

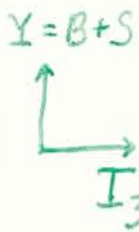
Мезоны из кварков

$$3 \otimes \bar{3} = 8 \oplus 1$$

Псевдоскалярные мезоны

$$0^-$$

$$l=0 \quad s=0 \quad {}^1S_0 \quad (q\uparrow\bar{q}\downarrow - \bar{q}\uparrow q\downarrow)/\sqrt{2}$$



$$K^0(d\bar{s}) \quad K^+(u\bar{s})$$

$$\pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(d\bar{d} - u\bar{u})$$

$$\pi^-(d\bar{u}) \quad \pi^0 \quad \pi^+(u\bar{d})$$

$$\eta' \quad \eta_8 = \frac{1}{\sqrt{6}}(u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s})$$

$$K^-(s\bar{u}) \quad \eta^0 \quad \bar{K}^0(s\bar{d})$$

$$\eta_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}(u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s})$$

$$\eta = \eta_8 \cos\theta + \eta_1 \sin\theta$$

$$\eta' = -\eta_8 \sin\theta + \eta_1 \cos\theta$$

$$\theta = 10-25^\circ$$

	M, MeV	Γ , MeV	Распад
η	547	$1 \cdot 10^{-3}$	$3\pi, 2\chi$
η'	958	0.2	$\eta\pi\pi$

Векторные мезоны

$$1^-$$

$$l=0 \quad s=1 \quad {}^3S_1 \quad q\uparrow\bar{q}\uparrow$$

$$K^{0*} \quad K^{+*}$$

$$\rho^- \quad \rho^0 \quad \rho^+$$

$$\phi$$

$$\phi \approx s\bar{s}$$

$$K^{-*} \quad \bar{K}^{0*}$$

$$\theta = 36-39^\circ \quad (\theta_{\text{иг}} = 35.3^\circ)$$

	M, MeV	Γ , MeV	Распад
ρ	770	151	2π
ω	782	8.4	$\pi^+\pi^-\pi^0$
ϕ	1019	4.4	$K^+K^-, K_2^0K_3^0, 3\pi$
K^*	892-896	51	$K\pi$

$l=1$

скалярные мезоны

$$0^+, s=1, {}^3P_0$$

псевдовекторные

$$1^+, s=0, {}^1P_1$$

$$1^+, s=1, {}^3P_1$$

Тензорные

$$2^+, s=1, {}^3P_2$$

C-зетность

$$C\psi = \pm\psi$$

возможно:
невозможно(?)

$$C(q\bar{q}) = (-)^{L+S} (q\bar{q})$$

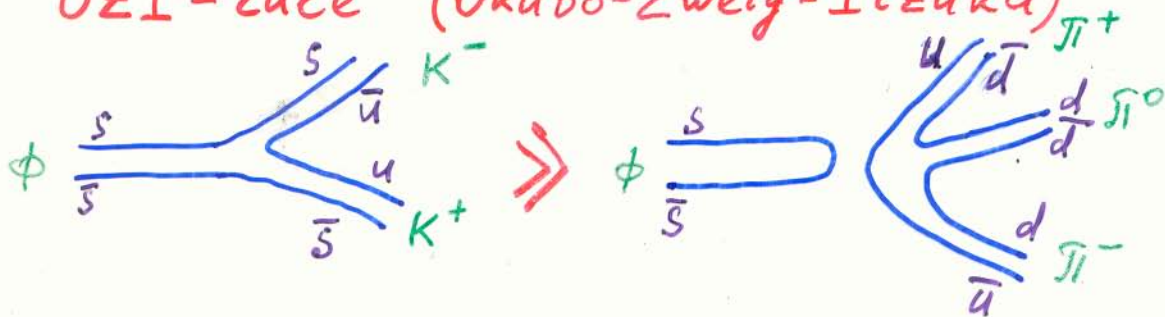
$$J^{\pi C} = 0^{-+}, 1^{-+}, 0^{++}, 1^{++}, 1^{+-}, 2^{++} \dots$$

$$0^{-+}, 0^{+-}, 1^{-+}, 2^{+-}, 3^{-+} \dots$$

G-зетность

$$G = (-)^{L+S+I} = C(-)^I$$

OZI-зале (Окиво-Zweig-Iizuka)



	C	G
π	+	-
η, η'	+	+
ρ	-	+
ω, ϕ	-	-

Барионы из кварков

$$3 \otimes 3 \otimes 3 = 10 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 1$$

Октет $\frac{1}{2}^+$

$$n(udd) \quad p(uud)$$

$$\Sigma^-(dds) \quad \Sigma^0(uds) \quad \Sigma^+(uus)$$

$$\Lambda(uds)$$

$$\Xi^-(dss) \quad \Xi^0(uss)$$

$$\Sigma^+ = u \uparrow u \uparrow s \downarrow$$

$$\Sigma^0 = d \uparrow d \uparrow s \downarrow$$

$$\Sigma^0 = u \uparrow d \uparrow s \downarrow$$

$$\Lambda = \underbrace{(u \uparrow d \downarrow - u \downarrow d \uparrow)}_{S=0} s \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Декуплет $\frac{3}{2}^+$

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

$$\Sigma^{*-}(dds) \quad \Sigma^{*0}(uds) \quad \Sigma^{*+}(uus)$$

$$\Xi^{*-}(dss) \quad \Xi^{*0}(uss)$$

$$\Omega^-(sss)$$

$$q \uparrow q \uparrow q \uparrow$$

	$M, M \approx B$	$\Gamma, M \approx B$	Распад
Δ	1232	120	$N\pi$
Σ^*	1383-1387	36-39	$\Lambda\pi$
Ξ^*	1532-1535	9-10	$\Xi\pi$
Ω^-	1672	$\tau = 0.8 \cdot 10^{-10} \text{c}$	$\Lambda K^-, \Xi\pi$

Адронные мультиплеты

Мезоны

$n^{2s+1}\ell_J$	J^{PC}	$l=1$ $ud, \bar{u}d, \frac{1}{\sqrt{2}}(d\bar{d} - u\bar{u})$	$l=\frac{1}{2}$ $u\bar{s}, d\bar{s}; \bar{d}s, -\bar{u}s$	$l=0$ f'	$l=0$ f	θ_{quad} [°]	θ_{lin} [°]
1^1S_0	0^{-+}	π	K	η	$\eta'(958)$	-11.5	-24.6
1^3S_1	1^{--}	$\rho(770)$	$K^*(892)$	$\phi(1020)$	$\omega(782)$	38.7	36.0
1^1P_1	1^{+-}	$b_1(1235)$	K_{1B}^\dagger	$h_1(1380)$	$h_1(1170)$		
1^3P_0	0^{++}	$a_0(1450)$	$K_0^*(1430)$	$f_0(1710)$	$f_0(1370)$		
1^3P_1	1^{++}	$a_1(1260)$	K_{1A}^\dagger	$f_1(1420)$	$f_1(1285)$		
1^3P_2	2^{++}	$a_2(1320)$	$K_2^*(1430)$	$f_2'(1525)$	$f_2(1270)$	29.6	28.0
1^1D_2	2^{-+}	$\pi_2(1670)$	$K_2(1770)^\dagger$	$\eta_2(1870)$	$\eta_2(1645)$		
1^3D_1	1^{--}	$\rho(1700)$	$K^*(1680)^\dagger$		$\omega(1650)$		
1^3D_2	2^{--}		$K_2(1820)^\dagger$				
1^3D_3	3^{--}	$\rho_3(1690)$	$K_3^*(1780)$	$\phi_3(1850)$	$\omega_3(1670)$	32.0	31.0
1^3F_4	4^{++}	$a_4(2040)$	$K_4^*(2045)$		$f_4(2050)$		
1^3G_5	5^{--}	$\rho_5(2350)$					
1^3H_6	6^{++}	$a_6(2450)$			$f_6(2510)$		
2^1S_0	0^{-+}	$\pi(1300)$	$K(1460)$	$\eta(1475)$	$\eta(1295)$	-22.4	-22.6
2^3S_1	1^{--}	$\rho(1450)$	$K^*(1410)^\dagger$	$\phi(1680)$	$\omega(1420)$		

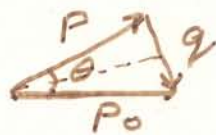
J^P	$(D, L_N^P) S$	Octet members			Singlets
$1/2^+$	$(56, 0_0^+)$	$1/2 N(939)$	$\Lambda(1116)$	$\Sigma(1193)$	$\Xi(1318)$
$1/2^+$	$(56, 0_2^+)$	$1/2 N(1440)$	$\Lambda(1600)$	$\Sigma(1660)$	$\Xi(?)$
$1/2^-$	$(70, 1_1^-)$	$1/2 N(1535)$	$\Lambda(1670)$	$\Sigma(1620)$	$\Xi(?)$
$3/2^-$	$(70, 1_1^-)$	$1/2 N(1520)$	$\Lambda(1690)$	$\Sigma(1670)$	$\Xi(1820)$
$1/2^-$	$(70, 1_1^-)$	$3/2 N(1650)$	$\Lambda(1800)$	$\Sigma(1750)$	$\Xi(?)$
$3/2^-$	$(70, 1_1^-)$	$3/2 N(1700)$	$\Lambda(?)$	$\Sigma(?)$	$\Xi(?)$
$5/2^-$	$(70, 1_1^-)$	$3/2 N(1675)$	$\Lambda(1830)$	$\Sigma(1775)$	$\Xi(?)$
$1/2^+$	$(70, 0_2^+)$	$1/2 N(1710)$	$\Lambda(1810)$	$\Sigma(1880)$	$\Xi(?)$
$3/2^+$	$(56, 2_2^+)$	$1/2 N(1720)$	$\Lambda(1890)$	$\Sigma(?)$	$\Xi(?)$
$5/2^+$	$(56, 2_2^+)$	$1/2 N(1680)$	$\Lambda(1820)$	$\Sigma(1915)$	$\Xi(2030)$
$7/2^-$	$(70, 3_3^-)$	$1/2 N(2190)$	$\Lambda(?)$	$\Sigma(?)$	$\Xi(?)$
$9/2^-$	$(70, 3_3^-)$	$3/2 N(2250)$	$\Lambda(?)$	$\Sigma(?)$	$\Xi(?)$
$9/2^+$	$(56, 4_4^+)$	$1/2 N(2220)$	$\Lambda(2350)$	$\Sigma(?)$	$\Xi(?)$
Decuplet members					
$3/2^+$	$(56, 0_0^+)$	$3/2 \Delta(1232)$	$\Sigma(1385)$	$\Xi(1530)$	$\Omega(1672)$
$1/2^-$	$(70, 1_1^-)$	$1/2 \Delta(1620)$	$\Sigma(?)$	$\Xi(?)$	$\Omega(?)$
$3/2^-$	$(70, 1_1^-)$	$1/2 \Delta(1700)$	$\Sigma(?)$	$\Xi(?)$	$\Omega(?)$
$5/2^+$	$(56, 2_2^+)$	$3/2 \Delta(1905)$	$\Sigma(?)$	$\Xi(?)$	$\Omega(?)$
$7/2^+$	$(56, 2_2^+)$	$3/2 \Delta(1950)$	$\Sigma(2030)$	$\Xi(?)$	$\Omega(?)$
$11/2^+$	$(56, 4_4^+)$	$3/2 \Delta(2420)$	$\Sigma(?)$	$\Xi(?)$	$\Omega(?)$

Барионы

Упругое рассеяние электронов

Электрон без спина на кулоновском потенциале
(формула Резерфорда)

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_R = \frac{Z_1^2 Z_2^2 e^4 m^2}{4p_0^4 \sin^4 \frac{\theta}{2}} = \frac{4Z_1^2 Z_2^2 e^4 m^2}{q^4}$$



Переданный импульс $\vec{q} = \vec{p}_0 - \vec{p}$; $|\vec{q}| = 2p_0 \sin \frac{\theta}{2}$

Переданный 4-импульс $t = (p - p_0)^2 \approx -q^2$; $t = -Q^2$

Электрон без спина на точечном ядре без спина

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_0 = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_R \frac{1}{1 + \frac{2p_0}{M} \sin^2 \frac{\theta}{2}}$$

отсюда!

