} - n_{\bar{t}}$ would be zero for all known baryons and mesons. The most interesting example of such a model is one in which the triplet has spin $\frac{1}{2}$ and z = -1, so that the four particles d⁻, s⁻, u⁰ and b⁰ exhibit a parallel with the leptons.

A simpler and more elegant scheme can be constructed if we allow non-integral values for the charges. We can dispense entirely with the basic baryon b if we assign to the triplet t the following properties: spin $\frac{1}{2}$, $z = -\frac{1}{3}$, and baryon number $\frac{1}{3}$. We then refer to the members u^2_3 , $d^{-\frac{1}{3}}$, and $s^{-\frac{1}{3}}$ of the triplet as "quarks" 6) q and the members of the anti-triplet as anti-quarks \bar{q} . Baryons can now be constructed from quarks by using the combinations (q q q), $(q q q \bar{q})$, etc., while mesons are made out of $(q \bar{q})$, $(q q q \bar{q})$, etc. It is assuming that the lowest baryon configuration (q q q) gives just the representations 1, 8, and 10 that have been observed, while the lowest meson configuration $(q \bar{q})$ similarly gives just 1 and 8. "Praca z propozycją istnienia kwarków została przyjęta do druku w *Physics Letters* tylko dlatego, że autorem był Gell-Mann. Redaktor pomyślał sobie: ta praca jest zwariowana, ale jeśli ją zaakceptujemy i okaże się nonsensem, to blamaż spadnie na Gell-Manna, a nie na Physics Letters. Jeśli jednak ją odrzucimy a okaże się prawdziwa, to będą się z nas wyśmiewać."



Harry Lipkin (1997)

Podstawowe informacje

Oryginalne symbole kwarków: n, p, λ

Potem zmienione (za sugestią Feynmana) na d (down), u (up), s (strange)

kolejne kwarki: c (*charm*) - 1974 b (*bottom, beauty*) - 1977 t (*top, truth*) - 1995

mezony $q_i \overline{q_j}$ kwarki walencyjnebariony $q_i q_j q_k$

antybariony $\overline{q}_i \overline{q}_j \overline{q}_k$

(poza kwarkami walencyjnymi są jeszcze kwarki morza)

(valence quarks, sea quarks)



Kwarki

	В	e _q	S	С	b	t	J	l ₃	
d	1/3	- 1/3	0	0	0	0	1/2	- ¹ / ₂	
u	1/3	+2/3	0	0	0	0	1/2	1/2	
S	1/3	- 1/3	-1	0	0	0	1/2	0	
С	1/3	+2/3	0	1	0	0	1/2	0	
b	1/3	- 1/3	0	0	-1	0	1/2	0	
t	1/3	+2/3	0	0	0	1	1/2	0	

Kwarki i antykwarki są fermionami o spinie 1/2

Antykwarki

	В	eq	S	С	b	t	J	I_3	
d	-1/3	+1/3	0	0	0	0	1/2	1/2	
u	-1/3	- 2/3	0	0	0	0	1/2	-1/2	
S	-1/3	+1/3	1	0	0	0	1/2	0	
C	-1/3	- 2/3	0	-1	0	0	1/2	0	
b	-1/3	+1/3	0	0	1	0	1/2	0	
t	-1/3	- 2/3	0	0	0	-1	1/2	0	

Kwarki i antykwarki są fermionami o spinie 1/2



antykwarki u, d, s



Mezony = kwarkonia (quarkonium)

Notacja spektroskopowa ${}^{2S+1}L_{J=L+S}$ albo J^P

Przykłady ${}^{1}S_{0}$ 0^{-} (mezony pseudoskalarne) L = 0, S = 0, J = 0 L = 0, S = 1, J = 1 ${}^{3}P_{2}$ 2^{+} (mezony tensorowe) L = 1, S = 1, J = 2

