

1.  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$   
Реакция идет посредством слабого взаимодействия.

2.  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_e$   
Реакция не идет, т.к. не сохраняется  $L_e$  и  $L_\mu$ .

3.  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma$   
Реакция не идет, т.к. не сохраняется  $L_e$  и  $L_\mu$ .

4.  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$   
Реакция не идет, т.к. не сохраняется  $L_\mu$ .

5.  $\Sigma^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e$   
Реакция не идет, т.к. это полуплеитонный процесс, для которого не выполняется соотношение  $\Delta Q = \Delta S$ .

**Задача №7.** Определить кинетическую энергию мюона, образующегося в реакции распада покоящегося  $K^-$ -мезона.

*Решение:*

1. Запишем законы сохранения энергии и импульса (вычисление производится в системе единиц  $\hbar = c = 1$ ):

$$m_{K^-} = m_\mu + T_\mu + E_\nu = 3СЭ;$$

$$0 = p_\mu + p_\nu = 3СИ.$$

2. Из релятивистского соотношения и определений имеем:

$$T_\mu = \sqrt{p_\mu^2 + m_\mu^2} - m_\mu = \sqrt{(m_{K^-} - m_\mu - T_\mu)^2 + m_\mu^2} - m_\mu$$

Откуда

$$T_\mu = \frac{(m_{K^-} - m_\mu)^2}{2m_{K^-}} = \frac{(493 - 105)^2}{2 \cdot 493} \approx 153 \text{ МэВ}$$

**Задача №8.** Найти среднее время жизни нестабильной частицы, если ширина пика в сечении ее образования/распада равна  $\Gamma = 2 \text{ ГэВ}$ .

*Решение:*

$$\tau = \frac{\hbar}{\Gamma} = \frac{\hbar c}{\Gamma c} = \frac{0.2}{2c} = \frac{0.1}{c} = 3.33 \cdot 10^{-25} \text{ сек}$$

**Задача №9.** Найти максимальные значения квантовых чисел  $J^P$  для системы 3-х кварков с относительным орбитальным моментом  $L = 2$ .

*Решение:*

1. Из закона сохранения момента импульса:

$$J = L + S \Rightarrow J_{\max} = S_{\max} + L_{\max} = \max(1/2, 1/2, 1/2) + L = \frac{3}{2} + 2 = \frac{7}{2}$$



①  $\tau$  сред время жизни  $Z^0$  <sup>вр</sup> мюон  $\tau E = \hbar$   
 мюон мюон 2,5 ГэВ (сверх гравитон бозон с Т)

②  $\tau$  пробег глина волна  $\tau = 100$  МэВ

③ min кинетич. энергия (МэВ) (порядок термич) протонов

+ в реакции  $p + p \rightarrow p + p + \pi^+ + \pi^-$   
 рождения мюонов на нейтралит. водород.  
 мюоний. (энергия столкнов. из сдв в с.п. реакции)

④ энергия столкновения (кинет. энергия  
 + одной част. в сис-ме покоя др)  $p$  и  $\bar{p}$   
 в коллайдере? энергия кинет. мюон 1000 ГэВ

- ⑤ Какая одна! из реакц. возможна:
- 1)  $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda + \gamma$  <sup>возможно, идет (?)</sup> (возможная реакция)
  - 2)  $\Sigma^- \rightarrow n + K^-$  <sup>не сохр. J</sup>
  - 3)  $\Sigma^- \rightarrow \Lambda + \pi^-$  <sup>не идет (запрещено кинематически)</sup>
  - 4)  $n \rightarrow p + e$  <sup>не идет (нет  $\delta_e$  левост. заряд)</sup>
  - 5)  $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda + \pi^0$  <sup>возможно, не сохр чет. P. (?)</sup>

⑥ (10. Закон радиации распада)  
 Во к. рац уменьшил интенсив мюон нейтронов с энергией 300 эВ при прохождении



генераторы вакуум раст. 384 000 км

7) (пороговая энергия фотона)