Электрон без спина на неточечном ядре без спина

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_0 |F(\vec{q})|^2$$

структура!

$$F(\vec{q}) = \int d^3z e^{i\vec{q}\cdot\vec{z}} \rho(\vec{z})$$

Если $\rho(\vec{z}) = \rho(z)$, $F(q) = \frac{4\pi}{q} \int_0^\infty z dz \sin qz \rho(z)$

$$F(q) = 1 - \frac{1}{6} q^2 \langle z^2 \rangle + \dots$$

Электрон со спином на точечном ядре без спина

(формула Мотта)

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_0 \cos^2 \frac{\theta}{2}$$

Электрон со спином на уираковском нуклоне

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_0 \left(\cos^2 \frac{\theta}{2} + \frac{q^2}{2M^2} \sin^2 \frac{\theta}{2} \right)$$

Физический электрон на физическом нуклоне
формула Розенблютта

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_0 \cos^2 \frac{\theta}{2} \left[F_1^2(t) - \frac{t}{4M^2} \kappa^2 F_2^2(t) - \right. \\ \left. - \frac{t}{2M^2} t g^2 \frac{\theta}{2} (F_1(t) + \kappa F_2(t))^2 \right]$$

$$F_1(0) = F_2(0) = 1 \quad (\text{протон})$$

$$F_1(0) = 0 \quad F_2(0) = 1 \quad (\text{нейтрон})$$

Формфакторы Сакса

$$G_E(t) = F_1(t) + \tau \kappa F_2(t)$$

$$G_M(t) = F_1(t) + \kappa F_2(t)$$

$$\tau = \frac{t}{4M^2}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_0 \cos^2 \frac{\theta}{2} \left[\frac{1}{1-\tau} G_E^2(t) - \tau \left(\frac{1}{1-\tau} + 2t g^2 \frac{\theta}{2} \right) G_M^2(t) \right]$$

$$G_E(0) = 1 \quad G_M(0) = 1 + \kappa = \mu \quad (\text{протон})$$

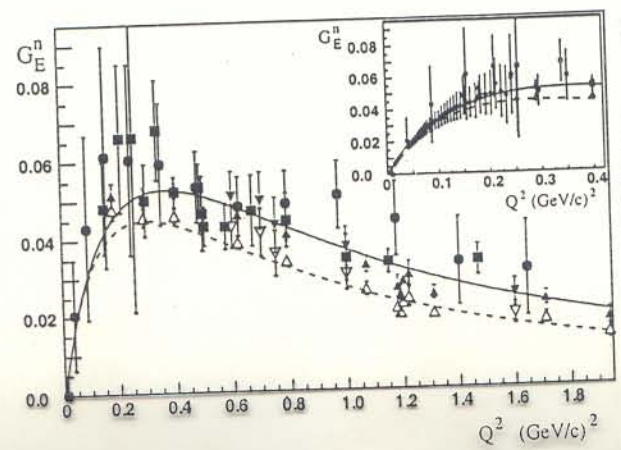
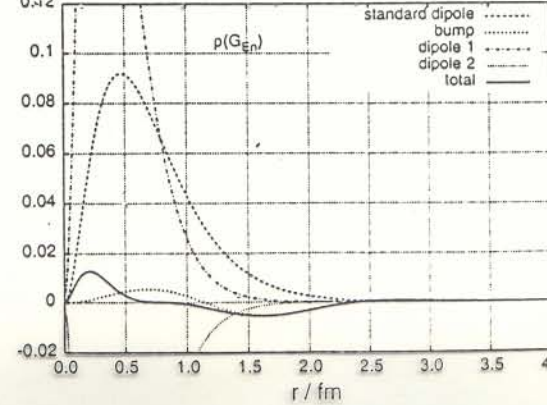
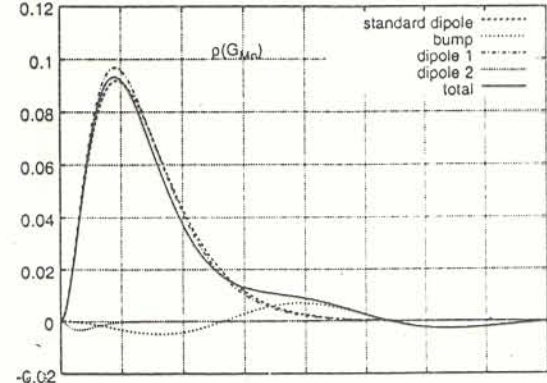
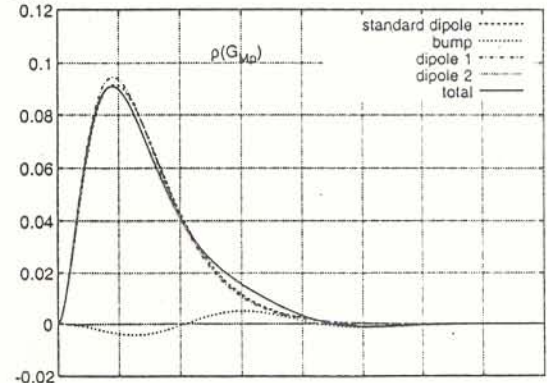
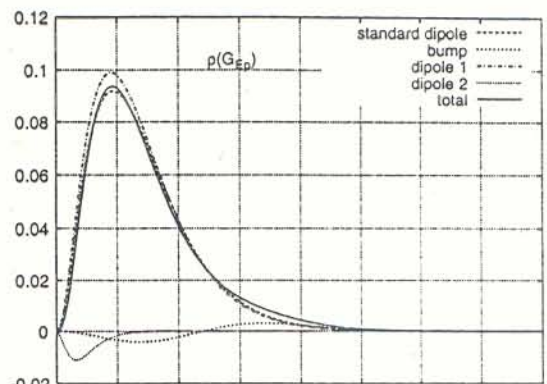
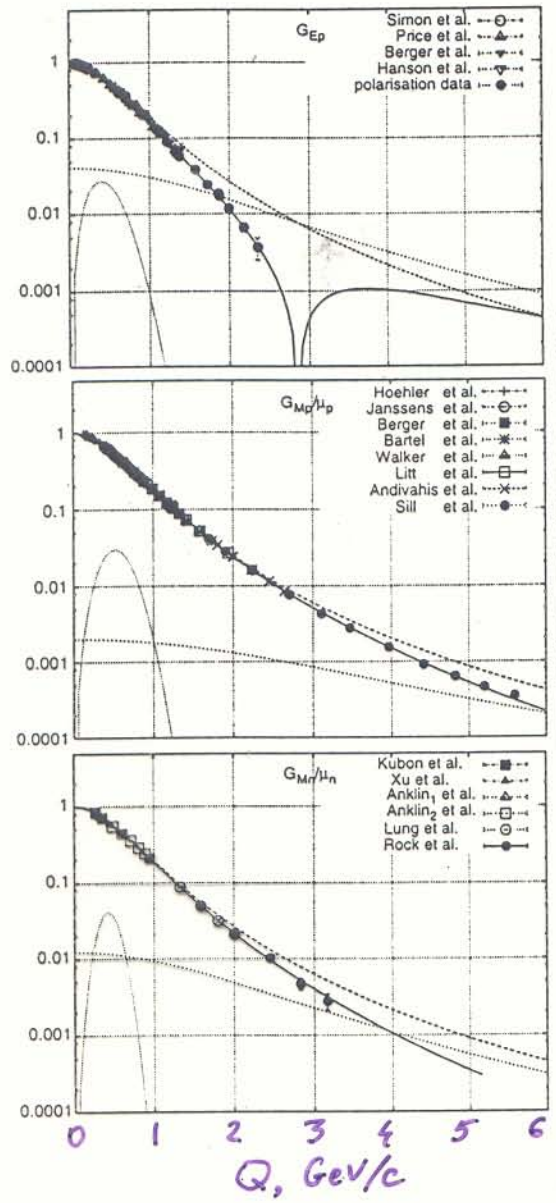
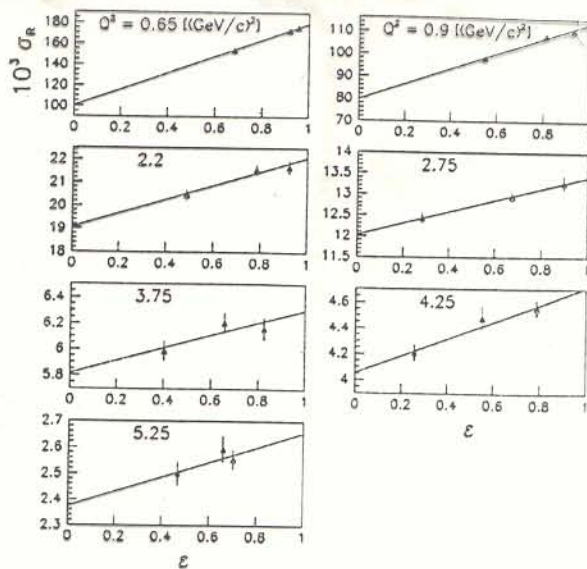
$$G_E(0) = 0 \quad G_M(0) = \kappa = \mu \quad (\text{нейтрон})$$

Система Брейта

$$\vec{P}_p = -\vec{P}_{op}$$

$$G_E(q) = \int d^3z e^{i\vec{q}\vec{z}} \rho(z)$$

$$G_M(q) = \int d^3z e^{i\vec{q}\vec{z}} m(z)$$



Структурные функции и глубоконеупругое рассеяние

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_0 \cos^2 \frac{\theta}{2} \left[2W_1(\nu, Q^2) \tan^2 \frac{\theta}{2} + W_2(\nu, Q^2) \right]$$

$$\nu = E_0 - E \quad x = \frac{Q^2}{2M\nu}$$

$$M_{inv}^2 = M^2 + 2M\nu - Q^2 = M^2 + Q^2 \frac{1-x}{x}$$

Упругое рассеяние $x=1$

Скейлинг $F_1(\nu, Q^2) \equiv MW_1 = F_1(x); F_2(\nu, Q^2) \equiv \nu W_2 = F_2(x)$
 $\nu, Q \rightarrow \infty$

Структурные функции для упругого рассеяния

$$W_1(\nu, Q^2) = \tau G_M^2(Q^2) \delta\left(\frac{Q^2}{2M} - \nu\right)$$

$$W_2(\nu, Q^2) = \left(\frac{1}{1-\tau} G_E^2(Q^2) - \frac{\tau}{1-\tau} G_M^2(Q^2)\right) \delta\left(\frac{Q^2}{2M} - \nu\right)$$

