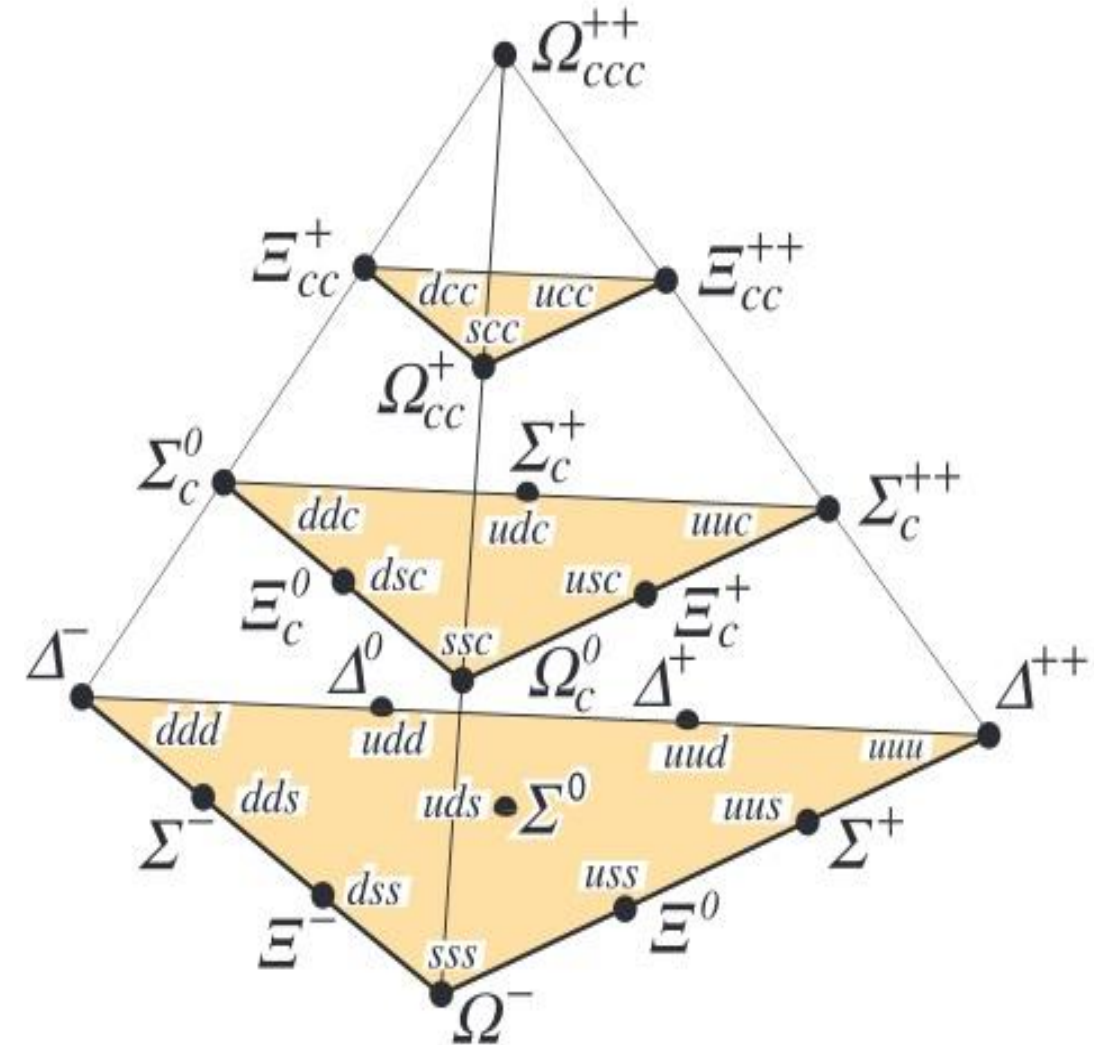
