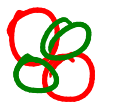


# Глава 20. Ядерная физика и физика элем.

заб.

## 20.1. Состав и характеристики атомного ядра

$P$  и  $N$  —  
— нуклоны

протон  $P$  ←  → нейтрон  $N$   
атомное  
ядро

$$m_p = 1,007276 \text{ а.е.м.} = 1836,15 \text{ м.е.}$$

$$m_p c^2 = 938,28 \text{ МэВ}$$

$$q_p = +e ; S = \frac{1}{2}$$

содерж. н.м.  $M_p = +2,793 \text{ Мэ}$

$$m_n = 1,00866 \text{ а.е.м.} = 1838,68 \text{ м.е.}$$
$$m_n c^2 = 939,55 \text{ МэВ}$$

$$q_n = 0 ; S = \frac{1}{2} ;$$

$$M_n = -1,91 \text{ Мэ} \quad \underline{\vec{L}_{ns} \uparrow \downarrow \vec{M}_{ns}}$$

ядерный магнетон  $\mu_n = \frac{e\hbar}{2m_p} = 5,05 \cdot 10^{-27} \frac{\text{Дж}}{\text{Тл}} \approx \mu_B / 1836$

Нейтрон нестабильен.

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu} ; \quad T_{1/2} = 12 \text{ мин.}$$

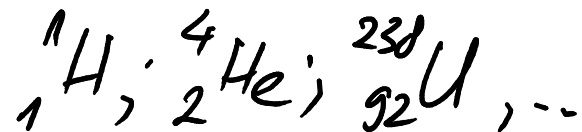
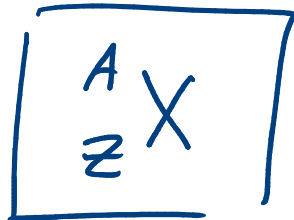
Хар-ки ядра:

зарядовое число  $Z$  = число  $p$  в ядре

массовое число  $A$  = число нуклонов в ядре

$N = A - Z$  — число  $n$  в ядре

Обозн. ядра:



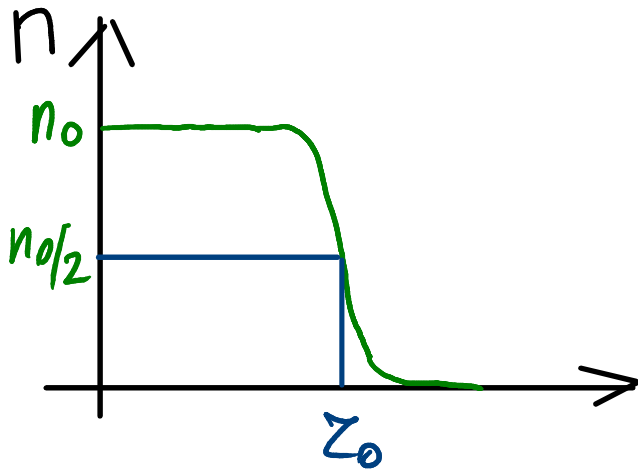
Изотопи.  $Z$  - одинаково

Изотопи.  $N$  - одинаково

Изобари:  $A$  - одинаково

Изомери: все одинаково  
Кроме периода полураспада

Размери ядр.



$n$  - конст-я кука.

$r_0$  - т.т.  $n = \frac{n_0}{2}$  - (огенка) радиус ядра

Из опыта:  $r_0 \approx 1,3 \cdot A^{1/3}$  фм

$1 \text{ фм} = 10^{-15} \text{ м}$   
фемти.