Точечная мишень

$$W_1(\nu, Q^2) = \frac{\nu}{2M} \delta\left(\frac{Q^2}{2M} - \nu\right) = \frac{1}{2M} \delta(x-1)$$

$$W_2(\nu, Q^2) = \delta\left(\frac{Q^2}{2M} - \nu\right) = \frac{1}{\nu} \delta(x-1)$$

$$W_1(\nu, Q^2) = \frac{\nu}{2M} W_2(\nu, Q^2)$$

Партонная модель

$$M \rightarrow Mx$$

$$2Mx W_1(x) = \nu W_2(x)$$

$$W_2^p(x) \sim \frac{4}{9} (u(x) + \bar{u}(x)) + \frac{1}{9} (d(x) + \bar{d}(x)) + \frac{1}{9} (s(x) + \bar{s}(x))$$

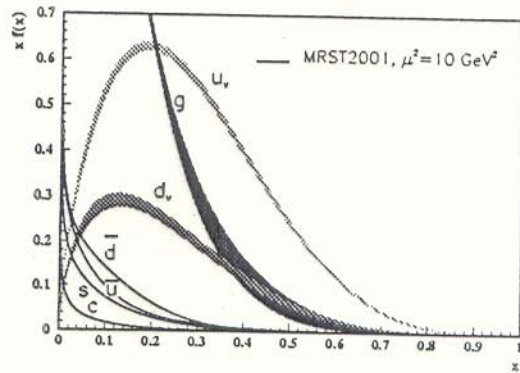
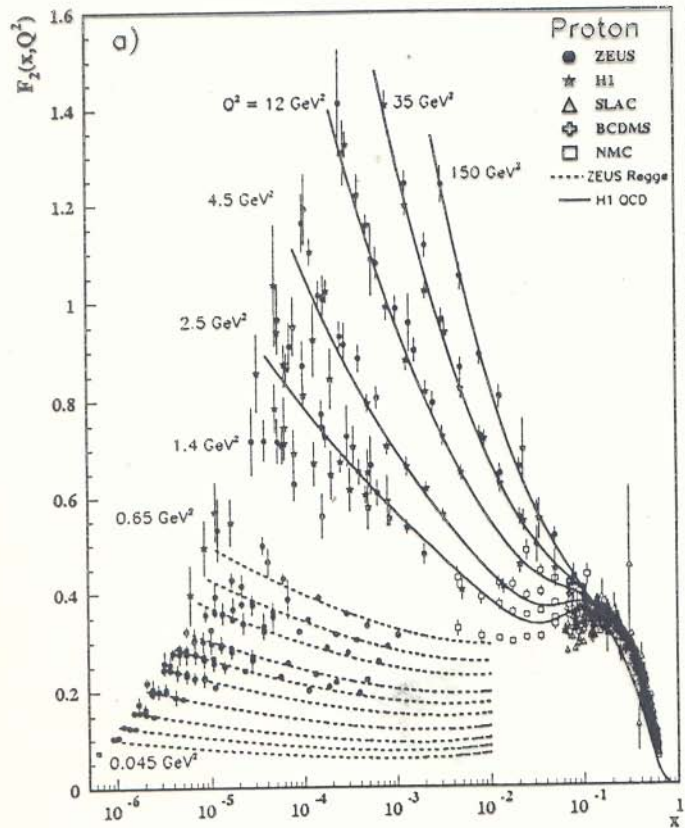
$$W_2^n(x) \sim \frac{1}{9} (u(x) + \bar{u}(x)) + \frac{4}{9} (d(x) + \bar{d}(x)) + \frac{1}{9} (s(x) + \bar{s}(x))$$

$$\frac{1}{4} \leq \frac{W_2^n}{W_2^p} \leq 4$$

$$\int_0^1 (u(x) - \bar{u}(x)) dx = 2$$

протон $\int_0^1 (d(x) - \bar{d}(x)) dx = 1$

$$\int_0^1 (s(x) - \bar{s}(x)) dx = 0$$



$$m_{\pi^0}^2 = B(m_u + m_d)$$

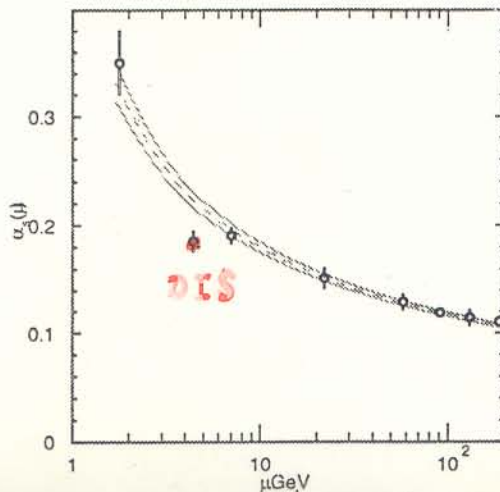
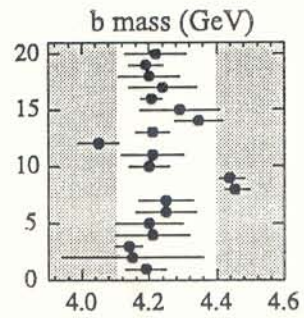
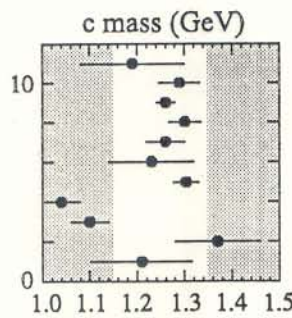
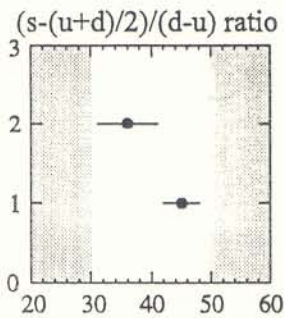
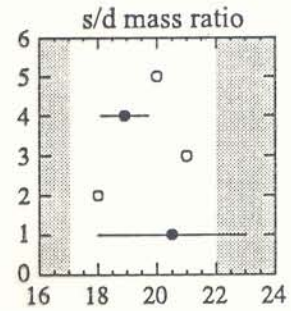
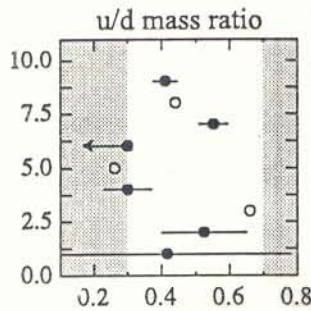
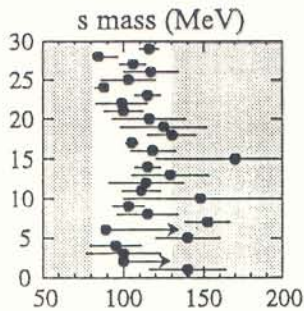
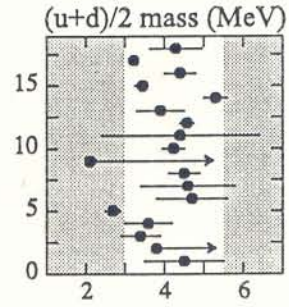
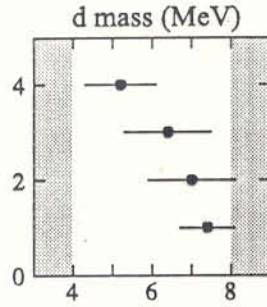
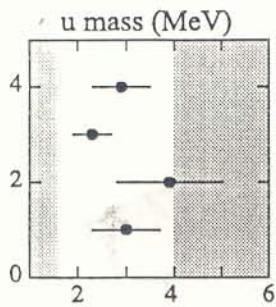
$$m_{\pi^\pm}^2 = B(m_u + m_d) + \Delta_{em}$$

$$m_{K^0}^2 = B(m_d + m_s)$$

$$m_{K^\pm}^2 = B(m_u + m_s) + \Delta_{em}$$

$$\frac{m_u}{m_d} = \frac{2m_{\pi^0}^2 - m_{\pi^\pm}^2 + m_{K^\pm}^2 - m_{K^0}^2}{m_{K^0}^2 - m_{K^\pm}^2 + m_{\pi^\pm}^2} = 0.56$$

$$\frac{m_s}{m_d} = \frac{m_{K^0}^2 + m_{K^\pm}^2 - m_{\pi^\pm}^2}{m_{K^0}^2 + m_{\pi^\pm}^2 - m_{K^\pm}^2} = 20.1$$



Модель мешка MIT

Нерелятивистский предел

$$-\frac{\hbar^2}{2m} u''(z) + V(z)u(z) = Eu(z) \quad V(z) = 0, z < R$$

$$\infty, z > R$$

$$u(z) \sim \sin \chi z \quad z < R$$

$$= 0 \quad z > R \quad \chi R = \pi \quad \chi = \frac{x}{R}; x = \pi$$

Ультрарелятивистский предел $x \approx 2.04$

$$E = (m^2 + \frac{x^2}{R^2})^{1/2}$$

Энергия (масса) бариона

$$E(R) = \sum_i N_i (m_i^2 + \frac{x_i^2}{R^2})^{1/2} + B \frac{4\pi R^3}{3}$$

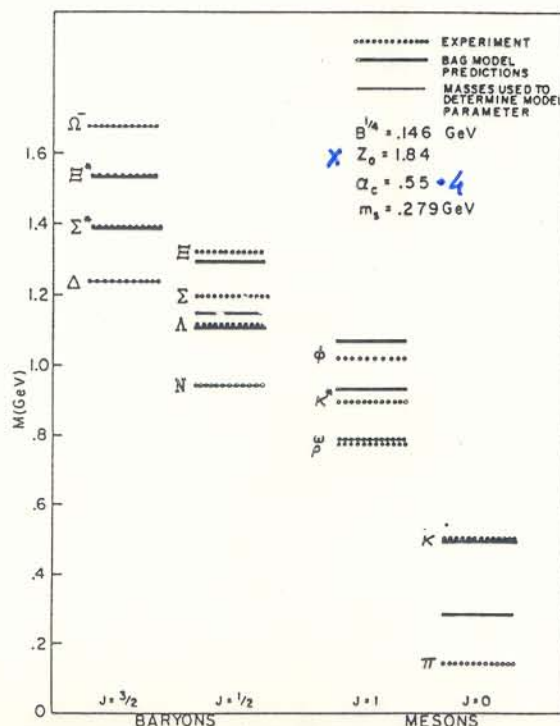
$$m=0 \quad E = \frac{Nx}{R} + \frac{4\pi R^3}{3} B$$

$$\frac{\partial E}{\partial R} = 4\pi R^2 B - \frac{Nx}{R^2} = 0$$

$$R = \left(\frac{Nx}{4\pi B} \right)^{1/4}$$

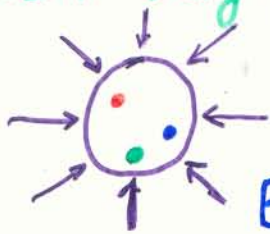
$$E = M = \frac{4}{3} (4\pi B)^{3/4} (Nx)^{3/4}$$