Parzystość P = $(-1) (-1)^{L}$ parzystość wewnętrzna pary fermionów









L	S	J	JPC	^{2S+1} L _J	przykład
0	0	0	0-+	¹ S ₀	π
0	1	1	1-+	${}^{3}S_{1}$	ρ
1	0	1	1+-	${}^{1}P_{1}$	
1	1	0	0++	${}^{3}P_{0}$	
1	1	1	1++	${}^{3}P_{1}$	
1	1	2	2++	${}^{3}P_{2}$	a ₂ (1320)
2	0	2	2-+	${}^{1}D_{2}$	π_{2}^{-} (1680)
2	1	1	1	${}^{3}D_{1}^{-}$	_
2	1	2	2	³ D ₂	
2	1	3	3	³ D ₃	ρ ₃ (1690)
3	0	3	3+-	${}^{1}F_{3}$	
3	1	2	2++	³ F ₂	
3	1	3	3++	³ F ₃	
3	1	4	4++	³ F ₄	
4	0	4	4-+	${}^{1}G_{4}$	
4	1	3	3	³ G ₃	

.



Wiadomo, że potencjał kwarkkwark ma wyraz malejący z odległością oraz wyraz rosnący z odległością. Wartości parametrów tych wyrazów muszą być dopasowywane na podstawie obserwacji poziomów (tj. stanów związanych kwarków) Zasady nazewnictwa mezonów i barionów (1984 r.)

Mezony

J ^{PC} =	0-+, 2-+	1+-, 3+	1, 3	0**, 1**
^{2S+1} L _J =	¹ (L _{even}) _J	¹ (L _{odd}) _J	³ (L _{even}) _J	³ (L _{odd}) _J
I = 1(u,d)	π	b	ρ	а
I = 0(u,d)	η	h	ω	f
SS	η'	h'	φ	f'
<u>5</u> 3	ղ _c	h _c	Ψ	χ
bb	η _b	h _b	Υ	χp
tt	η_t	h _t	θ	χ _t

Wyjątek: ψ (3100) = J/ ψ

Zasady nazewnictwa mezonów i barionów (1984 r.)

Mezony









Mezony zawierające kwark c

- D[±] 1869,6 MeV τ = 1,04 ps D⁰ 1864,8 MeV τ = 0,41 ps
- D_{s}^{\pm} 1968,5 MeV τ = 0,50 ps
- mezony D* rozpad silny

Wprowadzenie piątego kwarku oznacza konieczność kreślenia poza osiami I₃, S i C, nowej, czwartej osi B

Nie mogąc rysować brył czterowymiarowych możemy jednak patrzeć na ich rzuty na przestrzeń trójwymiarową



C = -1



Znane są już mezony Υ (1⁻⁻) i χ_{b} (0⁺⁺) (masy około 10 GeV)





Mezony zawierające kwark b mają bardzo duże masy

- B[±] 5279 MeV τ = 1,64 ps
- B⁰ 5280 MeV τ = 1,53 ps
- B_s^0 5366 MeV $\tau = 1,47$ ps
- B_{c}^{\pm} 6276 MeV $\tau = 0,46$ ps

(przypuszczalnie są to stany $J^{P} = 0^{-}$)

Dla każdego L, S, J możliwe są jeszcze "wzbudzenia radialne" (*radial excitations*)

(odpowiednik głównej liczby kwantowej dla potencjału kulombowskiego)

PrzykładM = 9460 MeV $\Upsilon (1S)$ M = 9460 MeV $\Upsilon (2S)$ 10023 $\Upsilon (3S)$ 10355 $\Upsilon (4S)$ 10579 Υ 10860 Υ 11019

Przykład J ^{PC} = 1	ρ	M = 776 MeV
	ρ	1465
	ρ	1720

Zasady nazewnictwa mezonów i barionów (1984 r.)

