

**СЛАБЫЕ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
ЧАСТИЦ**

# Как устроен Мир

## ФЕРМИОНЫ

Спин  $J = 1/2$

Лептоны (спин = 1/2)				Кварки (спин = 1/2)			
Аромат		Масса, ГэВ/с <sup>2</sup>		Аромат		Масса, ГэВ/с <sup>2</sup>	Электрический заряд
$\nu_e$	электронное нейтрино	$< 1 \cdot 10^{-8}$	1 поколение	$u$	up	0,003	2/3
$e$	электрон	0,0005111		$d$	down	0,006	-1/3
$\nu_\mu$	мюонное нейтрино	$< 0,0002$	2 поколение	$c$	charm	1,3	2/3
$\mu$	мюон	0,106		$s$	strange	0,1	-1/3
$\nu_\tau$	тау-нейтрино	$< 0,02$	3 поколение	$t$	top	175	2/3
$\tau$	тау	1,7771		$b$	bottom	4,3	-1/3

### Стабильные частицы

$e^-$  — электрон,  $e^+$  — позитрон

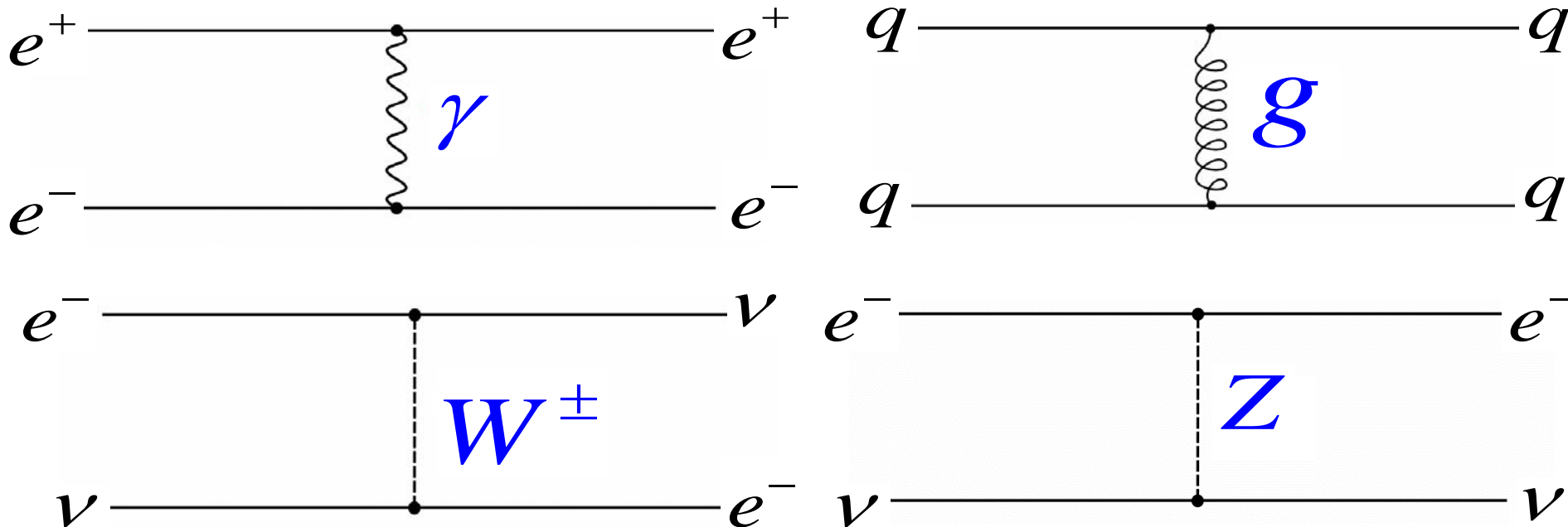
$p$  — протон,  $\bar{p}$  — антипротон

?  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, \tilde{\nu}_e, \tilde{\nu}_\mu, \tilde{\nu}_\tau$