Спектр масс адронов



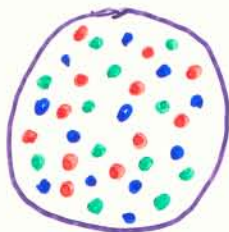
Странная кварковая материя

MIT bag model (модель мешка)



Свободные релятивистские кварки внутри полости.
Внешнее давление уравновешивается давлением кварков

Бесконечная нейтральная кварковая материя



1. u и d-кварки $n_d = 2n_u$

$$p_{ud} = p_u + p_d = \frac{1}{4} (3\pi^2)^{1/3} n_u^{4/3} (1 + 2^{4/3})$$

2. u, d, s-кварки $n_u = n_d = n_s$

$$p_{uds} = \tilde{p}_u + \tilde{p}_d + \tilde{p}_s = \frac{1}{4} (3\pi^2)^{1/3} \tilde{n}_u^{4/3} \cdot 3$$

$$p_{ud} = p_{uds} \Rightarrow \tilde{n}_u = \left(\frac{1 + 2^{4/3}}{3} \right)^{3/4} n_u$$

Энергия/кварк

$$\begin{aligned} \frac{E_{ud}}{q} &= \frac{1}{3} \langle k_u \rangle + \frac{2}{3} \langle k_d \rangle = \frac{1}{4} (3\pi^2)^{1/3} (n_u^{1/3} + 2n_d^{1/3}) \\ &= \frac{1}{4} (3\pi^2)^{1/3} n_u^{1/3} (1 + 2^{4/3}) \end{aligned}$$

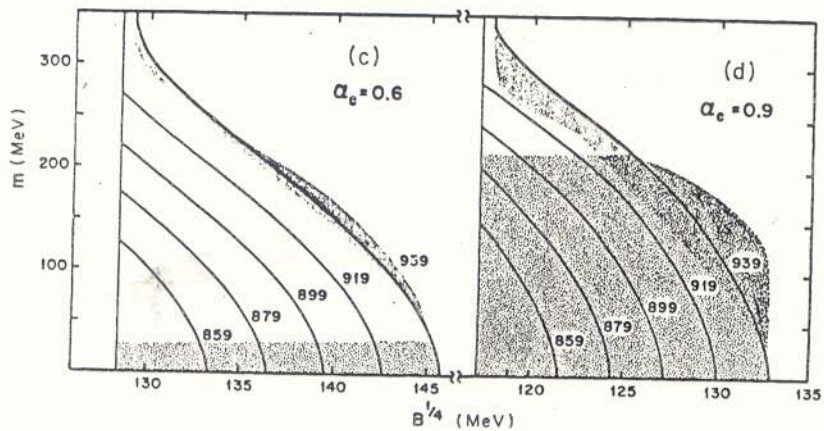
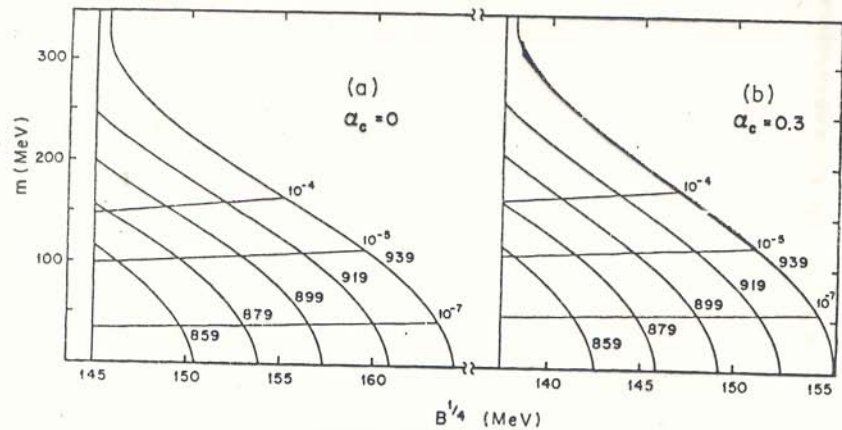
$$\frac{E_{uds}}{q} = \frac{1}{3} \langle \tilde{k}_u \rangle + \frac{1}{3} \langle \tilde{k}_d \rangle + \frac{1}{3} \langle \tilde{k}_s \rangle = \frac{1}{4} (3\pi^2)^{1/3} \tilde{n}_u^{1/3} \cdot 3$$

$$\frac{E_{uds}/q}{E_{ud}/q} = \frac{3}{1 + 2^{4/3}} \frac{\tilde{n}_u^{1/3}}{n_u^{1/3}} = \left(\frac{3}{1 + 2^{4/3}} \right)^{3/4} \approx 0.89$$

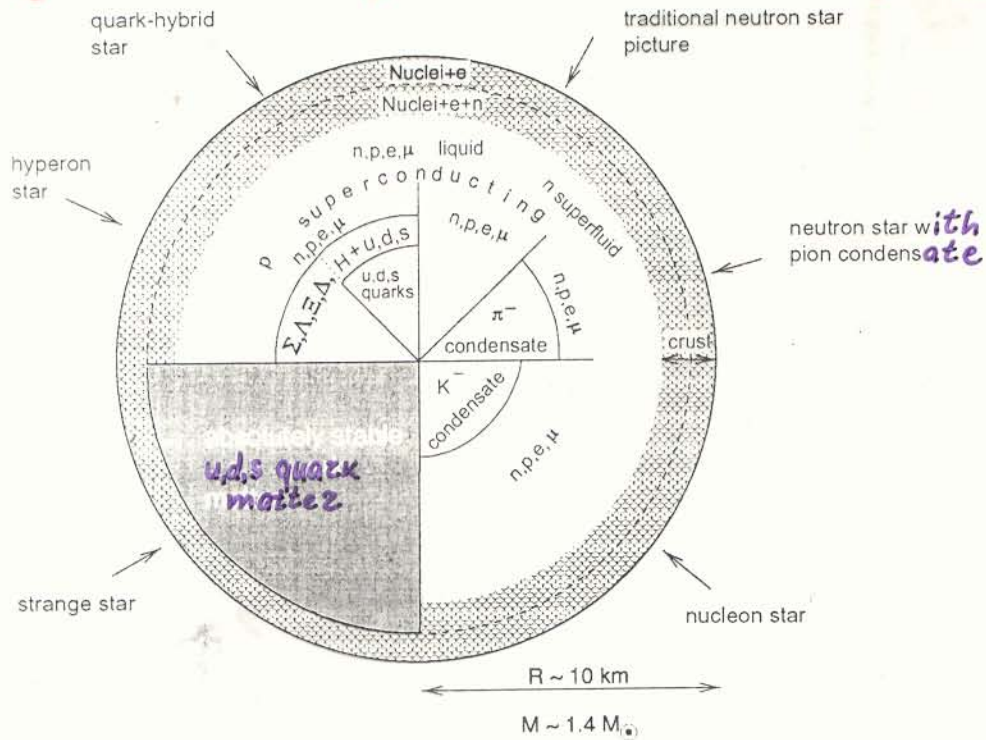
$$E_{ud}/3q \approx 930 \text{ МэВ}$$

$$E_{uds}/3q \approx 830 \text{ МэВ} \quad (!!!)$$

Область
стабильности
странной
кварковой
материи



Различные модели нейтронных звезд



Ядерные объекты в природе

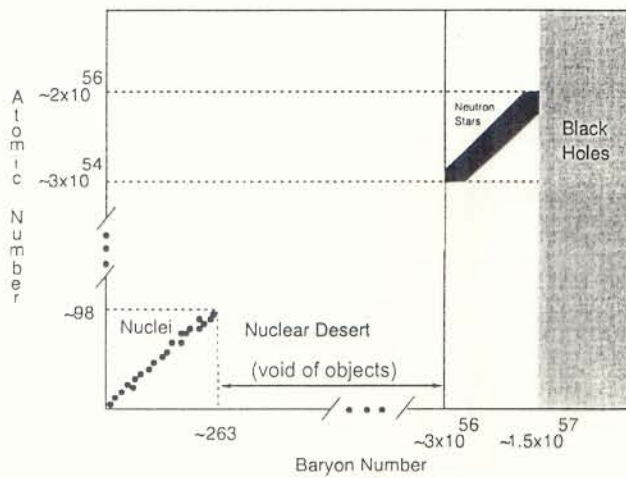
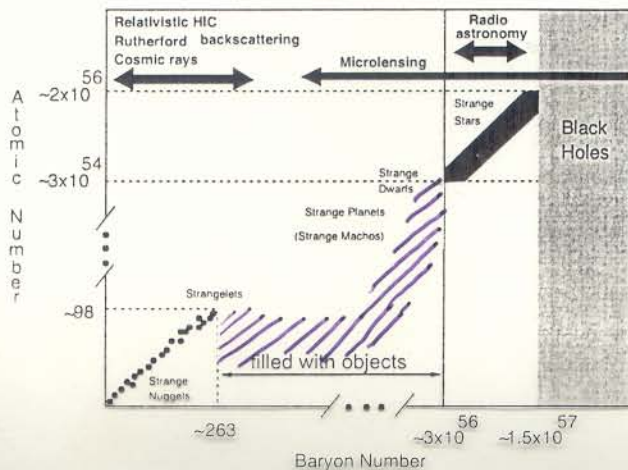
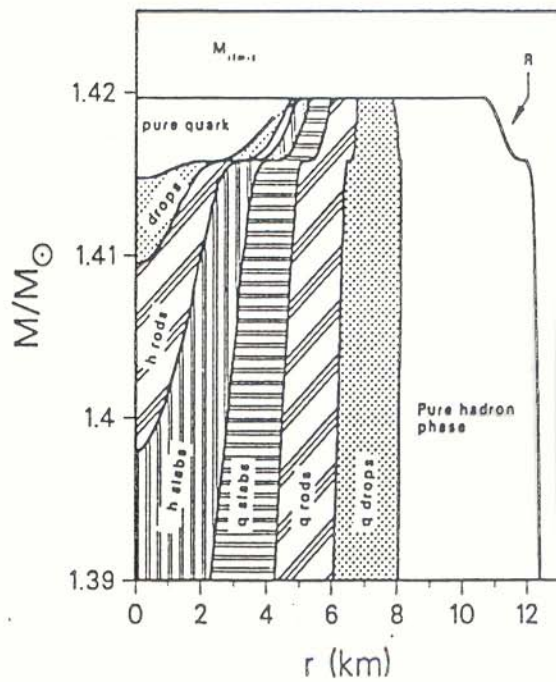
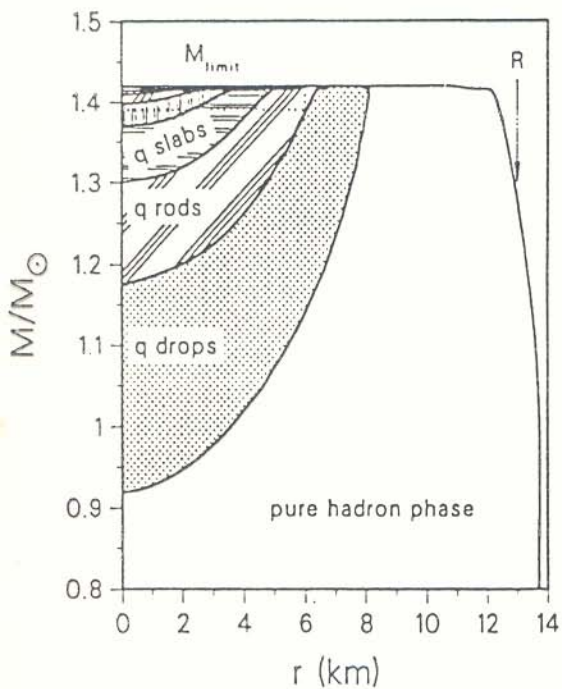
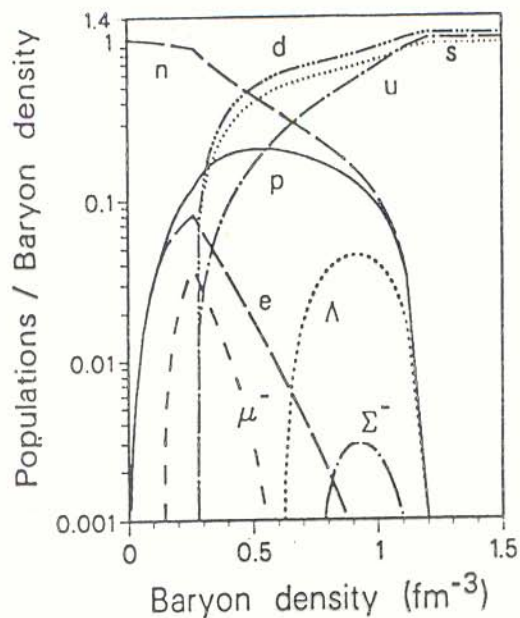