Слим ядра  $I$   
в осн. осс,  $I \leq 9/2$

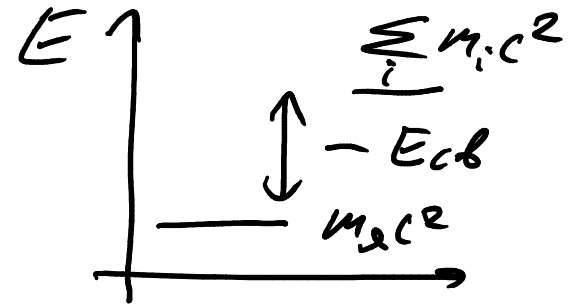
## 20.2. Масса и энтальпия ядра

$$m_{\alpha} \neq \sum_i m_i, \quad m_i - \text{массы нуклонов}.$$

Для разделения ядра надо затратить работу  $A_{\text{разд}}$

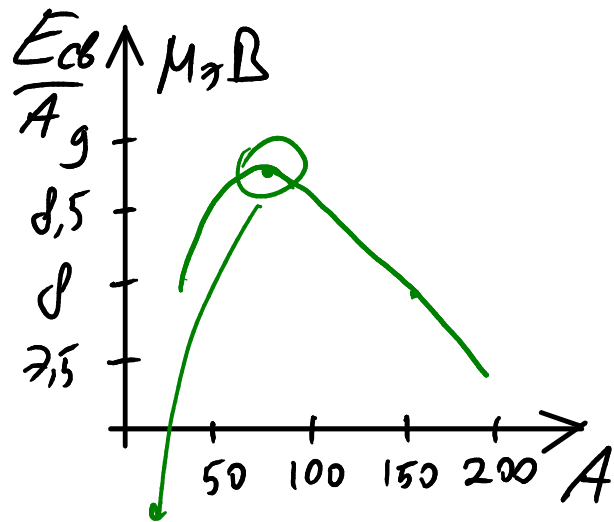
$\Rightarrow \exists E_{\text{св}} = A_{\text{разд}} - \text{энтальпия ядра}.$

$$\underline{E_{\text{св}} = \left( \sum_i m_i - m_{\alpha} \right) c^2}$$



$$E_{cb} = (Z m_p + N m_n - m_a) c^2$$

$$E_{cb} = (\underbrace{Z m_H + N m_n}_{\text{масса ат. я}} - \underbrace{m_a}_{\text{масса атома}}) c^2$$



наибольшая прочность связи  $A \sim \underline{50 \div 60}$ .

Мера прочности связи  $\frac{E_{cb}}{A}$  - удельная э.и. связи

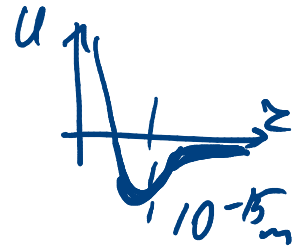
Приблизительно  $\frac{E_{cb}}{A} \approx 8 \text{ МэВ}$

$\Rightarrow$  э.и. связи одн. связи насыщаются -  
 - нуклон в-ет только с озн. числам  
 др. нуклонов  $\Rightarrow$  э.и. связи краткодейств.

## 20.3 Ядерные силы

### Особенности яд. сил

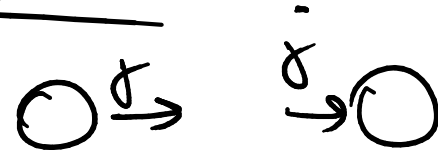
- 1) короткодействие.  $r \approx 10^{-15} \text{ м}$
- 2) Не зависит от эл. заряда
- 3) Не явл. центральными. Зависит от взаимной ориентации спинов нуклонов
- 4) Област. св-ва насыщения



$\nabla$  вз-е — силовое поле. В кв. мех.  $\nabla$  поле  $\vec{F}$  квант вз-е

э/м вз-е — глюоны

э/м вз-е — обмен фотонами (ан.)



Обмен частицами — ост. прик.  $\psi$  бз-я.

1935. Юкава (теор.) бз-е нукл. — обмен  $\pi$ -мезонами.