# Взаимодействия

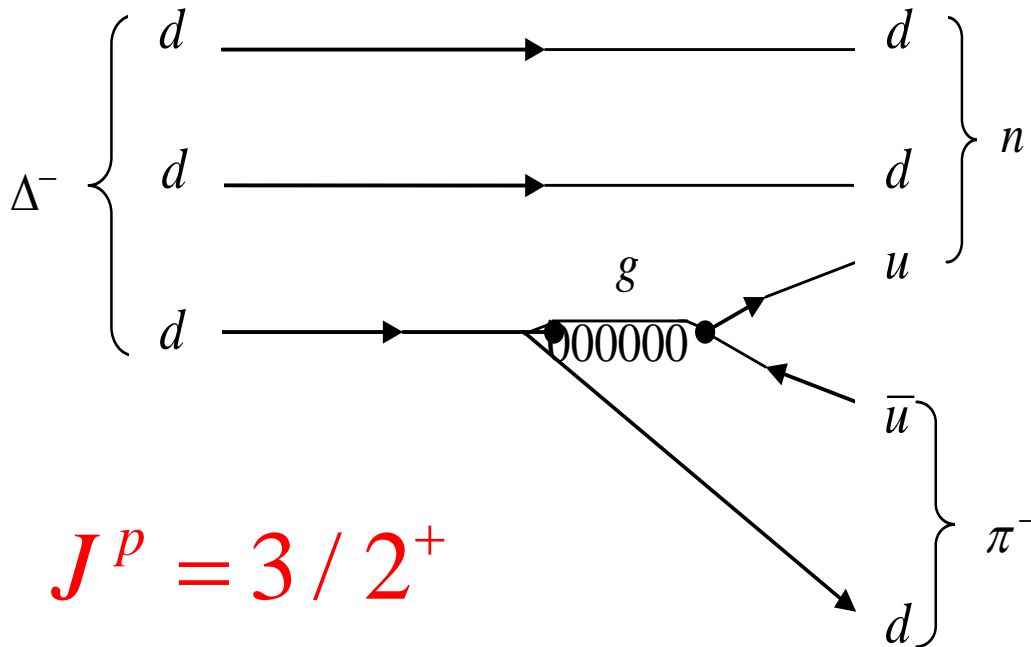
Спин  $J=1$

Взаимодействие	На какие частицы действует	Калибровочные бозоны	Радиус действия	Константа взаимодействия
Сильное	Все цветные частицы	8 глюонов, безмассовые.	1 фм	1
Электромагнитное	Все электрически заряженные частицы	Фотон, безмассовый.	$\infty$	1/137
Слабое	Кварки, лептоны, электрослабые калибровочные бозоны	$W^+$ , $W^-$ , $Z$ , $m(W^\pm) = 80$ ГэВ, $m(Z) = 91$ ГэВ.	$10^{-2}$ фм	$\sim 1/30$
Гравитационное	Все массивные частицы	Гравитон, спин $J = 2$ , безмассовый	$\infty$	$10^{-38}$

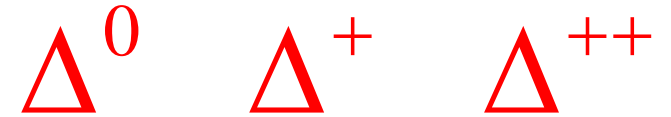


# Сильные распады адронов

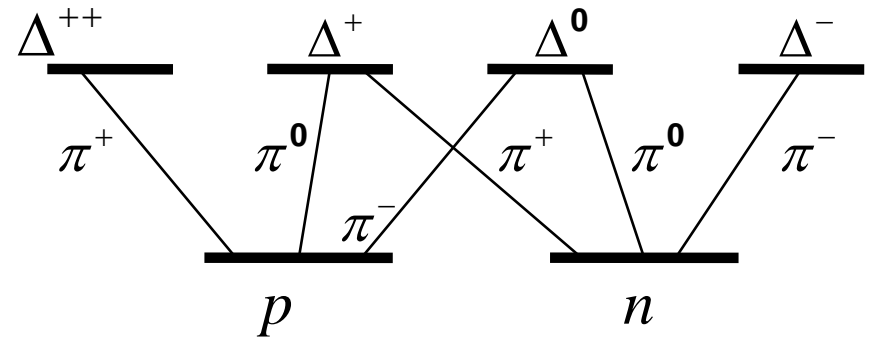
Все адроны за исключением протона являются *нестабильными частицами* и характеризуются способом распада и средним временем жизни  $\tau$ . Определяющим для скорости распада является фундаментальное взаимодействие, ответственное за распад адрона. Быстрее всех – за характерное время  $\approx 10^{-23}$  с – происходят распады за счёт сильного взаимодействия.



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

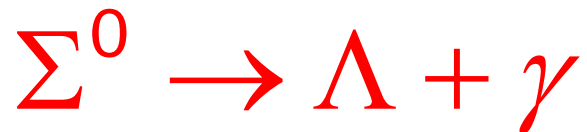


$$M(\Delta) = 1232 \text{ МэВ}$$



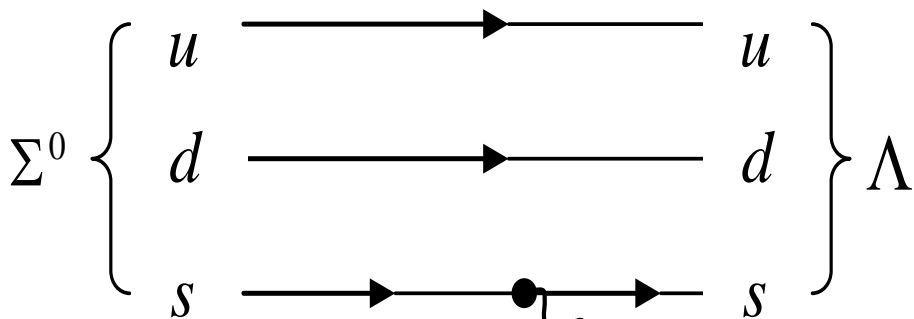
# Электромагнитные и слабые распады адронов

Следующими по скорости являются распады за счёт электромагнитного взаимодействия. Обычно это время больше  $10^{-19}$  с.