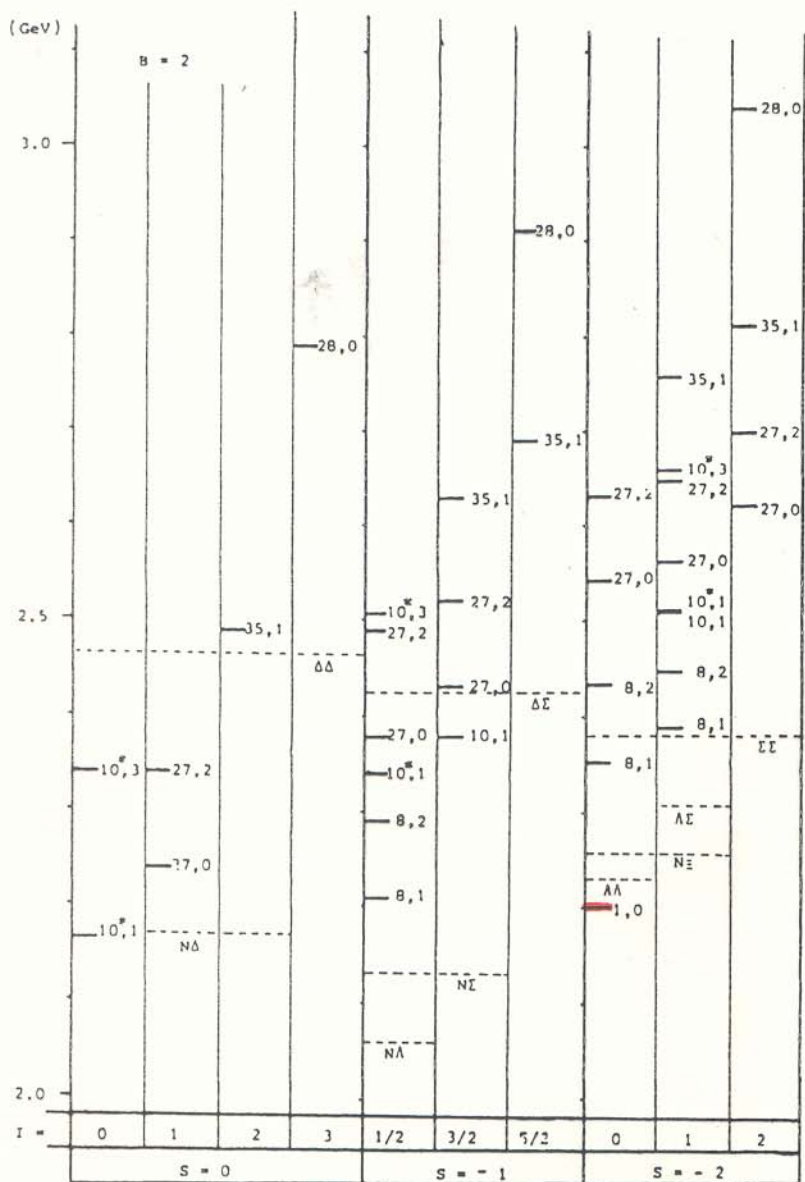
Figure 11. Graphical illustration of all stable nuclear objects, from nuclei to stellar configurations, if nuclear matter (that is, ^{56}Fe) is the most stable form of matter.



Кварки в нейтронных звездах



Спектр дибарионов в MIT bag model



$$|H\rangle = |uuddss\rangle = \frac{1}{\sqrt{8}} |\Lambda\Lambda\rangle + \sqrt{\frac{4}{8}} |\Sigma N\rangle - \sqrt{\frac{3}{8}} |\Sigma\Sigma\rangle$$

$B=2 \quad S=-2 \quad I=0$

Экзотические мезоны - кандидаты

Скалярный глюоний

$$J^{PC} I^G = 0^{++} 0^+$$

$f_0(1370)$ $\Gamma = 300-500 \text{ МэВ}$

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} + d\bar{d})$$

$f_0(1500)$

$\Gamma \approx 100 \text{ МэВ}$

не образуется в $u\bar{u}$

$f_0(1710)$

$\rightarrow K\bar{K}$, образуется в $u\bar{u}$, не образуется в $p\bar{p}$; $s\bar{s}$
 $\Gamma \approx 140 \text{ МэВ}$

Распад глюония

$$\pi\pi : K\bar{K} : \eta\eta : \eta\eta'$$

$$3 : 4 : 1 : 0$$

Гибриды

$$1^{-+} 1^{-}$$

$\pi_1(1400)$

$M = 1360-1406 \text{ МэВ}$

$\Gamma = 180-385 \text{ МэВ}$

$\pi_1(1600)$

$M = 1560-1620 \text{ МэВ}$

$\Gamma = 170-340 \text{ МэВ}$

Скалярные

тетракварки

$f_0(980)$

$\Gamma = 40-100 \text{ МэВ}$

$a_0(980) (I=1)$

$\Gamma = 50-100 \text{ МэВ}$

(?) $f_0(600)$ или σ

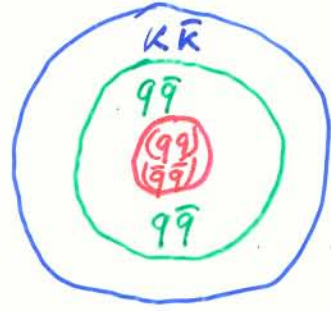
$M = 400-1200 \text{ МэВ}$

$\Gamma = 600-1000 \text{ МэВ}$

? $\chi(800)$

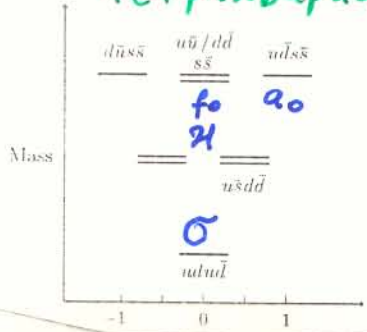
$\Gamma \sim 400 \text{ МэВ}$

$f_0(980), a_0(980)$

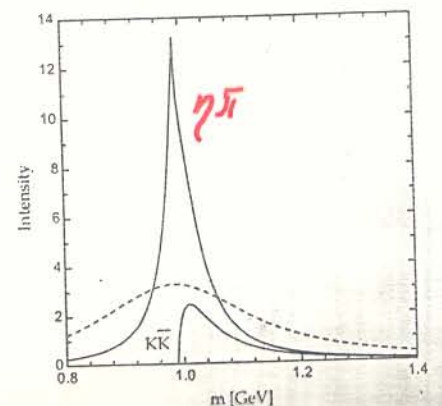
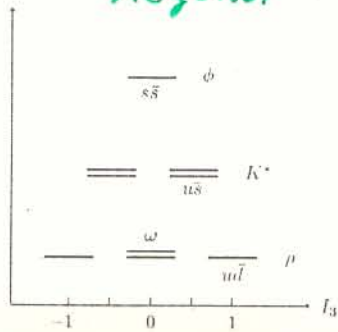


Распад $a_0(980)$

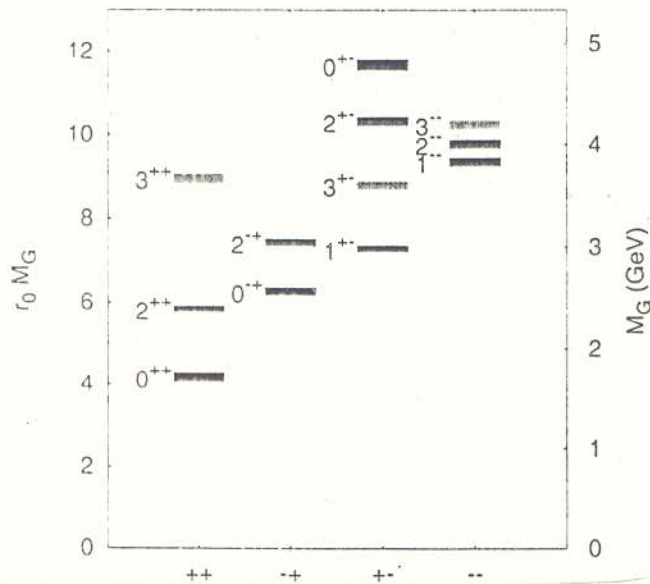
скалярные тетракварки



векторные мезоны

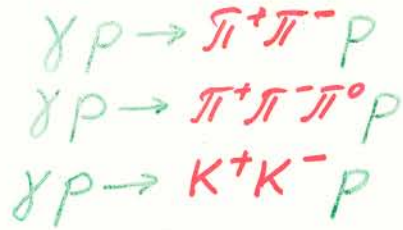
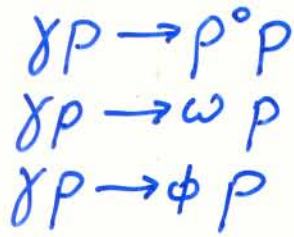


Спектр глюболов



- Состояния с $P=+1$ ниже, чем с $P=-1$
- Нет связи с фотоном
- В распадах все ароматы равноправны
- Возможны экзотические УРС