+ max значение гмт волны  $\gamma$ -кванта;

при  $n$ -реб возможности:

$$E_{\text{св. гейт}} = E_{\gamma} = \frac{hc}{\lambda}$$

$\gamma + d \rightarrow p + n$ .  $E_{\text{св. гейтрона}} \sim 2.2 \text{ МэВ}$

8) (спин и четность мезон-антимезон пар)

+ max значение спина и чет.  $J^P$  где

мезон-антимезон пар с орбит. моментом

там  $l=1$

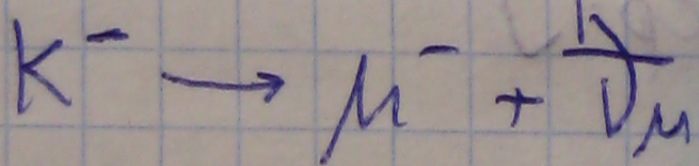
$$\vec{J} = \vec{S}_1 + \vec{S}_2 + \vec{L}$$

$$P = (+1)(+1)(-1)^{l=1} = +1$$

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + 1; J_{\text{max}} = 2$$

9) (миним. энергия частиц в распаде)

+ миним. энергия мезона:



$$m(K^-) = 493,68 \text{ МэВ}$$

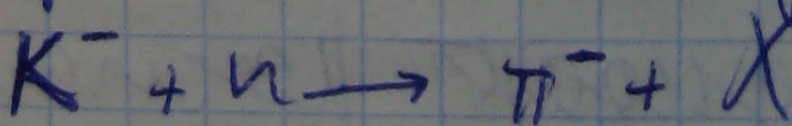
$$m(\mu^-) = 105,66 \text{ МэВ}$$

$$T_{\mu} = \frac{(m_K - m_{\mu})^2}{2m_K}$$

$m(\bar{\nu}_{\mu})$  от мана. релятивизм. с. 16

10) (идентификация мезон. частиц в сильн. или в слабом.)

$X = ?$



сокр. всех квант. чисел



Калибровочные (фундаментальные) бозоны

Частица	Масса, $mc^2$	Ширина распада $\Gamma$ (время жизни $\tau = \hbar/\Gamma$ )	Спин-чётность, изоспин $J^P(I)$	Основные моды распада
$\gamma$	$< 10^{-18}$ эВ	стабилен	$1^-(0, 1)$	
$W^\pm$	80.39 ГэВ	$\Gamma = 2.1$ ГэВ	1	$e\nu, \mu\nu, \tau\nu, \text{адроны}$
Z	91.19 ГэВ	$\Gamma = 2.50$ ГэВ	1	$e^+e^-, \mu^+\mu^-, \tau^+\tau^-, \text{адроны}$
g (глюон)	0		$1^-(0)$	
гравитон	0		2	

окрашены  
9-1=8 штук  
цветов  
бозоны

Лептоны ( $J = 1/2$ )

Частица	Масса, $mc^2$	Время жизни	Лептонный заряд			Основные моды распада
			$L_e$	$L_\mu$	$L_\tau$	
$\nu_e$	$< 2$ эВ	стабильно	+1	0	0	
$\nu_\mu$	$< 0.19$ МэВ	стабильно	0	+1	0	
$\nu_\tau$	$< 18.2$ МэВ	стабильно	0	0	+1	
$e^-$	0.511 МэВ	$> 4.6 \cdot 10^{26}$ лет	+1	0	0	
$\mu^-$	105.66 МэВ	$2.2 \cdot 10^{-6}$ с	0	+1	0	$e\bar{\nu}\nu$
$\tau^-$	1777 МэВ	$2.9 \cdot 10^{-13}$ с	0	0	+1	адроны + $\nu, \mu\bar{\nu}\nu, e\bar{\nu}\nu$

наполнены

Кварки ( $J^P = 1/2^+$ , Барионный заряд  $B = 1/3$ )