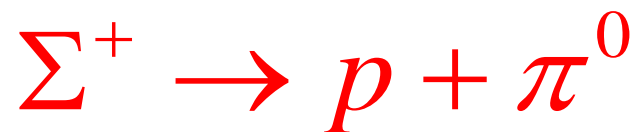
электромагнитный распад

$$\tau = 7,4 \cdot 10^{-20} \text{ с}$$



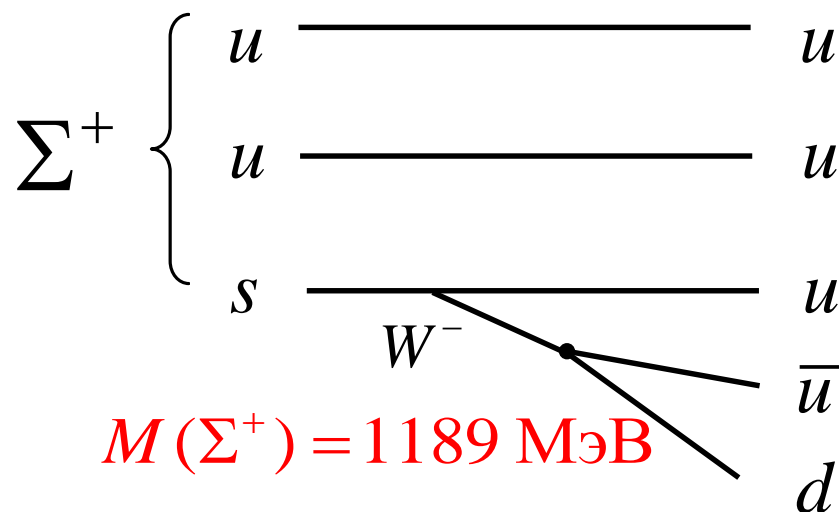
$$M(\Sigma^0) = 1193 \text{ МэВ}$$

$$M(\Lambda) = 1116 \text{ МэВ}$$



слабый распад

$$\tau = 0,8 \cdot 10^{-10} \text{ с}$$



$$M(\Sigma^+) = 1189 \text{ МэВ}$$

$$M(p) = 938,3 \text{ МэВ}$$

$$M(\pi^0) = 135 \text{ МэВ}$$

# $W^+$ , $W^-$ , $Z$ - бозоны

Переносчиками слабого взаимодействия являются  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$  бозоны которые называют промежуточными бозонами.

Бозоны  $W$  и  $Z$  были предсказаны теоретически задолго до их экспериментального обнаружения как «промежуточные» частицы, переносящие слабое взаимодействие. Слабое взаимодействие, также как и электромагнитное, передается частицами со спином  $J = 1$ . Однако, в отличие от переносчика электромагнитного взаимодействия — фотона,  $W^+$ ,  $W^-$  бозоны являются заряженными частицами.

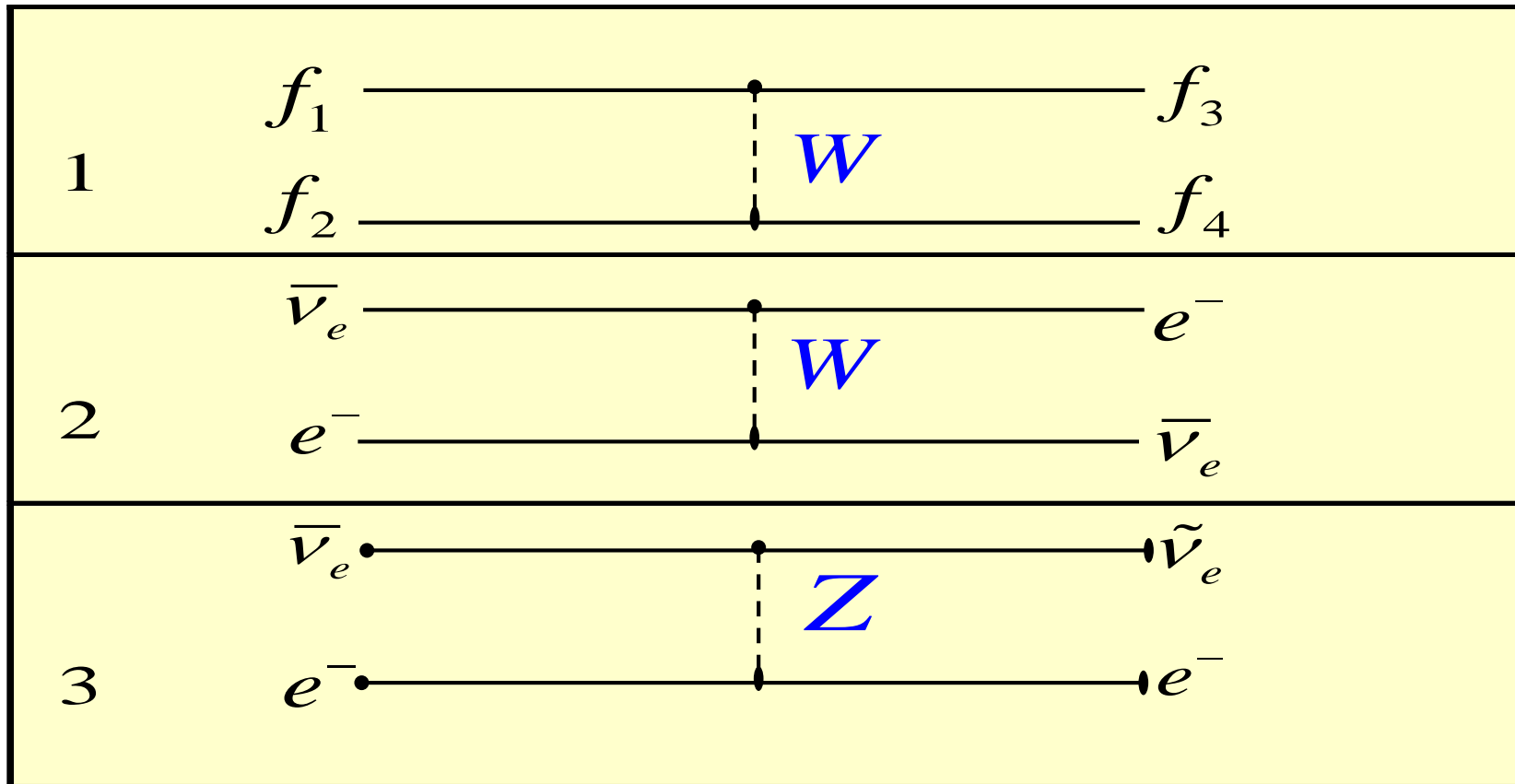
$Z$ -бозон, также как и фотон, не имеет электрического заряда.