Фото- и электророждение векторных мезонов



Амплитуда распада $V^0 \rightarrow e^+ e^-$

$$\begin{aligned} |\rho^0\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (u\bar{u} - d\bar{d}) \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{2}{3} - \left(-\frac{1}{3}\right) \right) = \frac{1}{\sqrt{2}} \\ |\omega^0\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (u\bar{u} + d\bar{d}) \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{2}{3} + \left(-\frac{1}{3}\right) \right) = \frac{1}{3\sqrt{2}} \\ |\phi^0\rangle &= s\bar{s} \Rightarrow -\frac{1}{3} \end{aligned}$$

$$\Gamma(V^0 \rightarrow e^+ e^-) = \frac{4\pi\alpha^2}{3} F_V^2 m_V^{-3}$$

$$F_\rho^2 : F_\omega^2 : F_\phi^2 = 9 : 1 : 2$$

$$BR(\rho^0 \rightarrow e^+ e^-) = (4.49 \pm 0.22) \cdot 10^{-5}$$

$$BR(\omega^0 \rightarrow e^+ e^-) = (7.07 \pm 0.19) \cdot 10^{-5}$$

$$BR(\phi^0 \rightarrow e^+ e^-) = (2.98 \pm 0.04) \cdot 10^{-4}$$

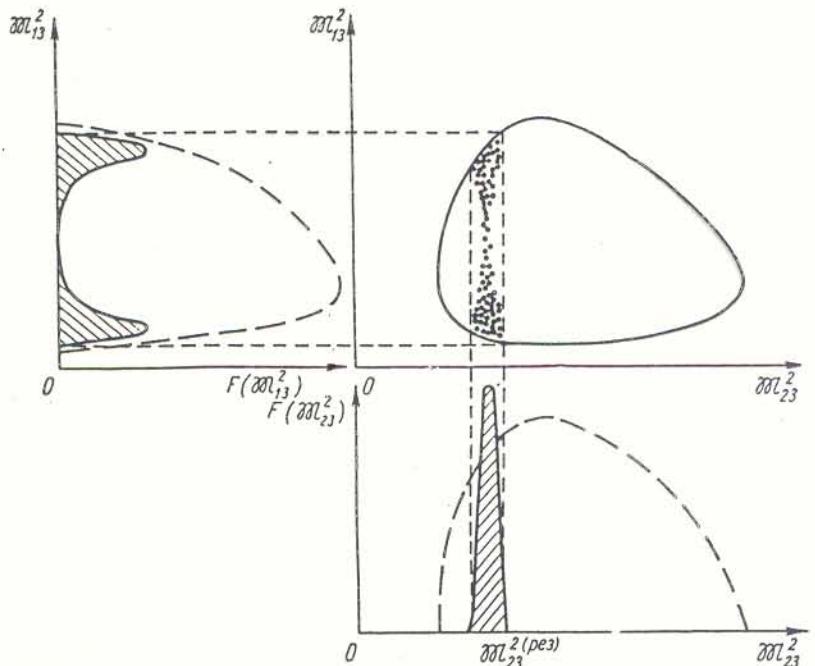
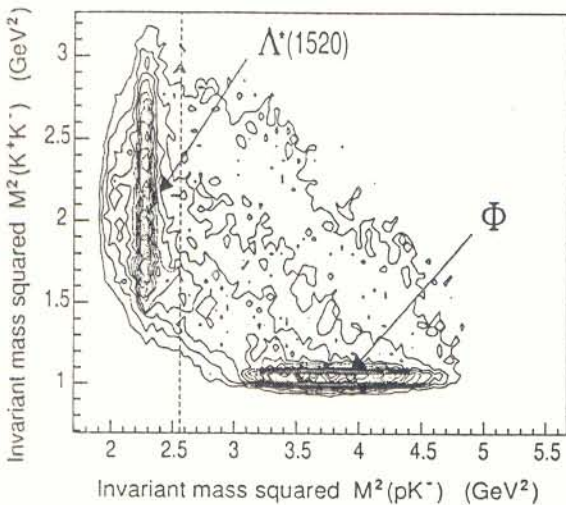
$$\Gamma(\rho^0 \rightarrow e^+ e^-) = BR \cdot \Gamma_{tot} = 4.75 \text{ keV}$$

$$\Gamma(\omega^0 \rightarrow e^+ e^-) = 0.59 \text{ keV}$$

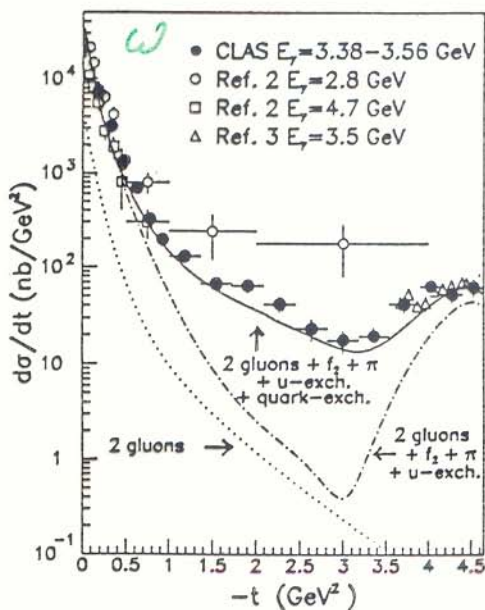
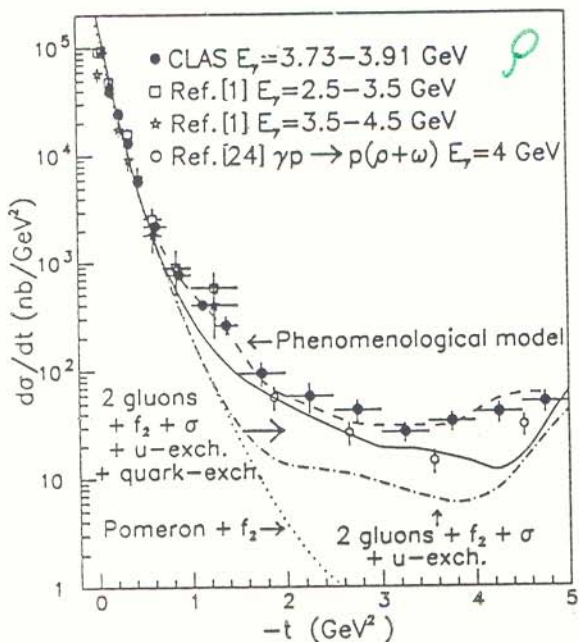
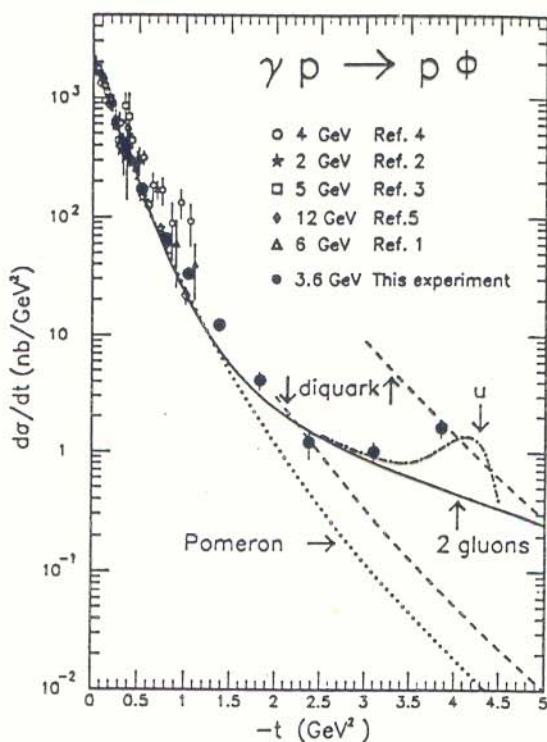
$$\Gamma(\phi^0 \rightarrow e^+ e^-) = 1.27 \text{ keV}$$

Трехчастичные конечные состояния

Диаграмма Далица



Дифференциальные сечения фоторождения векторных мезонов



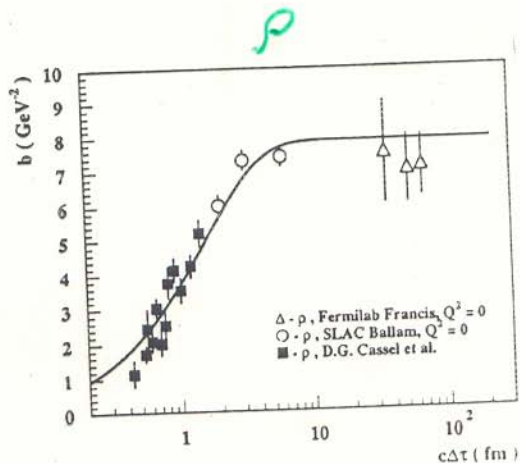
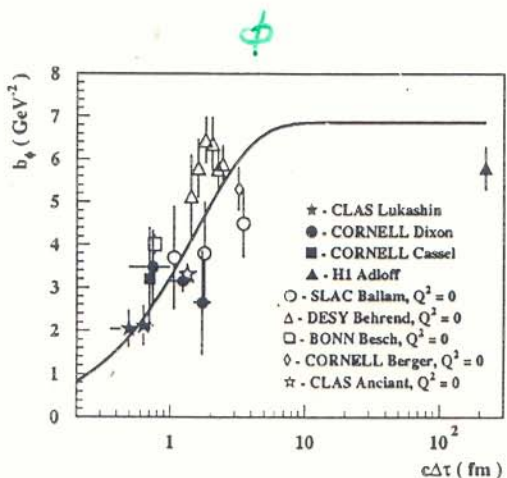
$$\frac{d\tilde{\sigma}}{dt} = A e^{\beta t}$$

ρ : $B = 6.4 \pm 0.3$ $\Gamma \approx B^{-2}$

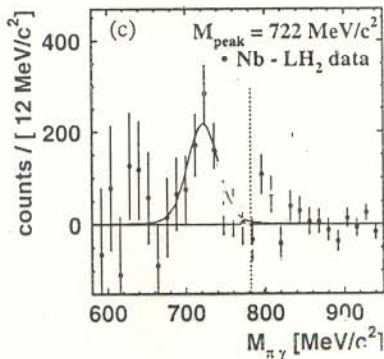
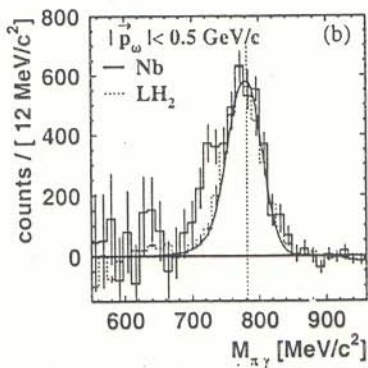
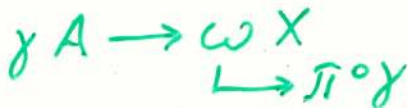
ω : $B = 5.4 \pm 0.6$ $\Gamma \approx B^{-2}$