Характеристика	Тип кварка (аромат)					
	d	u	s	c	b	t
Электрический заряд $Q$	$-\frac{1}{3}e$	$+\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	$+\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	$+\frac{2}{3}e$
Изоспин $(I_3 = I_3^q)$	$1/2$	$1/2$	0	0	0	0
Проекция изоспина $(= I_3)$	$-1/2$	$+1/2$	0	0	0	0
Странность $(= -)$	0	0	-1	0	0	0
Charm $(= -)$	0	0	0	+1	0	0
Bottomness $(= -)$	0	0	0	0	-1	0
Topness $(= -)$	0	0	0	0	0	+1
Масса ( $mc^2$ )	4.5-5.5 МэВ	1.8-3.0 МэВ	95±5 МэВ	1.28±0.03 ГэВ	4.2-4.7 ГэВ	173.5±1 ГэВ

спин

окрашены (к, з, с)

Бозон: (J-целое)  
Фермион: (J-полуцелое)  
кварки ( $J^P = 1/2^+, B = 1/3$ )  
лептоны

999 или 999

АДРОНЫ: Избранные барионы  
(Барионный заряд  $B = 1$ )

Частица	Кварковая структура	Масса $mc^2$ , МэВ	Время жизни $\tau$ (с) или ширина $\Gamma$	Спин-чётность, изоспин $J^P(I)$	Основные моды распада
p	uud	938.27	$> 10^{32}$ лет	$1/2^+(1/2) + 1/2$	
n	udd	939.57	$880.1 \pm 1.1$	$1/2^+(1/2) - 1/2$	$p\bar{e}\bar{\nu}$
$\Lambda$	uds	1116	$2.6 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(0)$	$p\pi^-, n\pi^0$
$\Sigma^+$	uus	1189	$0.80 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1)$	$p\pi^0, n\pi^+$
$\Sigma^0$	uds	1193	$7.4 \cdot 10^{-20}$	$1/2^+(1)$	$\Lambda\gamma$
$\Sigma^-$	dds	1197	$1.5 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1)$	$n\pi^-$
$\Xi^0$	uss	1315	$2.9 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1/2)$	$\Lambda\pi^0$
$\Xi^-$	dss	1322	$1.6 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1/2)$	$\Lambda\pi^-$
$\Delta^{++}$	uuu	1230-1234	114-120 МэВ	$3/2^+(3/2)$	(n или p) + $\pi$
$\Delta^+$	uud				
$\Delta^0$	udd				
$\Delta^-$	ddd				
$\Sigma(1385)^+$	uus	1383	36 МэВ	$3/2^+(1)$	$\Lambda\pi, \Sigma\pi$
$\Sigma(1385)^0$	uds	1384	36 МэВ		
$\Sigma(1385)^-$	dds	1387	39 МэВ		
$\Xi(1530)^0$	uss	1532	9.1 МэВ	$3/2^+(1/2)$	$\Xi\pi$
$\Xi(1530)^-$	dss	1535	9.9 МэВ		
$\Omega^-$	sss	1672	$0.82 \cdot 10^{-10}$	$3/2^+(0)$	$\Lambda K^-, \Xi^0\pi^-$
$N(1440)^+$	uud	1420-1470	200-450 МэВ	$1/2^+(1/2)$	$n(p) + \pi(2\pi), \Delta\pi$
$N(1440)^0$	udd				
$N(1520)^+$	uud	1515-1525	100-125 МэВ	$3/2^-(1/2)$	$n(p) + \pi(2\pi), \Delta\pi$
$N(1520)^0$	udd				
$\Lambda_c^+$	udc	2286	$2.0 \cdot 10^{-13}$	$1/2^+(0)$	(n или p) + др.
$\Sigma_c(2455)^{++}$	uuc	2454	2.3 МэВ	$1/2^+(1)$	$\Lambda_c^+\pi$
$\Sigma_c(2455)^+$	udc	2453	$< 4.6$ МэВ		
$\Sigma_c(2455)^0$	ddc	2454	2.2 МэВ		