# $W^+$ , $W^-$ , $Z$ - бозоны

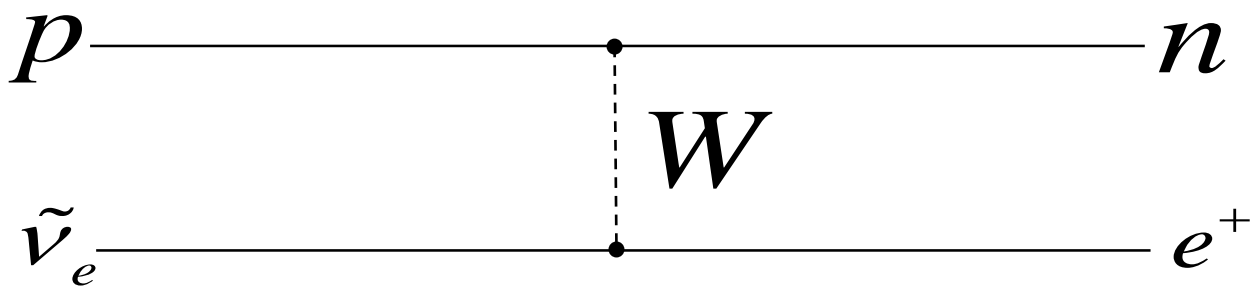
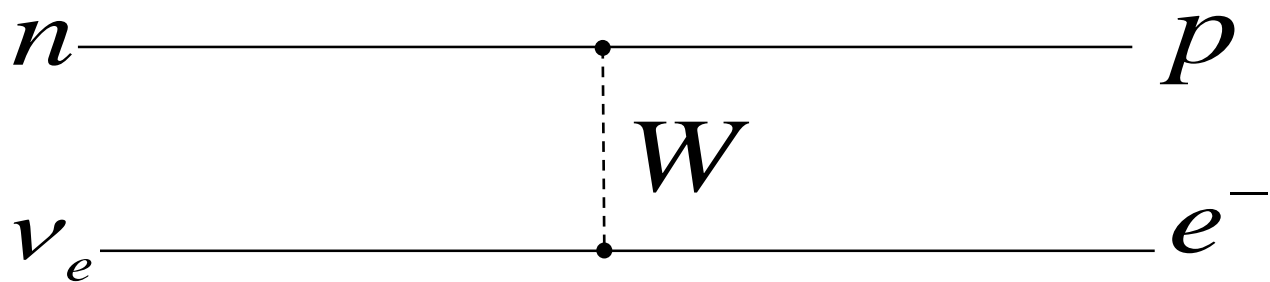
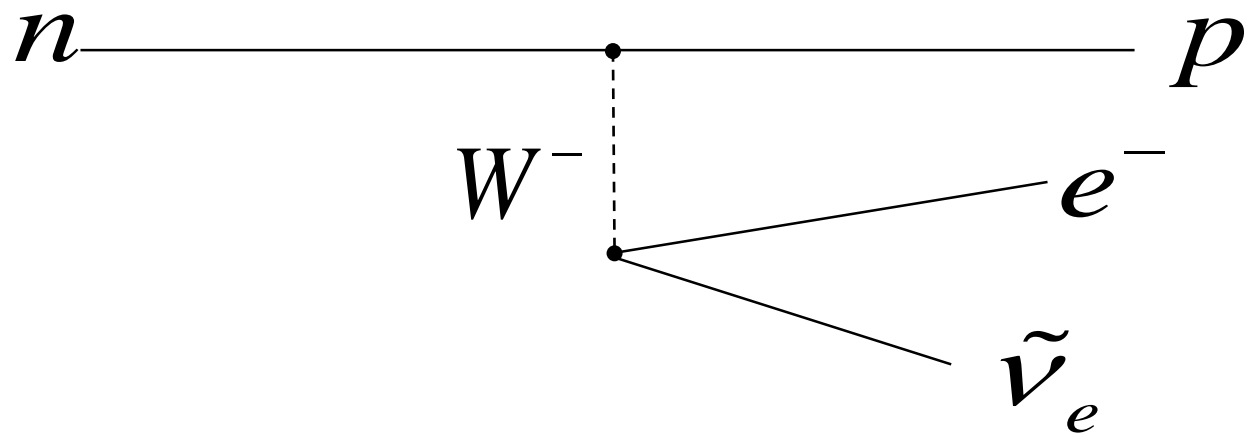
Диаграмма 1 описывает слабые взаимодействия фермионов (они обозначены  $f_{1,2,3,4}$ ) посредством обмена заряженным промежуточным бозоном  $W$ .

Диаграмма 2 описывает рассеяние электронного антинейтрино на электроне.

Возможны слабые процессы, в которых происходит обмен нейтральным  $Z$ -бозоном. В этом случае электрические заряды взаимодействующих лептонов не изменяются (диаграмма 3).