Соотн. неоп.  $\Delta E \Delta t \sim \hbar$ . За  $\Delta t \approx \frac{\hbar}{\Delta E}$  мож

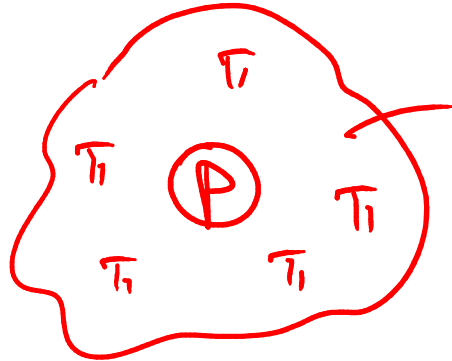
быть откл-е от  $\psi(\vec{r})$  на  $\Delta E$  — их не возм. обнаружить

Время  $\exists$ -я  $\pi$ -мезона:  $\tau_{\pi} = \hbar / m_{\pi} c^2$

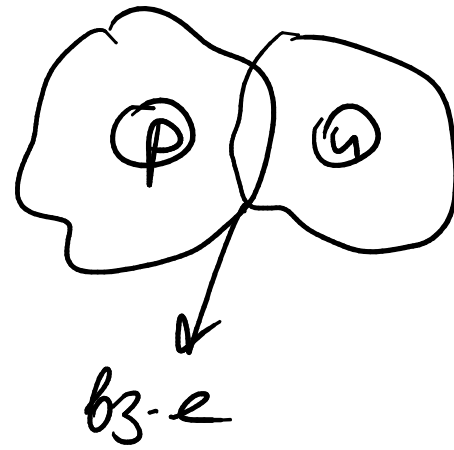
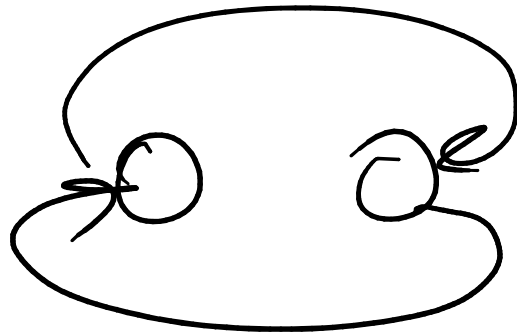
$\Rightarrow$  max  $\rho e$ , на к-ой он живет  $l \approx c \tau_{\pi} = \frac{\hbar}{m_{\pi} c} = \frac{\lambda_{\pi}}{2\pi}$

$\lambda_{\pi}$  — компт. длина боз.

Участии, кот. исп. и полл. с "нарушением" ЗСЭ —  
— виртуальные.



"шуба" из  
 вирт. π-мезонов



вз.е

$\pi^+ \pi^- \pi^0$



## 20.4. Радиоактивность

— самопроизвольный (спонтанный) распад ядер с исп.  
1й или нескольких частиц.

Состав. ядра —  $P/A$ .  $P/A \rightarrow \begin{matrix} \text{есть} \\ \text{иск.} \end{matrix} \left. \vphantom{P/A} \right\} \begin{matrix} \text{свободн.} \\ \text{не ст.} \end{matrix}$ .

$(P/A) \rightarrow \begin{matrix} \alpha\text{-расп.} \\ \beta\text{-расп.} \\ \gamma\text{-расп.} \end{matrix}$

У типа ядра ( $P/A$ ) существует в ед. в.  $\lambda$   
распада.  $\lambda$  зависит ТОЛЬКО от типа ядра,

Изм.-е зусия едър в ед. вр:  $dN = -\lambda dt N$

$$\Rightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda dt \Rightarrow$$

$N = N_0 e^{-\lambda t}$	осн. зак. р/а расн.
--------------------------	------------------------

$\lambda$  - постоянная распада.

Период полураспада  $T_{1/2}$  - время, за кот. распад  
 $1/2$  от нач. кол-ва р/а едвр.

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \Rightarrow \ln 2 = \lambda T_{1/2} \Rightarrow$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

$$N = N_0 2^{-t/T_{1/2}}$$

Активность  $A = \left( \frac{dN}{dt} \right) = \lambda \cdot N - [A] = 1 \frac{\text{расп.}}{\text{с}} = 1 \text{ Бк}$

Внесит.