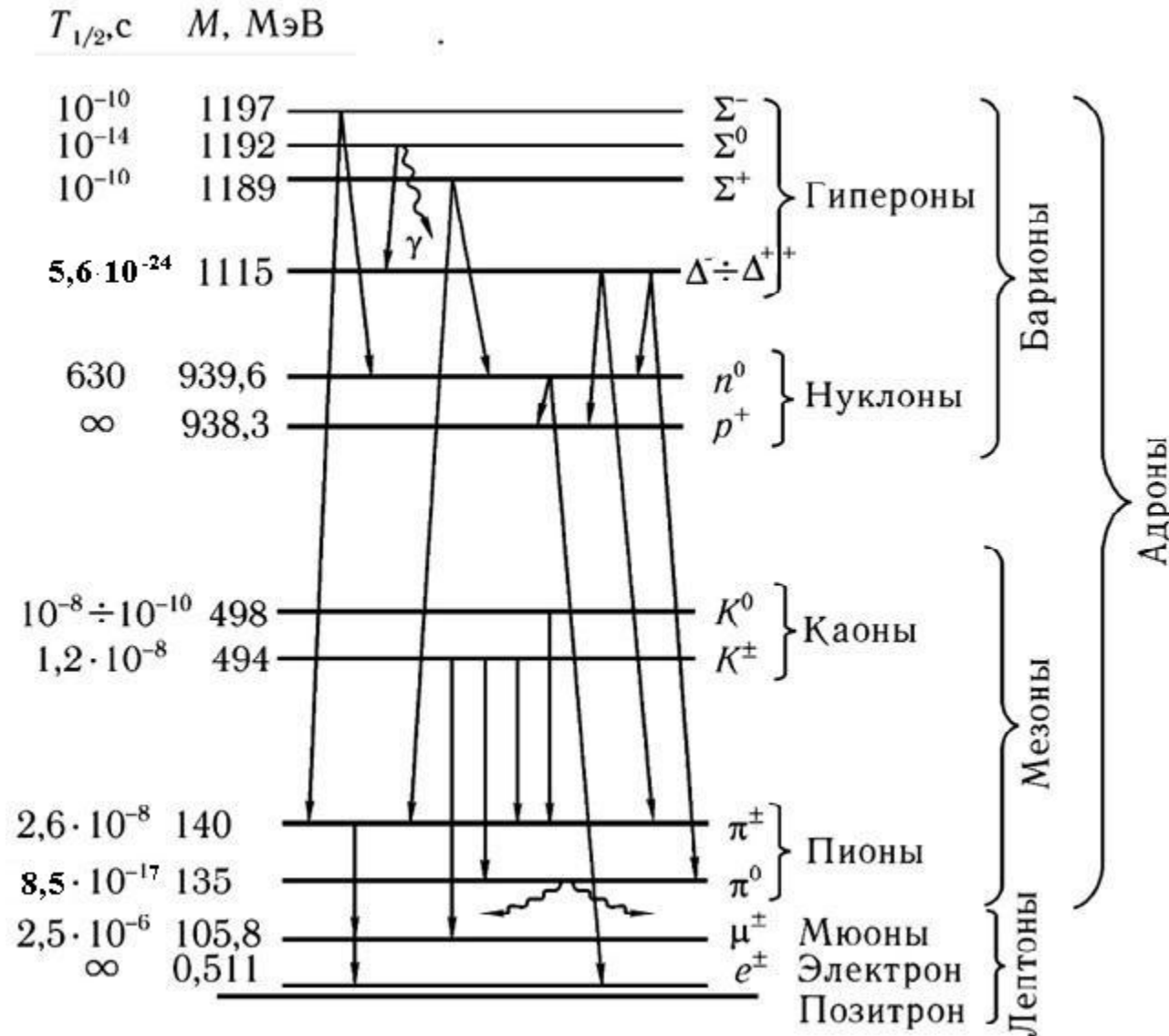