# Распад нейтрона





# Образование W и Z бозонов

W- и Z-бозоны рождались в  $p\bar{p}$ -столкновениях:

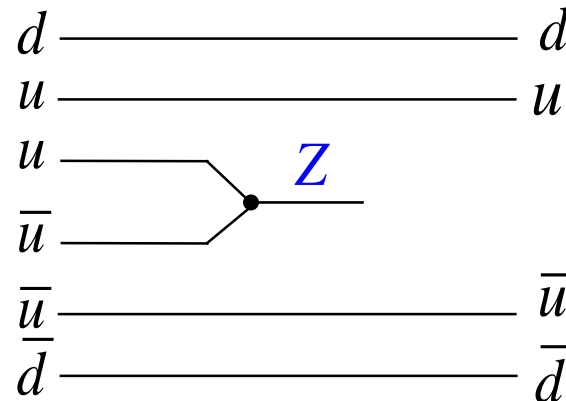
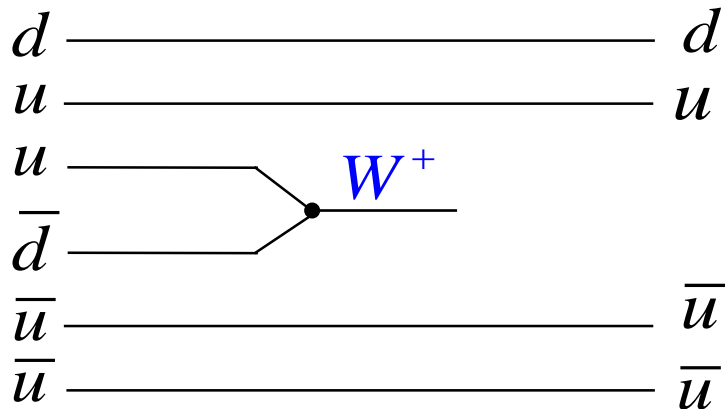
$$p + \bar{p} \rightarrow W^{\pm} + X \quad \text{и} \quad p + \bar{p} \rightarrow Z + X$$

X – совокупность других частиц, рождающихся при  $p\bar{p}$ -взаимодействии.

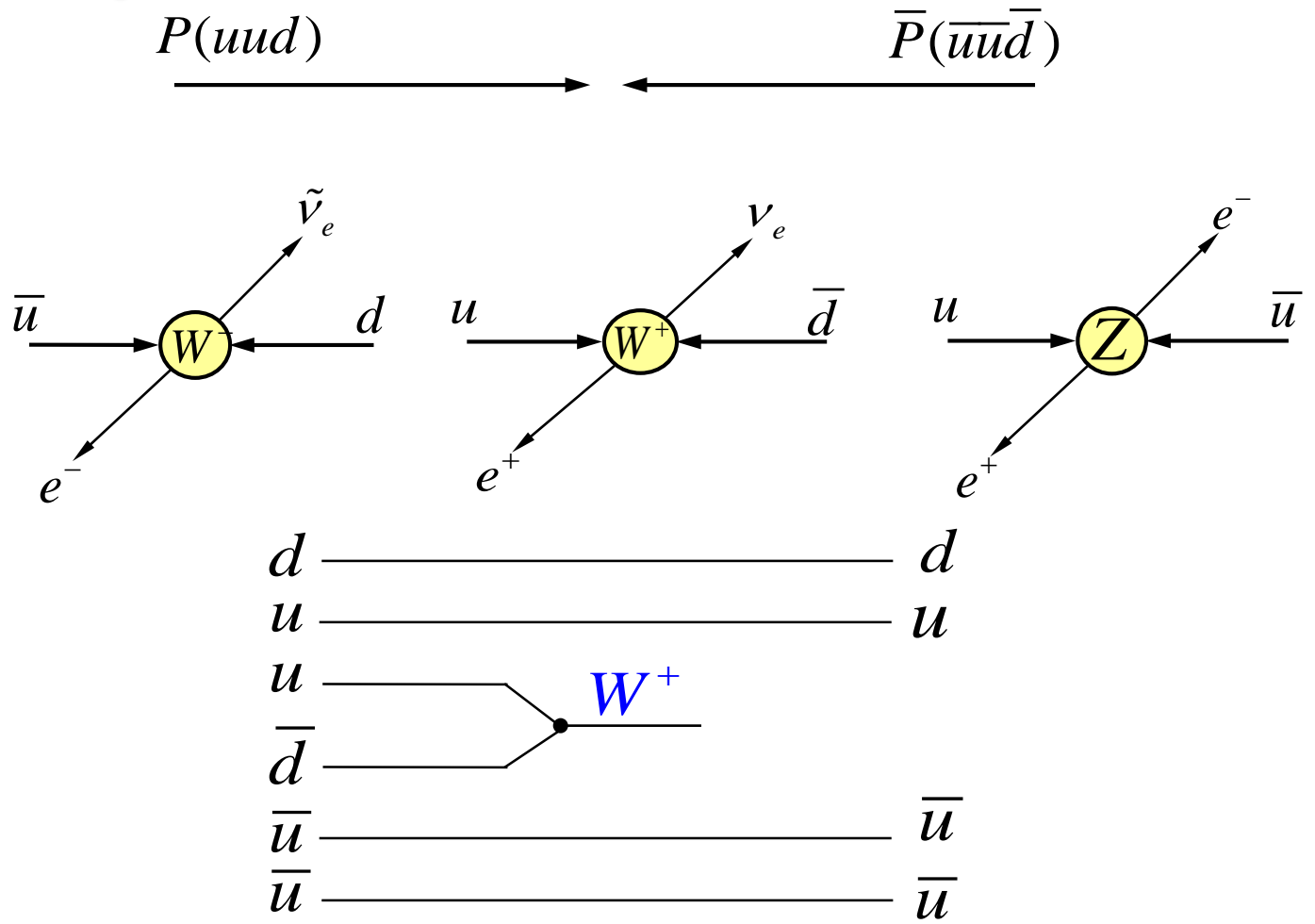
Протон и антипротон состоят соответственно из трёх кварков ( $p=uud$ ) и трёх антикварков ( $\bar{p}=\bar{u}\bar{u}\bar{d}$ ). Промежуточные бозоны рождаются в кварк-антикварковом взаимодействии

$$u + \bar{d} \rightarrow W^{+}; \quad \bar{u} + d \rightarrow W^{-}; \quad u + \bar{u} \rightarrow Z; \quad d + \bar{d} \rightarrow Z$$

Оставшиеся два кварка протона и два антикварка антипротона при каждом  $p\bar{p}$ -столкновении с рождением промежуточного бозона и продолжают своё движение в направлении движения первичных  $p\bar{p}$ -пучков, формируя струи адронов и антиадронов.