Bariony

Ν

Λ

Z trzema kwarkami pierwszej generacji

Z dwoma kwarkami pierwszej generacji

$$I = 1$$

Z jednym kwarkiem pierwszej generacji

 $\Xi = 1/2$ <u>Bez</u> kwarków pierwszej generacji $\Omega = 0$

Zawartość kwarków c, b, t dana wskaźnikiem Na przykład: Λ_c , Σ_c , Λ_b , Ξ_c , Ξ_{cb} , Ω_c , Ω_{ccc}





Całkowita funkcja falowa układu fermionów jest antysymetryczna

$$\Psi = \Psi_{\text{kolor}}(\text{singlet}) \times \Psi_{\text{zapach}} \times \left[\Psi_{\text{spin}} \left(S = \frac{1}{2}, \frac{3}{2} \right) \times \Psi_{\text{orbit}} \left(L = 0, 1, \ldots \right) \right]_{\text{total J}}$$

$$A \quad A \quad S \quad S \uparrow \uparrow \uparrow \quad (S = \frac{3}{2}) \quad S \quad (L = 0) \quad J = \frac{3}{2}$$

$$A \quad A \quad A \quad A \quad A \quad A \quad A \quad f \uparrow \downarrow \quad (S = \frac{1}{2}) \quad S \quad (L = 0) \quad J = \frac{1}{2}$$

$$(\text{opcja symetryczna} \\ \text{niemożliwa})$$

$$\Psi_{\text{kolor}} = \frac{1}{\sqrt{3!}} \begin{vmatrix} q_{1R} & q_{2R} & q_{3R} \\ q_{1B} & q_{2B} & q_{3B} \\ q_{1G} & q_{2G} & q_{3G} \end{vmatrix}$$

singlet kolorowy $q_1 q_2 q_3$

Symetryczna funkcja zapachowa dla multipletu barionowego J^P =3/2⁺

 $ddd \quad (ddu + udd + dud) \quad (duu + udu + uud) \quad uuu$

(dds + sdd + dsd) (dsu + uds + sud) (uus + suu + usu)

(dss + sds + ssd) (sus + ssu + uss)

SSS





Bariony zawierające kwark c mają duże masy

 $\begin{array}{lll} \Lambda_{c}^{\ +} & 2286 \ \text{MeV} & \tau = 0,20 \ \text{ps} \\ \Sigma_{c} & 2454 \ \text{MeV} & \\ \Xi_{c}^{\ 0} & 2471 \ \text{MeV} & \tau = 0,11 \ \text{ps} \\ \Xi_{c}^{\ +} & 2468 \ \text{MeV} & \tau = 0,44 \ \text{ps} \\ \Omega_{c}^{\ 0} & 2698 \ \text{MeV} & \tau = 0,07 \ \text{ps} \end{array}$

(przypuszczalnie są to stany $J^{P} = \frac{1}{2}^{+}$)

Liczba zapachów	Liczba stanów barionowych (dla L = 0)			
	$S = \frac{1}{2}$	$S = \frac{3}{2}$		
1	0	1		
2	2	4		
3	8	10		
4	20	20		
5	40	35		
6	70	56		

Bariony z kwarkami b

 $J^{P} = 3/2^{+}$



Jest to łącznie 15 stanów, ktore wraz z rozpatrywanymi wcześniej 20 stanami dla B = 0 daje liczbę 35 barionów $J^{P} = 3/2^{+}$



Jest to łącznie 20 stanów, ktore wraz z rozpatrywanymi wcześniej 20 stanami dla B = 0 daje liczbę 40 barionów $J^{P} = 1/2^{+}$

Dotychczas zaobserwowano 6 barionów z kwarkiem b (założenie $J^{P} = \frac{1}{2}$)

Zidentyfikowane bariony z kwarkiem b

$$\Lambda_b^0$$
 5620 MeV
 $\tau = 1,38 \text{ ps}$
 Σ_b^+
 5608 MeV

 Σ_b^-
 5615 MeV

 Ξ_b^0
 $\Xi_b^ \Omega_b^-$
 6165 MeV

doniesienie o odkryciu przez D0 Collaboration 29 sierpnia 2008 r. !