## Семинар №14

# Фундаментальные взаимодействия и частицы. Слабое взаимодействие

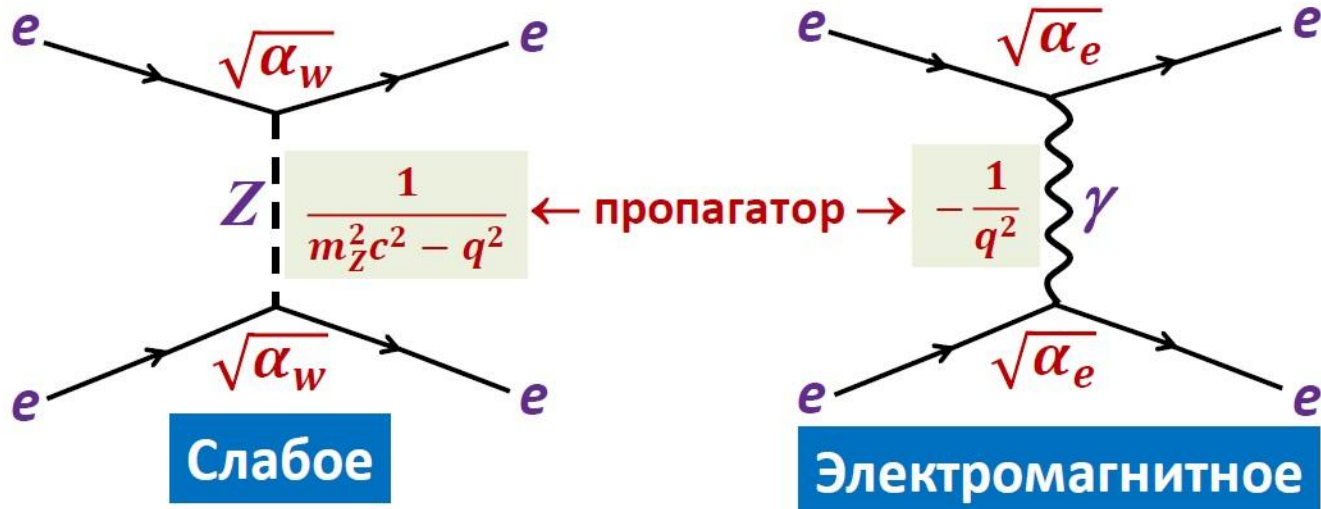
Кубышкин А.В. – осень 2020

# Мультиплеты относительно стабильных частиц. Изотопический спин и симметрия унитарной группы $SU(3)$





# Диаграммы Фейнмана как способ расчета вероятностей



Линиям реальных частиц отвечают их волновые функции

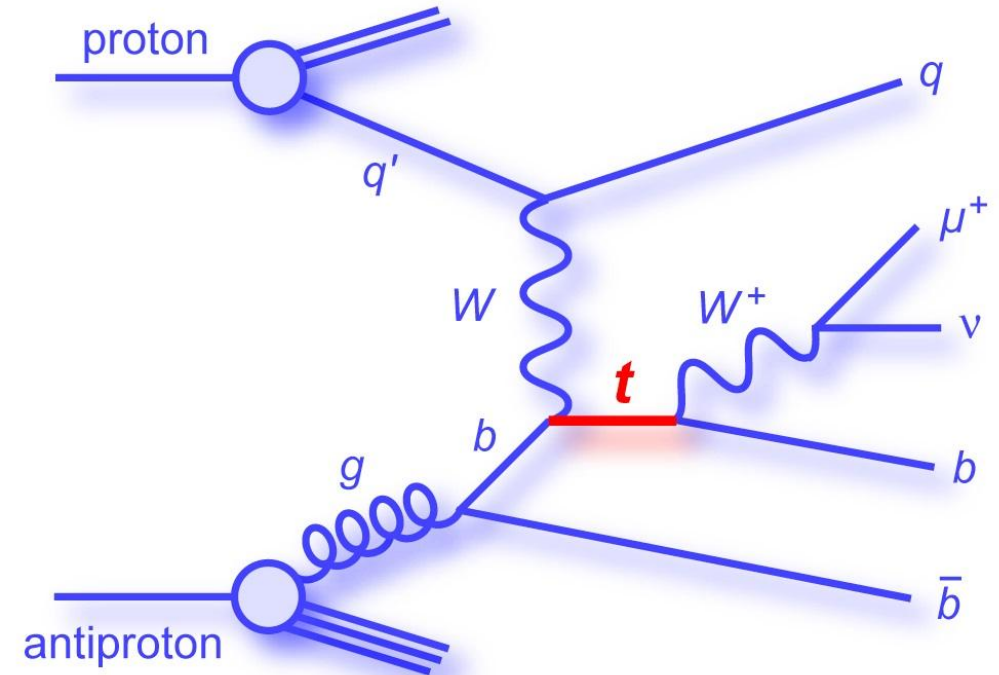
Вершинам (узлам) – константы связи  $\sqrt{\alpha_i}$