# Регистрация Z и W± бозонов



## Нобелевская премия по физике

1984 г. – К. Руббиа, С. Ван дер Меер.

За решающий вклад в большой проект, который привел к открытию полевых частиц W и Z, переносчиков слабого взаимодействия

# Регистрация $W^\pm$ и $Z$ бозонов

Имеющие почти одинаковые массы и скорости  $\bar{u}$  и  $d$ -кварки испытывают лобовое столкновение.  $W^-$ -бозон рождается в состоянии покоя с  $m_W c^2 \approx 80$  ГэВ.

$W^-$ -бозон распадается на электрон и электронное антинейтрино. Они летят в поперечном направлении с одинаковыми импульсами и практически одинаковыми энергиями  $E(e) \approx$

$E(\bar{\nu}_e) \approx \frac{m_W c^2}{2} \approx 40$  ГэВ. Никаких других частиц, летящих в поперечном направлении, при

таком распаде  $W^-$ -бозона не должно быть. Детектирующая установка должна зарегистрировать электрон с энергией 40 ГэВ, летящий в поперечном направлении. Антинейтрино не регистрируется детектором.

Доказательством распада  $W^-$ -бозона является событие с одним электроном, летящим с энергией 40 ГэВ в поперечном направлении и с недостающим поперечным импульсом

$p_\perp = \frac{E(\bar{\nu}_e)}{c} \approx 40$  ГэВ/с в противоположном относительно электрона направлении. Никакой

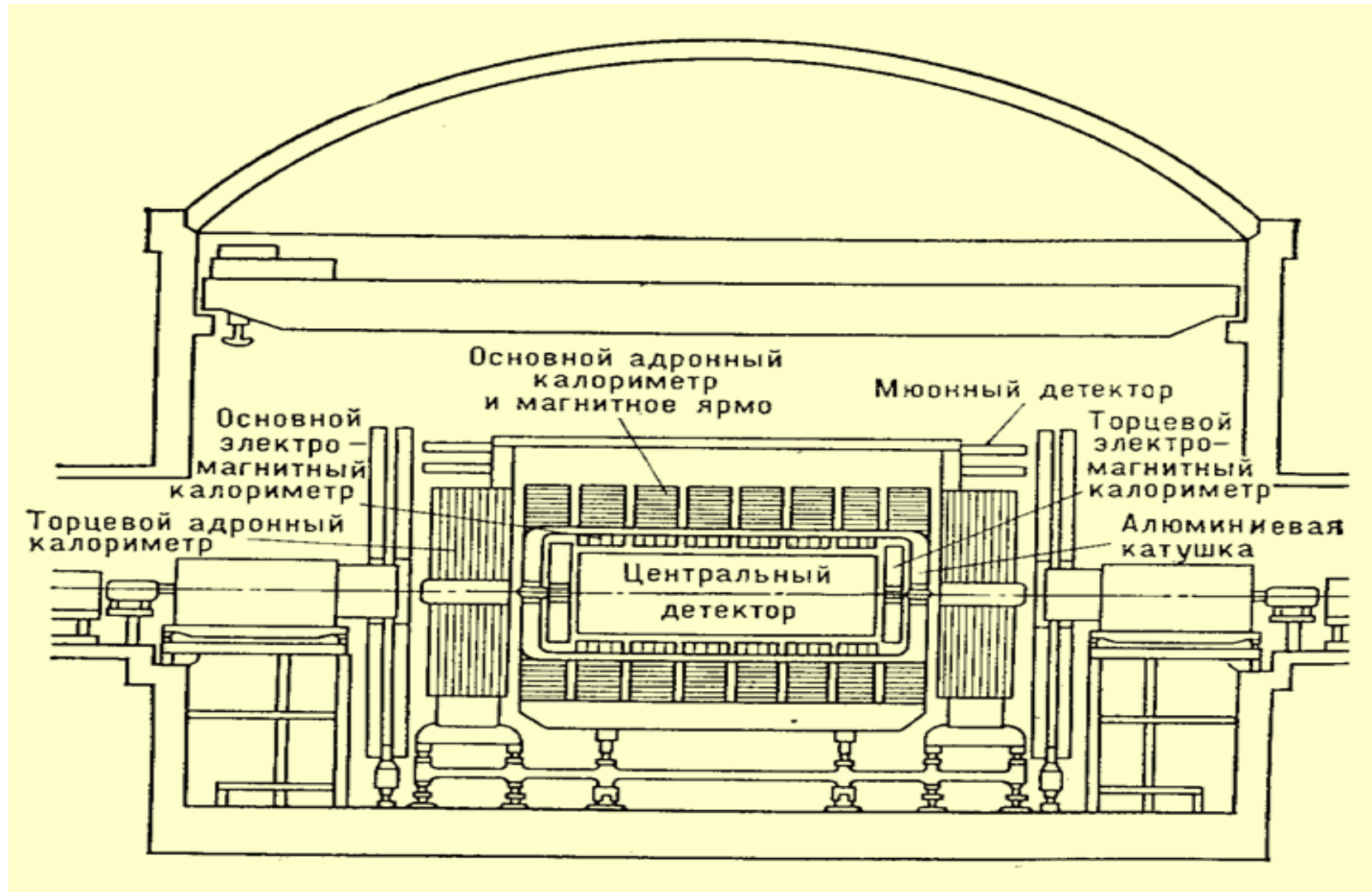
другой процесс, кроме распада  $W^-$ -бозона, не может оставить такой след в экспериментальной установке.