P = pi

адроны  
(из кварков) барионы ( $B = 1$ )  
(сильное взаимодействие)  $999$  (подцветный)  
(бесцветный)  $999$  (спин  $\downarrow$  фермион)  
 $999$



$\vec{J} = \vec{S} + \vec{L}$   
спин относительно  
центра масс

$P_{ij} = \pi_i \pi_j (-1)^{L_{ij}}$

адроны все заряды

**АДРОНЫ: Избранные мезоны**  
(Барионный заряд B = 0) 99

Частица	Кварковая структура	Масса $mc^2$ , МэВ	Время жизни $\tau$ (сек) или ширина $\Gamma$	Спин-чётность, изоспин $J^P(I)$	Основные моды распада
$\pi^+$	$u\bar{d}$	139.57	$2.6 \cdot 10^{-8}$	$0^-(1)$	$\nu\mu^+$
$\pi^-$	$d\bar{u}$	139.57	$2.6 \cdot 10^{-8}$	$0^-(1)$	$\bar{\nu}\mu^-$
$\pi^0$	$u\bar{u} - d\bar{d}$	134.98	$8.5 \cdot 10^{-17}$	$0^-(1)$	$2\gamma$
$K^+$	$u\bar{s}$	494	$1.2 \cdot 10^{-8}$	$0^-(1/2)$	$\nu\mu^+, \pi^0 \pi^+$
$K^-$	$s\bar{u}$	494	$1.2 \cdot 10^{-8}$	$0^-(1/2)$	$\bar{\nu}\mu^-, \pi^0 \pi^-$
$K^0$	$d\bar{s}$	498	$9.0 \cdot 10^{-11} K_S^0$	$0^-(1/2)$	$\pi^+ \pi^-, \pi^0 \pi^0$
$\bar{K}^0$	$s\bar{d}$	498	$5.1 \cdot 10^{-8} K_L^0$	$0^-(1/2)$	$\pi^+ \pi^-, \pi^0 \pi^0$
$\eta$	$u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}$	548	1.30 кэВ	$0^-(0)$	$2\gamma, 3\pi$
$\eta'$	$u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s}$	958	0.20 МэВ	$0^-(0)$	$\eta 2\pi, \rho^0 \gamma$
$\rho^+$	$u\bar{d}$	775	149 МэВ	$1^-(1)$	$\pi\pi$
$\rho^-$	$d\bar{u}$				
$\rho^0$	$u\bar{u} - d\bar{d}$				
$\omega$	$u\bar{u} + d\bar{d}$	783	8.5 МэВ	$1^-(0)$	$3\pi$
$\phi$	$s\bar{s}$	1019	4.3 МэВ	$1^-(0)$	$K^+ K^-, K_L^0 K_S^0$
$D^+$	$c\bar{d}$	1870	$1.0 \cdot 10^{-12}$	$0^-(1/2)$	$K + \text{другие}, e + \text{другие}, \mu + \text{другие}$
$D^-$	$d\bar{c}$				
$D^0$	$c\bar{u}$	1865	$4.1 \cdot 10^{-13}$	$0^-(1/2)$	$K + \text{другие}, e + \text{другие}, \mu + \text{другие}$
$\bar{D}^0$	$u\bar{c}$				
$D_S^+$	$c\bar{s}$	1968	$5.0 \cdot 10^{-13}$	$0^-(0)$	$K + \text{другие}$
$D_S^-$	$s\bar{c}$				
$B^+$	$u\bar{b}$	5279	$1.6 \cdot 10^{-12}$	$0^-(1/2)$	$D + \text{другие}, D^* + \text{другие}, \nu + \text{другие}$
$B^-$	$b\bar{u}$		$1.6 \cdot 10^{-12}$		
$B^0$	$d\bar{b}$		$1.5 \cdot 10^{-12}$		
$\bar{B}^0$	$b\bar{d}$		$1.5 \cdot 10^{-12}$		
$J/\psi$	$c\bar{c}$	3097	93 кэВ	$1^-(0)$	адроны, $2e, 2\mu$
$\Upsilon$	$b\bar{b}$	9460	54 кэВ	$1^-(0)$	$\tau^+ \tau^-, \mu^+ \mu^-, e^+ e^-$