Rozpady barionów z kwarkiem b





Rozpady barionów z kwarkiem b





Przykład analizy w celu wykrycia hiperonu $\,\Omega_{h}^{-}\,$



FIG. 1: The invariant mass distribution of the ΛK pair before (a) and after (b) the BDT selection. Filled circles are from the right-sign ΛK^- events while the histogram is from the wrongsign ΛK^+ events without any additional normalization.

D0 Collaboration



FIG. 2: (a) The $M(\Omega_b^-)$ distribution of the Ω_b^- candidates after all selection criteria. The dotted curve is an unbinned likelihood fit to the model of a constant background plus a Gaussian signal. The mass distributions for the wrong-sign background (b), the Ω^- sideband events (c), and the Λ sideband events (d).

arXiv:0808.4142v1 [hep-ex] 29 Aug 2008

Bariony – PDG 2006

Baryon Summary Table

PDG 2008

This short table gives the name, the quantum numbers (where known), and the status of baryons in the Review. Only the baryons with 3or 4-star status are included in the main Baryon Summary Table. Due to insufficient data or uncertain interpretation, the other entries in the short table are not established baryons. The names with masses are of baryons that decay strongly. For N, Δ , and Ξ resonances, the πN partial wave is indicated by the symbol $L_{2l,2J}$, where L is the orbital angular momentum (*S*, *P*, *D*, ...), *I* is the isospin, and *J* is the total angular momentum. For Λ and Σ resonances, the $\overline{K}N$ partial wave is labeled $L_{l,2J}$. The nucleon is a pole in the P_{11} wave, and similar comments apply to the Λ and Σ .