Виртуальным частицам – функции их распространения, пропагаторы (*to propagate – распространяться*)

Пропагатор  $\sim \frac{1}{m_i^2 c^2 - q^2}$ , где  $m_i$  – масса переносчика сил, а  $q^2 = q_0^2 - \vec{q}^2$  – квадрат 4-импульса переносчика,  $q_0 = E/c$ .

Амплитуда вероятности двухузловой диаграммы:

$$A_2(i) \sim \sqrt{\alpha_i} \cdot \text{пропагатор} \cdot \sqrt{\alpha_i} = \alpha_i \frac{c^2}{m_i^2 c^4 - q^2 c^2}$$





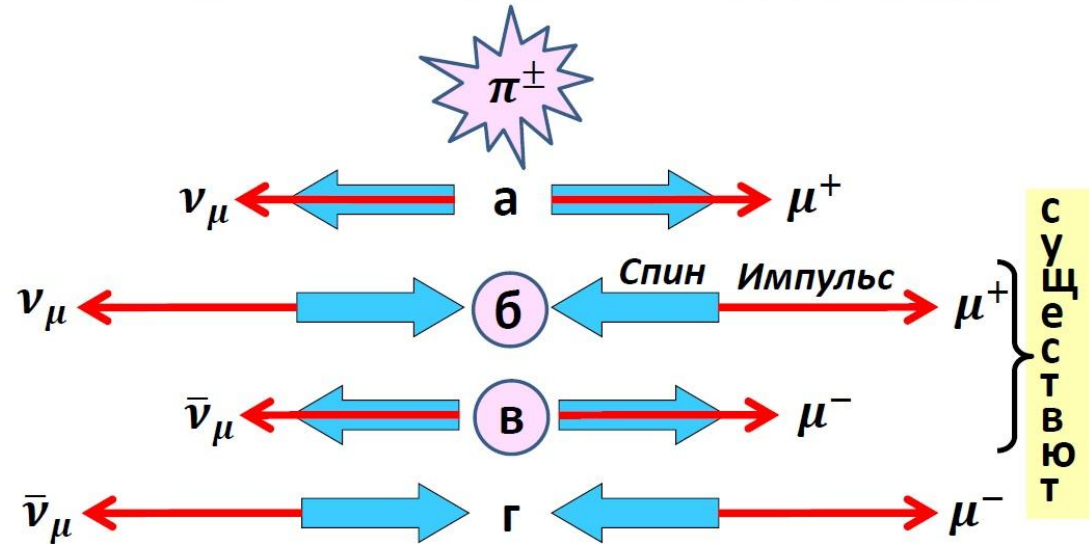
# Нарушения С-, Р- и Т-четностей в слабых взаимодействиях

Совершим зарядовое сопряжение над нейтрино и антинейтрино:

$$\hat{C}v_e = \hat{C}|L_e = +1, h = -1\rangle = |L_e = -1, h = -1\rangle$$

$$\hat{C}\bar{v}_e = \hat{C}|L_e = -1, h = +1\rangle = |L_e = +1, h = +1\rangle$$

Итак, получаем несуществующие объекты. Таким образом, в слабых взаимодействиях нарушаются одновременно **Р**- и **С**-инвариантность. **С**-инвариантность имеет место в сильных и электромагнитных взаимодействиях (уравнения Максвелла не меняются при замене знаков зарядов).