$S = +\bar{5}$  спин  
 $m = +\bar{m}$  масса  
 $Q = -\bar{Q} \quad a + b$   
 $B = -\bar{B} \quad a + b$   
 $L = -\bar{L}$   
 $S = -\bar{S} \quad a + b$   
 $C = -\bar{C}$   
 $B = -\bar{B}$   
 $T = -\bar{T} \rightarrow \rightarrow$   
 $I = +\bar{I} \quad a + b$   
 $I = -\bar{I} \quad a + b$

$P = -\bar{P}$  четность  
периметрия  
 $P = \bar{P}$  бозоны

**Законы сохранения**

Характеристика	Взаимодействие			
	сильное	электромагнитное	слабое	
<i>Аддитивные законы сохранения</i>				
Электрический заряд	$Q$	+	+	+
Энергия	$E$	+	+	+
Импульс	$\vec{P}$	+	+	+
Момент импульса	$\vec{J}$	+	+	+
Барионный заряд	$B$	+	+	+
Лептонные заряды	$L_e, L_\mu, L_\tau$	+	+	+
Странность (strangeness)	$S$	+	+	-
Очарование (charm)	$C$	+	+	-
Bottomness	$B$	+	+	-
Topness	$T$	+	+	-
Изоспин	$\vec{I}$	+	-	-
Проекция изоспина	$I_3$	+	+	-
<i>Мультипликативные законы сохранения</i>				
Пространственная четность	$P$	+	+	-
Зарядовая четность	$C$	+	+	-
Комбинированная четность	$CP$	+	+	-
Инвариантность к обращению времени	$T$	+	+	-
СРТ-инвариантность (СРТ-теорема)		+	+	+

**Виды и свойства фундаментальных взаимодействий**

Взаимодействие	Константа взаимодействия	Участвующие частицы	Кванты поля (калибровочные бозоны)	Масса кванта поля, ГэВ	Характерное время взаимодействия, сек	Радиус взаимодействия, см
Сильное	$g_s = 1$	кварки (адроны)	глюон (8 видов)	0	$10^{-21} - 10^{-23}$	$\approx 10^{-13}$
Электромагнитное	$e = 10^{-2}$	заряженные частицы	$\gamma$ -квант	0	$\approx 10^{-18}$	$\infty$
Слабое	$g_w = 10^{-6}$	лептоны и кварки	$W^\pm, Z$	80, 91	$\approx 10^{-10}$	$\approx 10^{-16}$
Гравитационное	$g_g = 10^{-38}$	все частицы	гравитон	0	$\infty$	$\infty$



**Задача №1.** Найти приведенную длину волны (в Фм) протона с кинетической энергией  $T = 1$  ГэВ.

*Решение:*

$$\lambda' \equiv \frac{h}{p} = \frac{hc}{pc} = \frac{hc}{\sqrt{T^2 + 2T} m_p c^2} \approx \frac{0.2 \text{ ГэВ} \cdot \text{Фм}}{\sqrt{(1+2) \text{ ГэВ}^2}} = 0.115 \text{ Фм}$$

Точнее:  $\lambda' = 0.118 \text{ Фм}$

**Задача №2.** Найти максимально возможную длину волны (в Фм) фотона, участвующего в реакции  $\gamma + d \rightarrow p + n$ . Энергия связи дейтрона —  $E = 2.2$  МэВ.

*Решение:*

1.  $d$  — дейтрон, состоящий из 1-го протона и 1-го нейтрона.  $m_d c^2 = (m_p + m_n) c^2 - E$

2.  $|Q| = |(m_p + m_n - m_p - m_n) c^2 - E| = E$ .