0	P.,	****	A(1232)	Paa	****	<u>ν</u> +	P.,	****	=0	P	****	A ⁺	****
n	P11	****	$\Lambda(1202)$	P 33	***	50	P11	****	=-	P.,	****	Λ_{c} (2595)+	***
N(1440)	P11	****	$\Lambda(1620)$	S	****	Σ-	P11	****	=(1530)	P12	****	$\Lambda_{c}(2595)$	***
N(1520)	D12	****	A(1700)	D ₃₁	****	$\Sigma(1385)$	P13	****	=(1620)	. 12	*	$\Lambda_{c}(2025)^{+}$	*
N(1535)	S.,	****	$\Delta(1700)$ $\Delta(1750)$	D33	*	$\Sigma(1480)$	- 15	*	=(1690)		***	$\Lambda_{c}(2703)^{+}$	***
N(1650)	Su	****	A(1000)	S	**	$\Sigma(1560)$		**	=(1820)	Due	***	$\Lambda_{c}(2000)^{+}$	***
N(1675)	Dir	****	$\Delta(1900)$ $\Delta(1905)$	531 E	****	$\Sigma(1580)$	D12	*	=(1950)	213	***	$T_{c}(2940)$	****
N(1680)	Enc	****	$\Delta(1903)$ $\Delta(1010)$	/ 35 P	****	$\Sigma(1620)$	- 15 S11	**	=(2030)		***	$\Sigma_c(2455)$	***
N(1700)	D	***	A(1910)	P 31	***	$\Sigma(1660)$	P11	***	=(2000) =(2120)		*	$\Sigma_c(2520)$	***
N(1710)	P.,	***	A(1920)	F 33	***	$\Sigma(1670)$	Dua	****	=(2250)		**	$Z_c(2800)$	***
N(1720)	P	****	$\Delta(1950)$	D35	*	$\Sigma(1690)$	-13	**	=(2370)		**	- c -0	***
N(1900)	P13	**	A(1050)	D33	****	$\Sigma(1750)$	5	***	=(2500)		*	= c	***
N(1900)	F 13	**	A(2000)	F37	**	$\Sigma(1770)$	P11	*	=(2000)			= c	***
N(2000)	F 17	**	$\Delta(2000)$	F35	*	$\Sigma(1775)$	Dur	****	0-		****	$=_{c}^{n}$	***
N(2000)	D	**	A(2200)	531	*	$\Sigma(1840)$	P15	*	$\Omega(2250)^{-1}$		***	$\Xi_c(2645)$	***
N(2000)	D13	*	$\Delta(2200)$	G37	*	Σ(1880)	P13	**	$Q(2380)^{-}$		**	$\Xi_c(2790)$	***
N(2090)	D 11	*	$\Delta(2300)$	H39	*	$\Sigma(1000)$ $\Sigma(1015)$	E	****	$\Omega(2470)^{-}$		**	$\Xi_c(2815)$	***
N(2100)	C 11	****	$\Delta(2350)$	D35	*	$\Sigma(1940)$	D	***	()			$\Xi_c(2930)$	*
N(2200)	017	**	$\Delta(2390)$	F37	**	Σ(2000)	S.,	*				$\Xi_{c}(2980)$	***
N(2200)	D15	****	$\Delta(2400)$	G39	**	$\Sigma(2000)$ $\Sigma(2030)$	511 E.z	****				$\Xi_{c}(3055)$	**
N(2220)	C .	****	$\Delta(2420)$	H _{3,11}	***	$\Sigma(2030)$ $\Sigma(2070)$	F 17	*				$\Xi_{c}(3080)$	***
N(2200)	019	***	$\Delta(2750)$	13,13	**	$\Sigma(2080)$	P 15	**				$\Xi_{c}(3123)$	*
N(2000)	1,11 K	**	$\Delta(2950)$	K _{3,15}	**	$\Sigma(2000)$	(13) (13)	*				Ω_c^0	***
10(2700)	A1,13			0	****	$\Sigma(2250)$	017	***				$\Omega_{c}(2770)^{0}$	***
			/1	P ₀₁	****	$\Sigma(2455)$		**					
			/(1405)	501	****	Σ(2620)		**				Ξ_{cc}^+	*
			A(1600)	D ₀₃	***	Σ(2020)		*				- 0	
			A(1670)	F 01	****	$\Sigma(3170)$		*				Λ_b^0	***
			A(1600)	501	****	2(01/0)						Σ_b	***
			A(1800)	D ₀₃	***							Σ_{b}^{*}	***
			A(1810)	901 P.	***							$\equiv_{b}^{o}, \equiv_{b}^{-}$	***
			A(1000)	F 01	****								
			A(1920)	P05	****								
			A(1900)	D05	****								
			A(2000)	F03	*								
			A(2000)	E.	*								
			A(2100)	F07	****								
			A(2110)	G07	***								
			A(2225)	05	*								
			A(2250)	D ₀₃	***								
			A(2595)	1109	**								
			7(2000)										

Kwarki są obiektami związanymi, toteż ich masa ma charakter masy efektywnej (podobnie jak np. masa elektronów w ciele stałym) i zależy od modelu obliczeń



Addytywny model kwarków

Tylko kwarki walencyjne, bez gluonów, kwarków morza, potencjału wiązania;

Amplituda oddziaływania hadron-hadron = suma amplitud oddziaływań kwark-kwark



Levin & Frankfurt (1965)



 $\sigma(\pi^{-}) / \sigma(\pi^{+}) = 4$ zgodnie z doświadczeniem

Kłopoty modelu kwarków



itd.

ALE!

Doświadczenie:

Stan rezonansowy Δ⁺⁺ o spinie 3/2 Spiny trzech kwarków u muszą być ustawione tak samo

Hiperon $\Omega^{-} \equiv (s\mathbf{f}s\mathbf{f}s\mathbf{f})$ (oraz inne przykłady)



Kłopoty modelu kwarków

Wniosek: prosty model kwarków niezgodny z zakazem Pauliego Model kwarków nie ma sensu Kwarki są parafermionami Kwarki mają dodatkową liczbę kwantową