Для идентификации  $Z$ -бозона установка должна зарегистрировать электрон и позитрон, летящие в противоположные стороны в поперечном направлении с одинаковыми

энергиями  $E(e^+) \approx E(e^-) \approx \frac{m_Z c^2}{2} \approx 45$  ГэВ. Никаких других частиц не должно быть.

1982 г.

# Установка UA1



Пучки протонов и антипротонов влетают в детектор с диаметрально противоположных сторон (справа и слева) и, двигаясь навстречу вдоль оси вакуумной трубы, сталкиваются в середине центрального детектора

$$E_p = E_{\bar{p}} = 270 \text{ ГэВ} \quad \sigma(W^\pm) = 10^{-33} \text{ см}^2 \quad 10^9 \text{ } p\bar{p} \text{ столкновений} \rightarrow 6W^\pm$$

# W бозон

Заряд

$$Q = \pm 1e$$

Спин

$$J = 1$$

Масса

$$m = 80.419 \pm 0.056 \text{ ГэВ}$$

$$m_{W^+} - m_{W^-} = 0.2 \pm 0.6 \text{ ГэВ}$$

$$m_Z - m_W = 10.76 \pm 0.05 \text{ ГэВ}$$

$$\Gamma = 2.4952 \pm 0.0023 \text{ ГэВ}$$

$$\langle N \rangle = 19.3 \pm 0.4$$

Полная ширина

Среднее число заряженных  
частиц

## Каналы распада

$$W^+ \rightarrow e^+ \nu_e \quad (10.66 \pm 0.20)\%$$

$$W^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \quad (10.49 \pm 0.29)\%$$

$$W^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau \quad (10.4 \pm 0.4)\%$$

$$W^+ \rightarrow \text{адроны} \quad (68.5 \pm 0.6)\%$$

# Z бозон

Заряд

$$Q = 0$$

Спин

$$J = 1$$

Масса

$$m = 91.1876 \pm 0.0021 \text{ ГэВ}$$

Полная ширина

$$\Gamma = 2.4952 \pm 0.0023 \text{ ГэВ}$$

$$\Gamma(\text{адроны}) = 1.7444 \pm 0.002 \text{ ГэВ}$$

$$\Gamma(e^+e^-) = 84.00057 \text{ МэВ}$$

$$\frac{\Gamma(\mu^+\mu^-)}{\Gamma(e^+e^-)} = 0.9999 \pm 0.0032$$

$$\frac{\Gamma(\tau^+\tau^-)}{\Gamma(e^+e^-)} = 1.0012 \pm 0.0036$$

$$\Gamma(\text{inv}) = 499.0 \pm 1.5 \text{ МэВ}$$

$$\langle N \rangle = 21.07 \pm 0.11$$

Среднее число заряженных частиц

Каналы распада

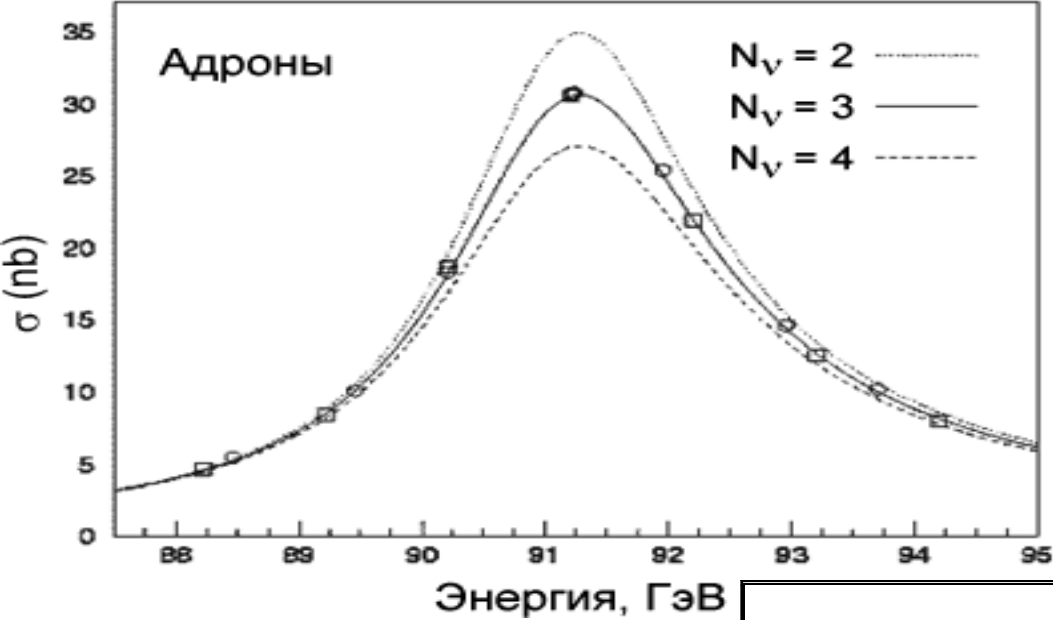
$$Z \rightarrow e^+e^- \quad (3.367 \pm 0.005)\%$$