В природе реализуются лишь варианты распада **б** и **в**

## Нарушение **СР**-инвариантности в распадах $K^0$

Электрически нейтральный каон  $K^0$  проявляет себя либо в виде «долгоживущей» частицы  $K_L^0$  ( $5,2 \cdot 10^{-8}$  сек), либо в виде «короткоживущей» частицы  $K_S^0$  ( $0,9 \cdot 10^{-10}$  сек). Кронин и Фитч в 1964 г. обнаружили, что  $K_L^0$  с вероятностью  $\approx 10^{-3}$  испытывает **СР**-запрещённые распады:

$$K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- (\approx 2 \cdot 10^{-3}),$$

$$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 (\approx 9 \cdot 10^{-4}).$$

Кроме того, обнаружено, что в **СР**-сопряжённых распадах

$$K_L^0 \rightarrow \pi^- e^+ \nu_e \leftarrow \text{СР-преобразование}$$

$$K_L^0 \rightarrow \pi^+ e^- \bar{\nu}_e$$

первый несколько (на 0,3%) вероятнее. При **СР**-инвариантности они должны быть равновероятны.  $K_L^0$  – истинно нейтральная частица и при **СР**-инвариантности должно быть:

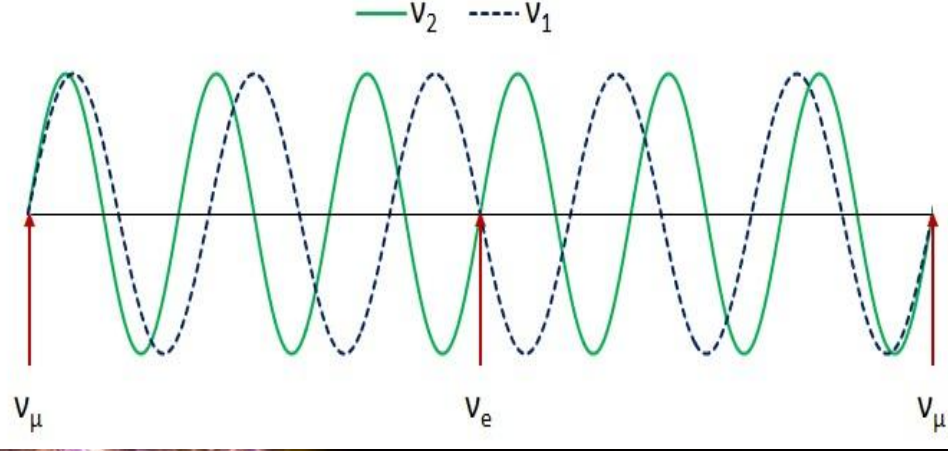
$$\pi^+ e^- \bar{\nu}_e \xleftarrow{\text{вероятность 50\%}} K_L^0 \xrightarrow{\text{вероятность 50\%}} \pi^- e^+ \nu_e$$

Итак, небольшое нарушение **СР**-инвариантности в распадах нейтральных каонов свидетельствует о нарушении **Т**-инвариантности в слабых процессах.

В 1964 г. было обнаружено нарушение **СР**-инвариантности в распадах нейтральных каонов (Кронин и Фитч – Принстон, США). В 2001-2004 гг. нарушение **СР**-инвариантности обнаружено и в процессах с участием  $B^0$  и  $\bar{B}^0$ -мезонов. В 1998 г. нарушение **Т**-симметрии в процессах с нейтральными каонами было установлено в прямых экспериментах (не как неизбежное следствие нарушения **СР**-инвариантности).