Сл

Беккерель

Экспозиметр. Доза

Рентген (Р)

$\text{Кг}^2/\text{кг}$

$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Кг}^2}{\text{кг}}$

Полн. Доза

РаД

$\text{Эрел} (\Gamma \text{Р}) =$   
 $= \Delta \cdot t / \text{кг}$

$1 \text{ рад} = \underline{10^{-2} \Gamma \text{Р}}$

Эквив. Доза

Бэр

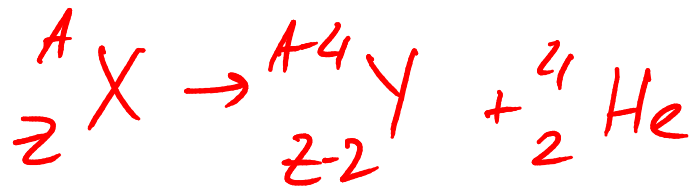
Зуберт (Зб)

$1 \text{ бэр} = \underline{10^{-2} \text{ Зб}}$

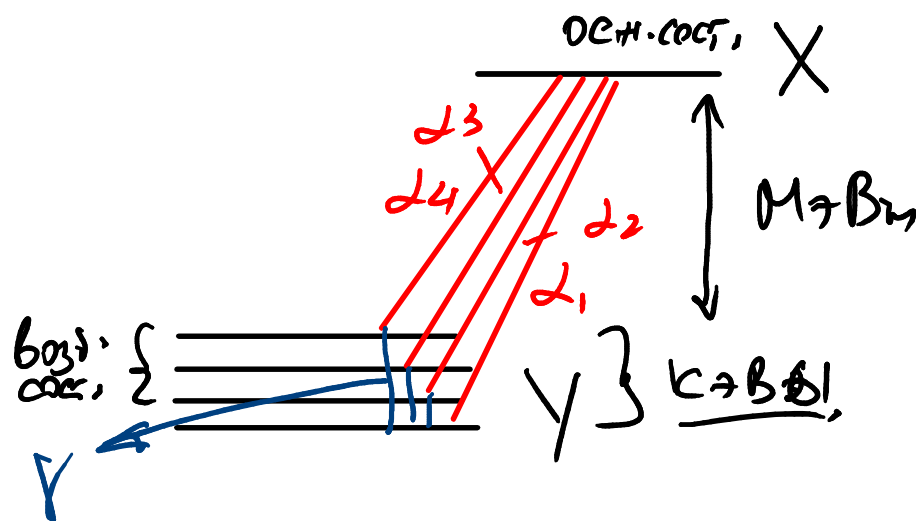
(полн. доза,  
 усредн. по  
 организму)

## 20.5. Основ. типы р/а-сбн

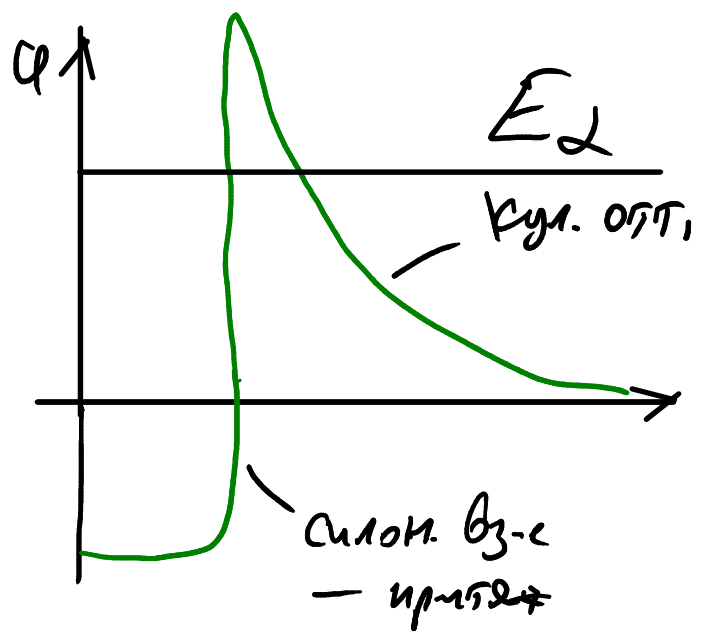
Альфа-распад - самопроизв. исп.  $\alpha$ -частиц ( ${}^4_2\text{He}$ )