ϕ : $B \approx 3.3$ $\Gamma \approx B^{-2}$

Параметр наклона дифракционного конуса

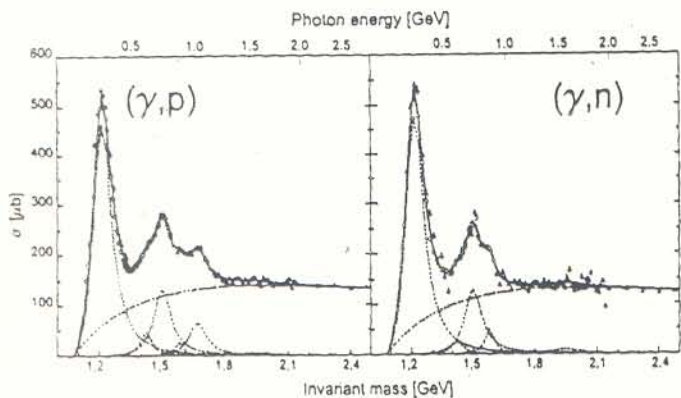


Модификация свойств ω -мезона в ядре

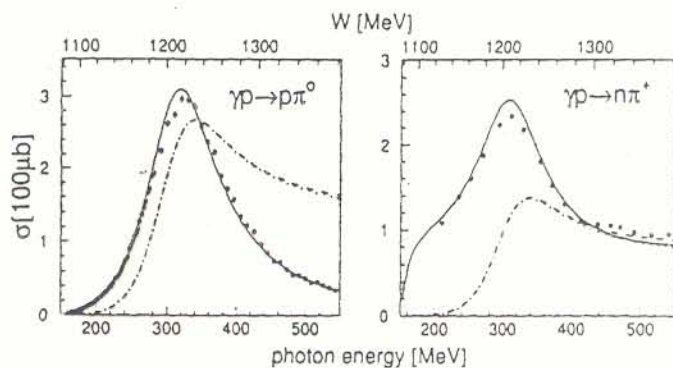


$$M = 722^{+4}_{-4} {}^{+35}_{-5} \text{ MeV}$$

Полные сечения фотопоглощения

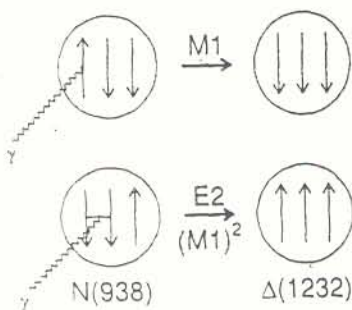


Δ-резонанс на фотонах

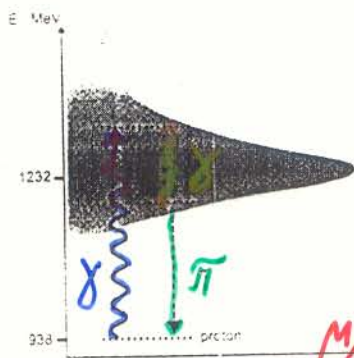


2 : 1

Электромагнитные переходы N → Δ



Магнитный момент Δ



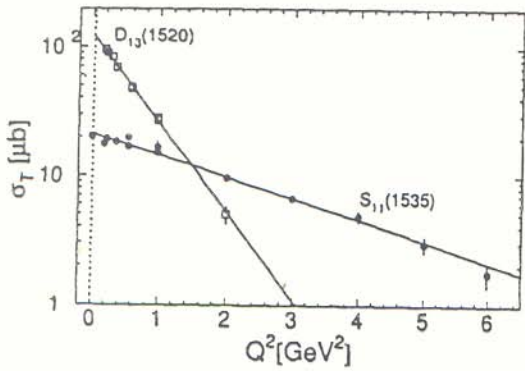
$\pi^+ p \rightarrow \pi^+ \gamma p$
 $\gamma p \rightarrow \pi^0 \gamma p$

$$\mu_{\Delta^{++}} = (3.7 - 7.5) \mu_{\text{протон}}$$

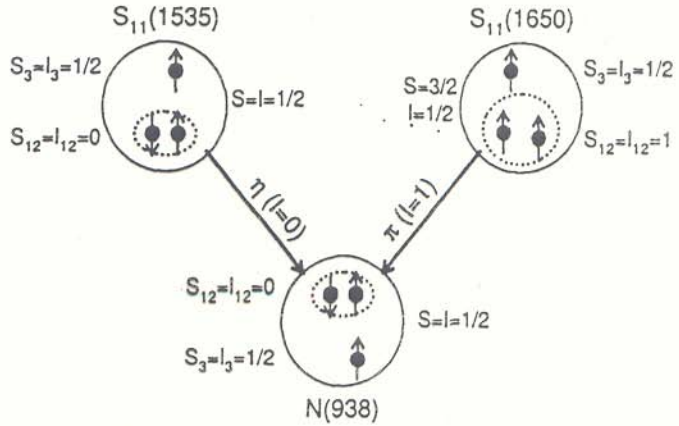
Вторая резонансная область

	M, MeV	Γ, MeV	Распады, %
$N(1440) \frac{1}{2}^+$	1430-1470	250-450	$N\pi$ 60-70 $N\pi\pi$ 30-40 $\Delta\pi$ 20-30
$N(1520) \frac{3}{2}^-$	1515-1530	110-135	$N\pi$ 50-60 $N\pi\pi$ 40-50 $\Delta\pi$ 15-25 $N\rho$ 15-25
$N(1535) \frac{1}{2}^-$	1520-1555	100-200	$N\pi$ 35-55 $N\pi\pi$ 1-10 $N\eta$ 30-55

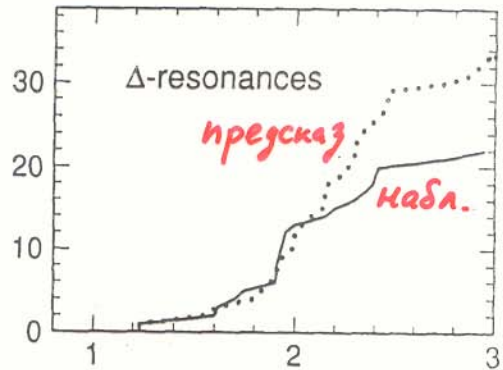
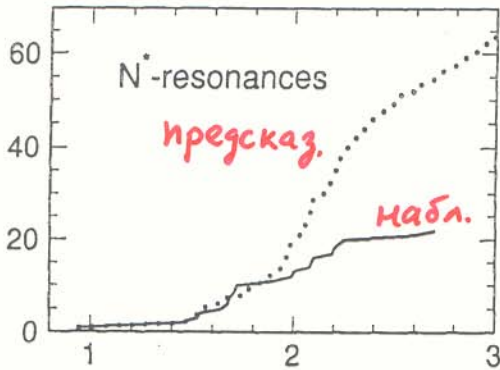
Сечение электророзщепления резонансов



Кварк-дикуарковая структура

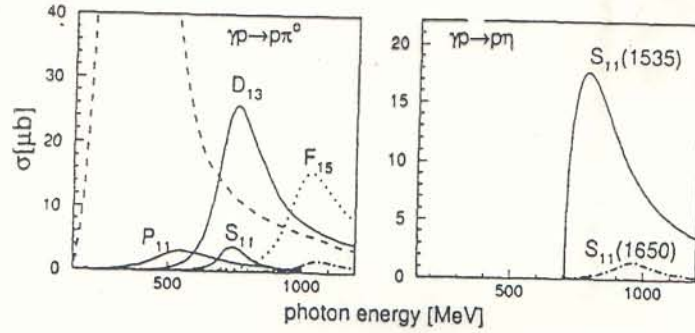


Число резонансов

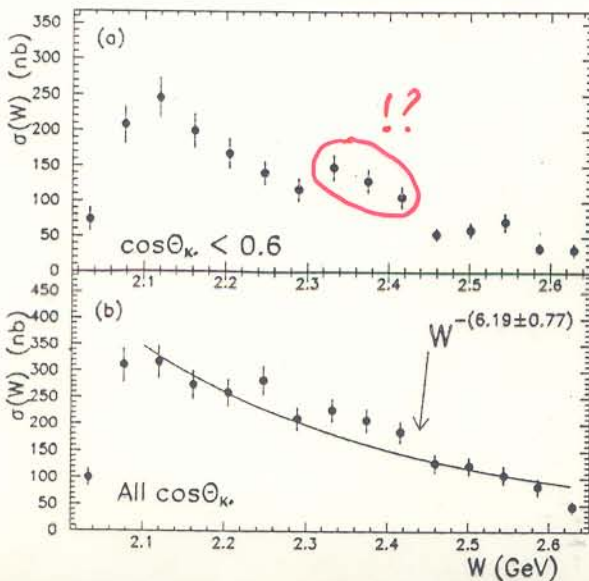
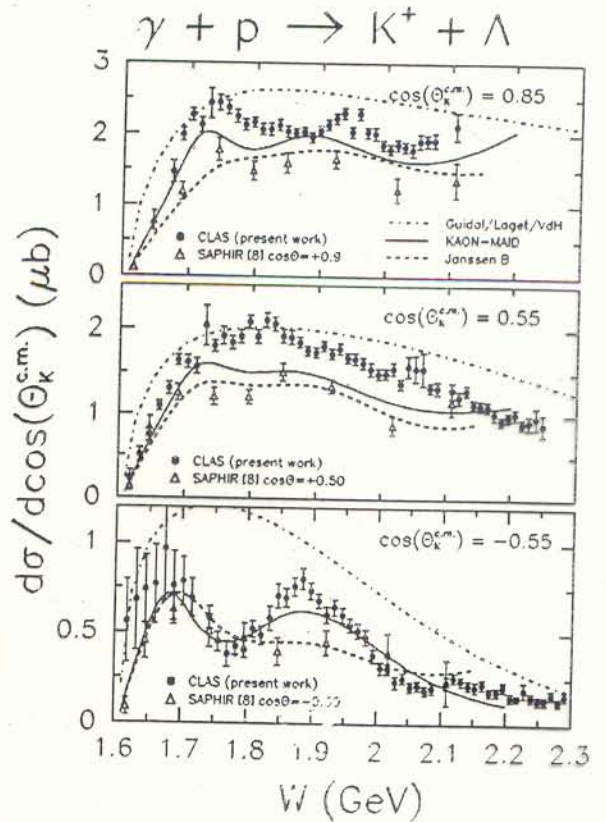
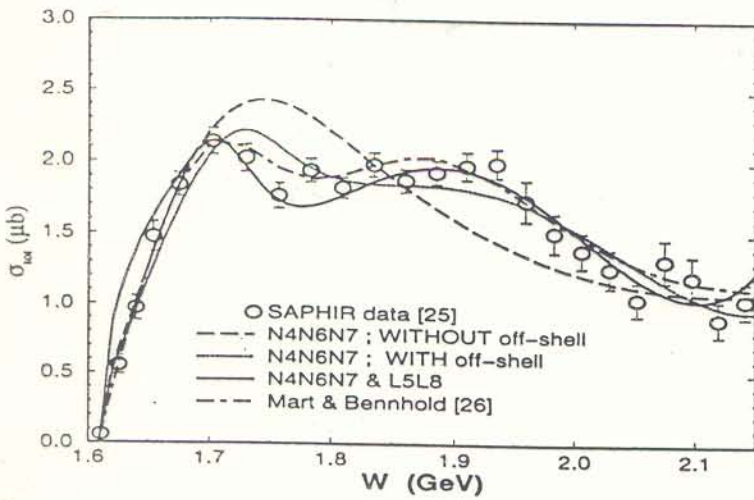


$W[\text{GeV}]$

Выделение $N(1535)$ -резонанса по каналу $N\eta$



Резонанс $N(1895)$!?