# Осцилляции нейтрино – выход за рамки Стандартной Модели?



3 угла смешивания ( $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ )  
и 1 фаза CP нарушения ( $\delta$ )

Солнечные нейтрино  
 $\Delta m_{21}^2 (5.4 \times 10^{-5} \div 9.5 \times 10^{-5}) \text{ eV}^2$   
 $\sin^2 2\theta_{12} (0.71 \div 0.95)$

$$U = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} e^{i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} e^{-i\delta} & 0 & c_{13} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$c_{ij} = \cos \theta_{ij}$   
 $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$

Атмосферные нейтрино  
 $\Delta m_{32}^2 (1.3 \times 10^{-3} \div 3.0 \times 10^{-3}) \text{ eV}^2$   
 $\sin^2 2\theta_{23} \gtrsim 0.9$

атмосферные

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

CP фаза

солнечные

$$U = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} e^{i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} e^{-i\delta} & 0 & c_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Где  $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ , а  $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$

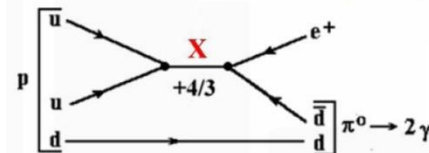


# Некоторые итоги и нерешенные проблемы

Характеристика	Взаимодействие		
	Сильное	Электромагнитное	Слабое
<b>Аддитивные законы сохранения</b>			
Электрический заряд, Q	+	+	+
Энергия, E	+	+	+
Импульс, p	+	+	+
Момент количества движения, J	+	+	+
Барионный заряд, B	+	+	+
Лептонные заряды $L_e, L_\mu, L_\tau$	+	+	+
Странность, s	+	+	—
Charm, c	+	+	—
Bottom, b	+	+	—
Top, t	+	+	—
Изоспин, I	+	—	—
Проекция изоспина, $I_3$	+	+	—
<b>Мультипликативные законы сохранения</b>			
Пространственная четность, P	+	+	—
Зарядовая четность, C	+	+	—
Временная четность, T	+	+	—
Комбинированная четность, CP	+	+	—
CPT-четность	+	+	+

1. Почему существуют три поколения фундаментальных частиц, состоящих из пары кварков и лептонов?
2. Существуют ли четвертое, пятое, ... поколения фундаментальных частиц?
3. Почему существуют кварки и лептоны, и чем вызвано различие между ними?
4. Почему фундаментальными частицами вещества являются фермионы, в то время как фундаментальными переносчиками взаимодействия — бозоны?
5. Почему разные фундаментальные частицы имеют разные массы?
6. Живем ли мы в четырехмерном пространстве-времени, или оно имеет большее число измерений?
7. Существуют ли кванты пространства и времени?
8. ???

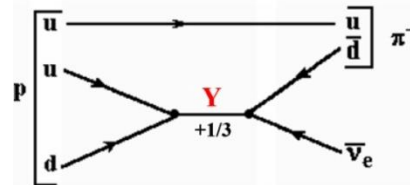
## Распад протона



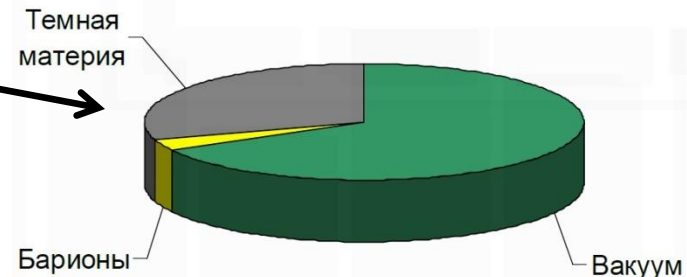
$$p \rightarrow e^+ + \pi^0$$

$$\downarrow$$

$$2\gamma$$



$$p \rightarrow \bar{\nu}_e + \pi^+$$



БАРИОНЫ	0.02-0.05
в том числе, ЗВЁЗДЫ:	0.002-0.003
ФОТОНЫ	$4.9 \cdot 10^{-5}$
НЕЙТРИНО	$3.3 \cdot 10^{-5}$
ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ	0.2-0.4
ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ (ВАКУУМ)	0.6-0.8
ПОЛНАЯ ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВА-ЭНЕРГИИ	$1.02 \pm 0.02$