⊙ Только для  
Тяж. ядер.



Обычно  $\gamma$  испускается  
затем  $\alpha$ -частицей с  
разницей  $\approx 1$ .



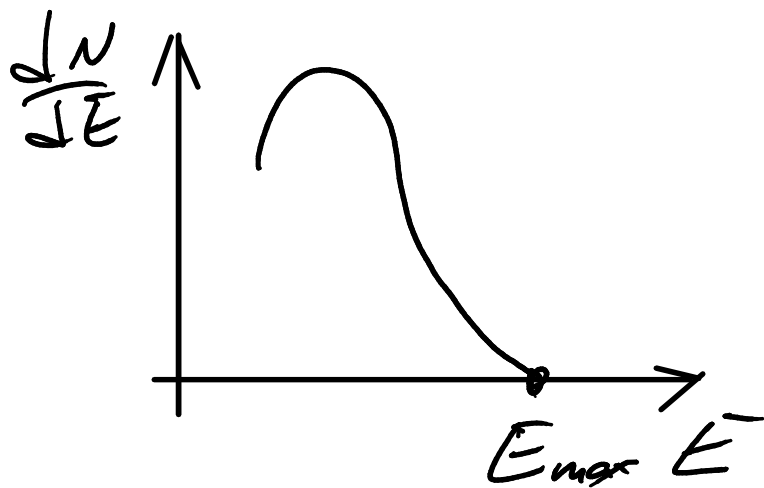
Түмн. Азрзект,

## Бета-распад

1) электронный  $\beta$ -распад.  
для  $Z \rightarrow Z+1$ , исп.  $e^-$

2) позитронный  $\beta$ -распад.  $Z \rightarrow Z-1$ , исп.  $e^+$

3)  $K$ -захват. Ядро захватывает  $e^-$  с  $K$ -оболочки



$E_{\max}$  — соответв. разность  
м/у исп. масса ядра  $\gamma$   
масса ядра  $e^-$

$E < E_{max}$ .  $\frac{2}{3}$  энергии уходит

куда?

1930г. Паули. Э часть "берет"  $\beta$ -нерво

Э. Ферми

$$(q = 0) \quad m \approx 0$$

нейтрно - маломом. нейтрон.

Схемы  $\beta$ -расп.:

$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}$$

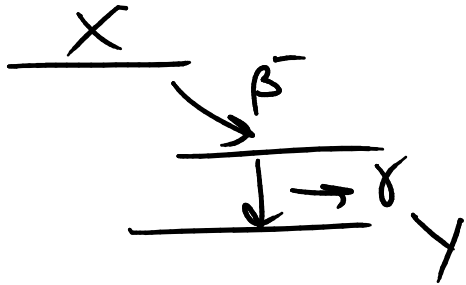
$$p \rightarrow n + e^{+} + \nu$$

$$e^{-} + p \rightarrow n + \nu$$

Лампа-распад

Исп. возд. экран  $\beta/\mu$  чл.

— фотон  $e$   $E \sim 10 \text{ кэВ} \rightarrow \underline{5 \text{ МэВ}}$ .



Возм. поле  $\alpha/\beta$  -распада.



## 20.5. Элем. час.

— общ. название для субатомных частиц, кроме ядер/атомов.