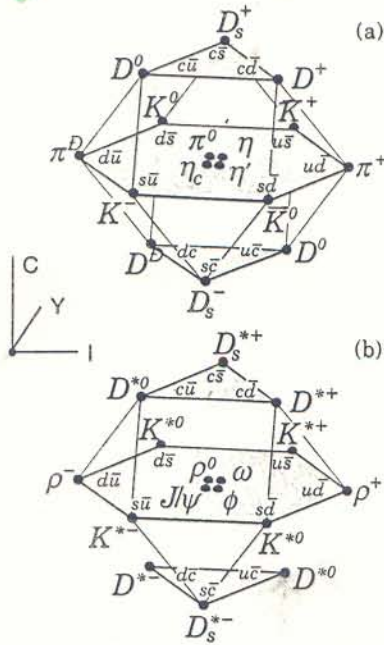


$\gamma p \rightarrow \Lambda(1520) K^+$

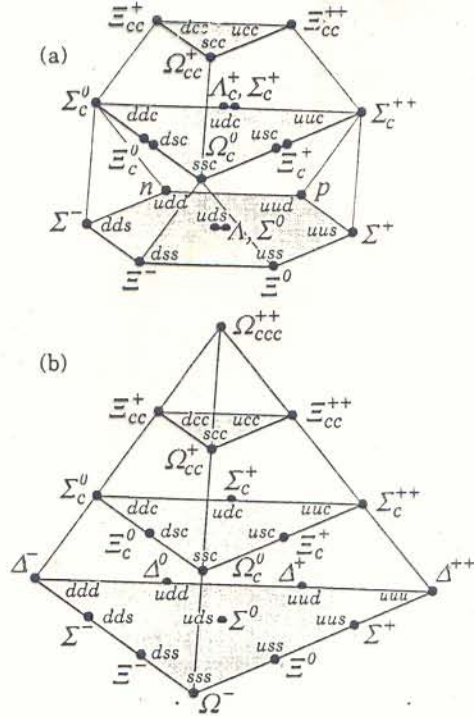
Очарованные

частицы

Мезонные 16-плеты



Барионные 20-плеты



$1/2^+$

$3/2^+$

Барионы

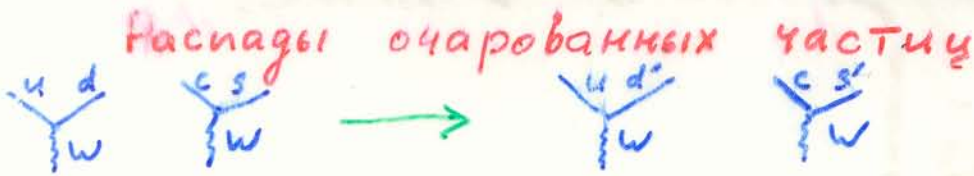
M(мэВ) τ, Γ (2006)

Λ_c^+ (udc)	2285	$\tau = 2 \cdot 10^{-13} \text{ c}$	2286	
Σ_c^{++} (uuc)	2453	$\Gamma = 2 \text{ MeV}$	2454	
Σ_c^+ (udc)	2451	$\Gamma < 4.6 \text{ MeV}$	2453	
Σ_c^0 (ddc)	2452	$\Gamma = 1.6 \text{ MeV}$	2454	$\Gamma = 2 \text{ MeV}$
Ξ_c^+ (usc)	2466	$\tau = 4.4 \cdot 10^{-13} \text{ c}$	2468	$\Xi_c^{'+}$ 2576
Ξ_c^0 (dsc)	2472	$\tau = 1 \cdot 10^{-13} \text{ c}$	2471	$\Xi_c^{'0}$ 2578
Ω_c^0 (ssc)	2698	$\tau = 0.6 \cdot 10^{-13} \text{ c}$	2698	
Ξ_{cc}^+ (dcc)	3519			

Мезоны

M(мэВ) $\tau(\text{c})$

D^\pm (c \bar{d} , d \bar{c})	1869	$1 \cdot 10^{-12} \text{ c}$	1870
$D^0 \bar{D}^0$ (c \bar{u} , u \bar{c})	1865	$4 \cdot 10^{-13} \text{ c}$	
D_s^\pm (c \bar{s} , s \bar{c})	1968	$5 \cdot 10^{-13} \text{ c}$	



$$d' = d \cos \theta_c + s \sin \theta_c$$

$$s' = -d \sin \theta_c + s \cos \theta_c$$

$\theta_c \sim 0.26$

Чармоний $c\bar{c}$

	J^{PC}	$M, M \rightarrow B$	Γ
η_c	0^{-+}	$1^1 S_0$	17 МэВ
η_c'	0^{-+}	$2^1 S_0$	17 МэВ
J/ψ	1^{--}	$1^3 S_1$	91 кэВ
ψ	1^{--}	$2^3 S_1$	0.3 МэВ
χ_{c0}	0^{++}	$1^3 P_0$	10 МэВ
χ_{c1}	1^{++}	$1^3 P_1$	1 МэВ
χ_{c2}	2^{++}	$1^3 P_2$	2 МэВ
h_c	1^{+-}	$1^1 P_1$	$3524 (?) ?$

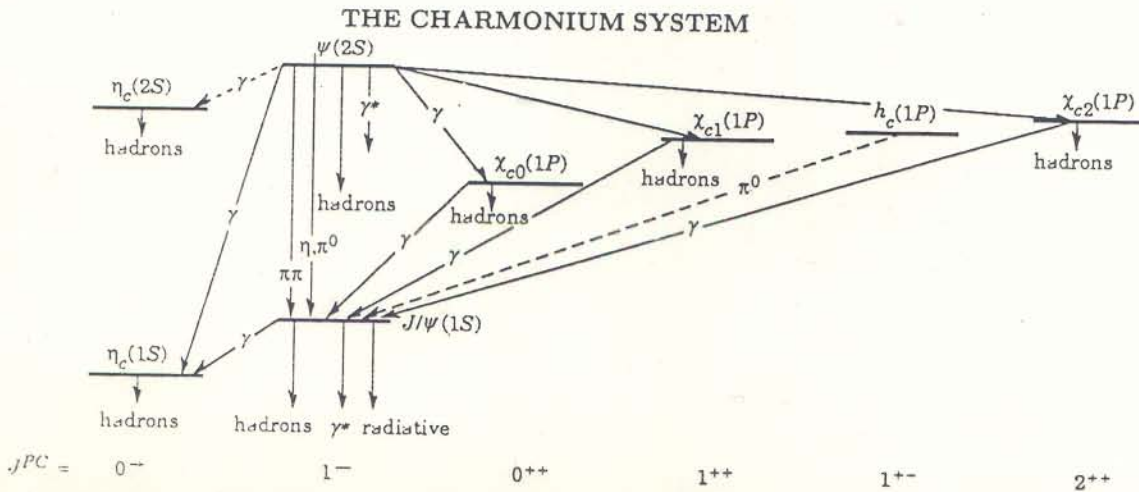
$2M(\psi) = 3730$

$\psi(3770) \quad \psi(4040) \quad \psi(4160)$

$\Gamma \quad 24 \text{ МэВ} \quad 52 \text{ МэВ} \quad 78 \text{ МэВ}$

$\chi(3872) \quad 3D_3 ? \quad D_0 \bar{D}_0^* - \bar{D}_0 D_0^* ? \quad c\bar{c}g ?$

$\downarrow \gamma/\psi \pi^+ \pi^- \quad \Gamma < 2 \text{ МэВ} \quad M(D_0) + M(D_0^*) = 3871 \text{ МэВ}$



Экзотические состояния чармония

X(3872)

$\Gamma < 2 \text{ МэВ}$

$\rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$

$\rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^- \pi^0$

$\rightarrow D^0 \bar{D}^0 \pi^0$

$\rightarrow J/\psi \gamma$ $C \neq \pm 1$

$1^{++} (?)$ $\chi_{c1}' - ?$ $c\bar{c}q\bar{q} - ?$ $c\bar{c}g - ?$

Молекула - ?

Пороги

$D^{0*} \bar{D}^0$	3871 МэВ	$J/\psi \rho^0$	3868 МэВ
$D^{+*} \bar{D}^-$	3879 МэВ	$J/\psi \omega$	3880 МэВ

Молекула $\neq \chi_{c1}' - ?$

Кинематич. эффект - ?

X(3940)

$e^+e^- \rightarrow J/\psi \chi; \Gamma < 52 \text{ МэВ}$

$\rightarrow D \bar{D}^*$

$\chi_{c1}' - ?$

$\chi_{c1}'' - ?$

Y(3940)

$\Gamma \sim 90 \text{ МэВ}$

$\rightarrow \omega J/\psi$

$\chi_{c1}' - ?$

$c\bar{c}g - ?$

Z(3930)

$\Gamma \sim 20 \text{ МэВ}$

$\rightarrow D \bar{D}$

$\chi_{c2}' - ?$

Y(4260)

$e^+e^- \rightarrow \gamma Y$

$\Gamma \sim 90 \text{ МэВ}$

$\rightarrow J/\psi \pi \pi$

1^{--}

$3^3D_1 - ?$

$\Lambda_c \bar{\Lambda}_c - ?$

$c\bar{c}q\bar{q}$

$\chi_{c2} - ?$

$c\bar{c}g - ?$

XYZ mesons (>5 σ signif)

Electrically neutral

Name	JPC	Γ (MeV)	Decay modes	Expts	comment
X(3872)	1 ⁺⁺	<2.3	$\pi\pi J/\psi$; $\gamma J/\psi$; $D\bar{D}^*$	Belle/CDF/DO/BaBar	$\bar{D}\bar{D}^*$ molecule?
X(3915)	(0/2) ⁺⁺	~23	$\omega J/\psi$	Belle	Same as Y(3940)?
X(3940)	0 ^{??}	~37	$D\bar{D}^*$ (not $D\bar{D}$, $\omega J/\psi$)	Belle	η_c'' (?)
Y(3940)	? ^{??}	~30	$\omega J/\psi$ (not $D\bar{D}^*$)	Belle/BaBar	Same as X(3915)?
X(4160)	0 ^{??}	~140	$D^*\bar{D}^*$ (not $D\bar{D}$, $D\bar{D}^*$)	Belle	η_c''' (?)
Y(4008)	1 ⁻⁻	~225	$\pi\pi J/\psi$	Belle	$\psi(4040)$?
Y(4260)	1 ⁻⁻	~80	$\pi\pi J/\psi$ (not $\pi\pi\psi'$)	BaBar/CLEO/Belle	c \bar{c} g hybrid?
Y(4350)	1 ⁻⁻	~75	$\pi\pi\psi'$ (not $\pi\pi J/\psi$)	BaBar/Belle	
Y(4660)	1 ⁻⁻	~50	$\pi\pi\psi'$; $\Lambda_c \bar{\Lambda}_c$ (?)	Belle	@ $\Lambda_c \bar{\Lambda}_c$ threshold

Electrically charged

Z(4430) [±]	J ^P =??	~100	$\pi^\pm \psi'$	Belle/ not BaBar	tetraquark?
Z _± (4050)	??	~80	$\pi^\pm \chi_{c1}$	Belle	"
Z _± (4660)	??	~180	$\pi^\pm \chi_{c1}$	Belle	"

D_s - мезонные резонансы ($c\bar{s}, s\bar{c}$)

(D_s)	0^-	1968	$\tau = 5 \cdot 10^{-13} \text{c}$	
	J^P	$M, M \approx B$	Γ	
D_s^*	$1^- (?)$	2112	$< 2 M \approx B$	
	$0^+ (?)$	2317	$< 5 M \approx B$	$D K ?$
	1^+	2459	$< 6 M \approx B$	$D^* K ?$
	$1^+ (?)$	2535	$< 3 M \approx B$	
	$2^+ (?)$	2573	$15 M \approx B$	
	?	2632	$< 17 M \approx B$	$c\bar{s}s\bar{s} ?$

$M(D) + M(K) = 2360 \text{ M} \approx B$