3. В ЛСК:

$$E_{\gamma}^{\text{min}} = |Q| \cdot \left( 1 + 0 + \frac{|Q|}{2m_d c^2} \right) \approx |Q| = E$$

4.

$$\lambda = \frac{2\pi hc}{E} = \frac{2\pi \cdot 200 \text{ МэВ} \cdot \text{Фм}}{2.2 \text{ МэВ}} \approx 571 \text{ Фм}$$

**Задача №3.** Найти пороговую энергию протонов (очевидно, в ЛСК, где один из протонов покоится) в реакции  $p + p \rightarrow p + p + \pi^+ + \pi^-$  (в МэВ).

*Решение:*

1.

$$m_{\pi^+} c^2 = m_{\pi^-} c^2 = 140 \text{ МэВ} \Rightarrow |Q| = 2 \cdot m_{\pi} c^2 = 280 \text{ МэВ}$$

2.

$$T^{\text{min}} = |Q| \left( 1 + 1 + \frac{|Q|}{2m_p c^2} \right) = 280 \cdot \left( 2 + \frac{140}{939} \right) \text{ МэВ} = 602 \text{ МэВ}$$

**Задача №4.** Найти энергию столкновения пучка протонов с пучком антипротонов (одинаковой энергии  $E = 1000$  ГэВ) в системе покоя одной из частиц.

*Решение:*

1. Получим расчетную формулу для пересчета энергии пучков из СЦИ в ЛСК. Выражение для релятивистского инварианта в СЦИ имеет вид (вычисление производится в системе единиц  $\hbar = c = 1$ ):

$$I = \left( \sum_{i=1}^n E_i \right)^2 - \left( \sum_{i=1}^n p_i \right)^2 = 4E^2$$



в ЛКК:

$$I = (E' + m)^2 - p'^2 = E'^2 + 2mE' + m^2 - E'^2 + m^2 = 2mE' + 2m^2.$$

Здесь  $p'^2 = E'^2 - m^2$  (из рассмотрения одной частицы). Приравнявая инварианты, получаем:

$$E' = \frac{2E^2}{m} - m \approx \frac{2E^2}{m}$$

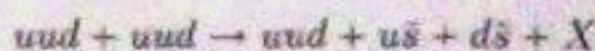
2. Отсюда

$$E' = \frac{2 \cdot 10^6}{0.939} \approx 2.13 \cdot 10^6 \text{ ГэВ}$$

**Задача №5.** Определить неизвестную частицу, образующуюся в реакции сильного взаимодействия  $p + p \rightarrow p + K^+ + K^0 + X$ .

*Решение:*

Запишем данную реакцию по кварковому составу:



Реакция идет за счет сильного взаимодействия, следовательно кварковый состав либо сохраняется, либо изменяется за счет пар  $(q\bar{q})$ . Таким образом, в первом приближении неизвестная частица должна содержать два странных кварка  $s$ . Очевидно, такая структура может реализовываться лишь в барионе  $(qqq)$ . Недостающий третий кварк —  $u$  (Из сравнения кваркового состава правой и левой частей равенства). Итак, кварковый состав неизвестной частицы —  $uss$ , т.е. это, например,  $\Theta^0$ .

**Задача №6.** Определить единственно возможную реакцию из нижеприведенных для свободных частиц:

*Решение — Вариант I:*

1.  $\Sigma^- \rightarrow n + e^- + \bar{\nu}_e$

Реакция идет за счет слабого взаимодействия

2.  $\Sigma^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e$

Реакция не идет, т.к. это полuleптонный процесс, для которого не выполняется соотношение  $\Delta Q = \Delta S$ .

3.  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu$

Реакция не идет, т.к. не сохраняется  $L_e$ .

4.  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma$

Реакция не идет, т.к. не сохраняется  $L_e$  и  $L_\mu$ .

5.  $\Sigma^- \rightarrow \Lambda + \pi^-$

Реакция не идет, т.к. этот процесс запрещен кинематически.

*Решение — Вариант II:*