Стабильные элем. час.:  $e, p, n$ ,  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$

Фунд. вз-я	Угтенсивность	Длиа. проу., с	Радиус. захвата, м
Сильное	1	$10^{-23}$	$10^{-15}$
Э/м	$1/137 = 10^{-2}$	$10^{-20}$	$\approx$
Слабое	$10^{-14}$	$10^{-9}$	$10^{-16}$ (?)
грав.	$10^{-39}$	$10^{16}$ ( $10^9$ лет)	$\approx$

Все частицы

Бозоны

$$S = 0, 1, 2, \dots$$

фотоны  $\gamma, \dots$

Фермионы

$$S = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$$

$e^-, p, \dots$

Переносчики вз-л

фотоны (э/м)

W-, Z-бозоны (слабое)

глюоны (сильное)

гравитоны (грав) — не найдены

} обнаружены  
таким образом

Лептоны.  $S = \frac{1}{2}$ . Не участв. в сильных взаим.

$e, \mu, \tau$  и соответ. нейтрино

люди таом

$\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$

Адроны. их  $> 400$  участв. в сильных взаим.

мезоны -  $S = 0, 1, 2, \dots$

барионы -  $S = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$  - нуклоны,  
гипероны,  
резонансы.

Античастицы

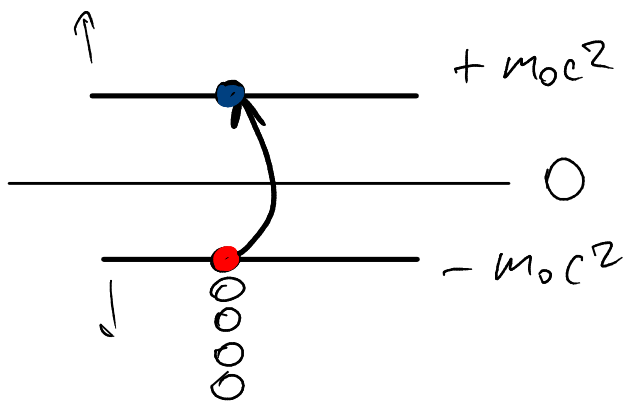
УШ - не два рел. инв.

1928. П. Дирак - рел. волн. ур-е для  $e^-$

Э 2 рел.-е;  $E = \pm \sqrt{c^2 p^2 + m_0^2 c^4}$

$E > 0$  - ОИЧ -

$E < 0$



Дирак - соглас. с  $E < 0$   
заполнены.

По аналогии с тв-теорией  
Дырка - античастица

$m_{e^+} = m_{e^-}$   
все заряды  
противоположны

Анимация:  $\tilde{e}^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$

Рождение фотона в поле электрона:  $\gamma \rightarrow \underline{e^- + \tilde{e}^+}$ .

## 20.8. Заряди элем. частиц

Эл. заряд Q. или б.з.с

Барьонный заряд B =  $\begin{cases} +1 & \text{для барионов} \\ -1 & \text{для антибарионов} \\ 0 & \text{для всех остальных} \end{cases}$