ładunek kolorowy

Poszukiwania kwarków swobodnych są bezskuteczne Model kwarków nie ma sensu

Nie umiemy ich szukać

Kwarki nie mogą być swobodne



Produkcja hadronów w oddziaływaniach elektron-pozyton



$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow hadrony)}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = \sum e_{q_i}^2$$
$$R = (\frac{1}{9} + \frac{4}{9} + \frac{1}{9} + \frac{4}{9} + \frac{1}{9} + \frac{4}{9})$$
$$d \quad u \quad s \quad c \quad b \quad t$$

jeśli bez koloru

jeśli 3 kolory

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow hadrony)}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = 3\sum_{q_i} e_{q_i}^2$$
$$R = 3(\frac{1}{9} + \frac{4}{9} + \frac{1}{9} + \frac{4}{9} + \frac{1}{9} + \frac{4}{9})$$
$$d \quad u \quad s \quad c \quad b \quad t$$



 $E_{\rm cms},\,{\rm GeV}$







Wartości R w obszarze Z⁰



 \sqrt{s} (GeV)

ładunek kolorowy ma trzy wartości α , β , γ $\alpha + \beta + \gamma = 0$ $\alpha + \overline{\alpha} = 0$ $\beta + \overline{\beta} = 0$ $\gamma + \overline{\gamma} = 0$

Nasuwa się analogia z optyką, gdzie niebieski + zielony + czerwony = biel niebieski + kolor dopełniający = biel itd. Dlatego zamiast ładunków α β γ mówimy o trzech kolorach zasadniczych B G R



Rozpad leptonu τ i liczba kolorów









etc.

Leptony (umowa)

	e _q	m (MeV)	τ	L _e	L_{μ}	L_{τ}
e-	-1	0,51	>4,6 ×10 ²⁶ lat	1	0	0
ν _e μ ⁻ ν	-1 0	105,65	2,197 μs	0	1 1	0
$ au^{\mu}$ $ au^{-}$ $ au_{ au}$	-1 0	1777,0	290,6 fs	0 0	0 0	1 1

Leptony są fermionami o spinie 1/2

Antyleptony (umowa)

	\mathbf{e}_{q}	m (MeV)	τ	L _e	L_{μ}	$L_{ au}$
e+	+1	0,51	>4,6 ×10 ²⁶ lat	-1	0	0
\overline{v}_{e}	0	(< 2 eV)		-1	0	0
μ^+	+1	105,65	2,197 μs	0	–1	0
$\overline{\nu}_{\mu}$	0			0	_1	0
τ+	+1	1777,0	290,6 fs	0	0 -	-1
$\overline{\nu_{\tau}}$	0			0	0 -	-1

Antyleptony są fermionami o spinie 1/2

Rozpady leptonowe mezonów wektorowych



q

ρ

ω

ø

Υ

J/ψ

(Model Van Royena-Weisskopfa)

$$\Gamma(q\overline{q} \rightarrow l^+ l^-) \cong |\psi(0)|^2 e_{qi}^2$$

e_{ai}² $\Gamma_{\rho} \sim \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{2}{3} - \left(-\frac{1}{3} \right) \right) \right|^2 = \frac{1}{2}$ 9 $\Gamma_{\omega} \sim \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{2}{3} + \left(-\frac{1}{3} \right) \right) \right|^2 = \frac{1}{18}$ $\Gamma_{\varphi} = \Gamma_{\Upsilon} \sim \left(-\frac{1}{3}\right)^2 = \frac{1}{0}$ 2 $\Gamma_{\mathrm{J/\psi}} \sim \left(\frac{2}{3}\right)^2 = \frac{4}{9}$

 $\Gamma(q\overline{q} \rightarrow l^+ l^-) \cong |\psi(0)|^2 e_{qi}^2$

	M (MeV)	Γ_{ee} (keV)
Υ (1S)	9460	1,340 ± 0,018
Ύ (2S)	10023	0,612 ± 0,011
Υ (3S)	10355	0,443 ± 0,008
Υ (4S)	10579	0,272 ± 0,029
Ύ (10860)		0,31 ± 0,07
Υ (11019)		0,130 ± 0,030

Wpływ różnic w $\psi(0)$