↓  
сохраняется

Лейтэнный заряд



сохр  $\forall$   $\mu$

эл. лейт. заряд  $L_e - \mu e \partial_e = 1$

мюонный лейт. заряд  $L_\mu \mu, \partial_\mu = 1$

таонный лейт. заряд  $L_\tau \tau, \partial_\tau = 1$

Странный  $S$ , Очарование  $C$ , Прелесть  $B$ ,

Истинность  $T$

сохр  $\forall$   $\mu$

кроме слабого вз-е

Таблица элементарных частиц

Частица	Символ*	Масса, МэВ	Заряды					Спин, четность $P$	Изоспин		Странность $S$	Среднее время жизни, $\tau$ , с	Основные схемы распада частицы	
			$Q$	$L_e$	$L_\mu$	$L_\tau$	$B$		$T$	$T_3$				
Фотон	$\gamma$	0	0	0	0	0	0	1	—	—	—	стабилен		
Лептоны	Нейтрино	$\nu_e$ $\bar{\nu}_e$	0	0	+1	0	0	0	$\frac{1}{2}$	—	—	—	стабилен	
		$\nu_\mu$ $\bar{\nu}_\mu$	0	0	0	+1	0	0	$\frac{1}{2}$	—	—	—		
		$\nu_\tau$ $\bar{\nu}_\tau$	0	0	0	0	+1	0	$\frac{1}{2}$	—	—	—		
	Электрон	$e^-$ $e^+$	0,511	-1	+1	0	0	0	$\frac{1}{2}$				стабилен	
	Мюон	$\mu^-$ $\mu^+$	105,66	-1	0	+1	0	0	$\frac{1}{2}$				$2,2 \cdot 10^{-6}$	$e^- \nu_e \bar{\nu}_e$
Тауон	$\tau^-$ $\tau^+$	1782	-1	0	0	+1	0	$\frac{1}{2}$				$3,5 \cdot 10^{-12}$	$\mu^- \nu_\mu \bar{\nu}_\mu, e^- \bar{\nu}_e \nu_e$	
Мезоны	Пи-мезоны	$\pi^+$ $\pi^0$	135,0	0		0	0	0	0	1	0	0	$0,8 \cdot 10^{-16}$	$\gamma\gamma$
		$\pi^-$	139,6	-1		0	0	0	0	1	+1	0	$2,55 \cdot 10^{-8}$	
	Ка-мезоны	$K^+$ $K^-$	493,8	+1		0	0	0	0	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	+1	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$\mu^+ \nu_\mu, \pi^+ \pi^0$
		$K^0$ $\bar{K}^0$	497,8	0		0	0	0	0	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	-1	$5,8 \cdot 10^{-8}$	
	Эта-мезон	$\eta$	549	0		0	0	0	0	0	0	0	$2,4 \cdot 10^{-19}$	$\pi^+ \pi^-$
Фи-мезон	$\phi$	1019	0		0	0	0	1	0	0	0	$\sim 10^{-19}$	$\pi^+ \pi^-$	
Барьоны	Протон	$p$ $\bar{p}$	938,26	+1		0	+1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	0	стабилен	—	
	Нейтрон	$n$ $\bar{n}$	939,55	0		0	+1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	$0,93 \cdot 10^3$	$p e^- \bar{\nu}_e$	
	Лямбда-гиперон	$\Lambda^0$ $\bar{\Lambda}^0$	1115,6	0		0	+1	$\frac{1}{2}$	0	0	-1	$2,5 \cdot 10^{-10}$	$p \pi^-, n \pi^0$	
		Сигма-гипероны	$\Sigma^+$ $\bar{\Sigma}^-$	1189,4	+1		0	+1	$\frac{1}{2}$	1	+1	-1	$0,8 \cdot 10^{-10}$	$p \pi^0, n \pi^+$
			$\Sigma^0$ $\bar{\Sigma}^0$	2292	0		0	+1	$\frac{1}{2}$	1	0	-1	$< 1 \cdot 10^{-14}$	$\Lambda \gamma$
	$\Sigma^-$ $\bar{\Sigma}^+$	1197,4	-1		0	+1	$\frac{1}{2}$	1	-1	-1	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$n \pi^-$		
	Кси-гипероны	$\Xi^0$ $\bar{\Xi}^0$	1314,9	0		0	+1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	-2	$3 \cdot 10^{-10}$	$\Lambda \pi^0$	
		$\Xi^-$ $\bar{\Xi}^-$	1321,3	-1		0	+1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	-2	$1,7 \cdot 10^{-10}$	$\Lambda \pi^-$	
Омега-гиперон	$\Omega^-$ $\bar{\Omega}^+$	1675	-1		0	+1	$\frac{3}{2}$	0	0	-3	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$\Lambda K^-, \Xi^- \pi^0$		

\* Справа указаны символы соответствующих античастиц.

Примечание. Античастицы имеют тождественные с частицей значения