$$Z \rightarrow \mu^+\mu^- \quad (3.367 \pm 0.008)\%$$

$$Z \rightarrow \tau^+\tau^- \quad (3.371 \pm 0.009)\%$$

$$Z \rightarrow \text{inv} \quad (20.02 \pm 0.006)\%$$

$$Z \rightarrow \text{адроны} \quad (69.84 \pm 0.07)\%$$

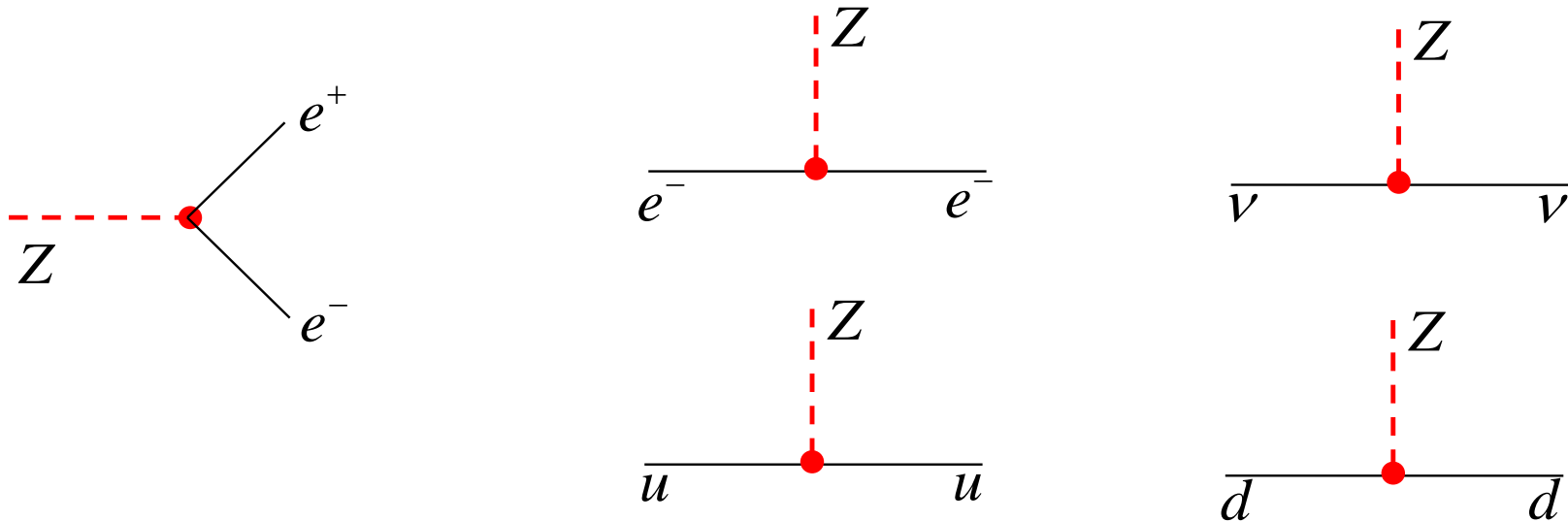


# Z - бозон

Резонансная кривая распада Z-бозона с образованием адронов показывает что число поколений кварков и лептонов  $N = 3$ .

Характеристика	Эксперимент		Стандартная Модель
$m_Z c^2$ , ГэВ	91.1876±0.0021		91.1874±0.0021
$\Gamma_Z$ , ГэВ	2.4952±0.0023		2.4972±0.0012
$\Gamma_{hadron}$ , ГэВ	1.7444±0.0020		1.7435±0.0011
$\Gamma_\ell$ , МэВ	$e^+e^-$	83.91±0.12	84.024±0.025
	$\mu^+\mu^-$	83.99±0.18	
	$\tau^+\tau^-$	84.08±0.22	
$\Gamma_{e\mu\tau}$ , МэВ	251.95±0.26		252.072±0.075
$\Gamma_{inv}$ , МэВ	499.0±1.5		501.81±0.13
$\frac{\Gamma_\nu}{\Gamma_\ell}$	-		1.991±0.001

# Нейтральные слабые токи



Элементарные узлы связи нейтрального бозона с каждым лептоном и каждым кварком

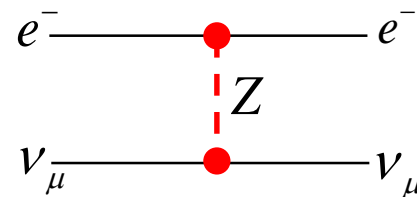
$$l Z l \quad q Z q$$

При взаимодействии высокоэнергетичных нейтрино, рождающихся на ускорителях, наряду с процессами, в которых нейтрино превращается в заряженный лептон, должны наблюдаться события другого типа — процессы упругого и неупругого рассеяния нейтрино без его превращения в заряженные лептоны. Такие процессы, происходящие при участии Z-бозона, называют нейтральными слабыми токами.

$$\nu_\mu + p \rightarrow \nu_\mu + \text{адроны}$$

$$\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$$

$$\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \bar{\nu}_\mu + p$$





# Пример

Исходя из характеристик переносчиков слабого взаимодействия  $W^\pm$ - и  $Z$ -бозонов, определить радиус слабых сил.

Массы  $W$ - и  $Z$ -бозонов:  $m_W \approx 80 \text{ ГэВ}/c^2$ ,  $m_Z \approx 90 \text{ ГэВ}/c^2$ . Радиус действия слабых сил  $a_W$  связан с массой переносчиков взаимодействия  $W$ - и  $Z$ -бозонов соотношением

$$R_W \approx \frac{\hbar c}{m_W c^2} \approx \frac{\hbar c}{m_Z c^2},$$

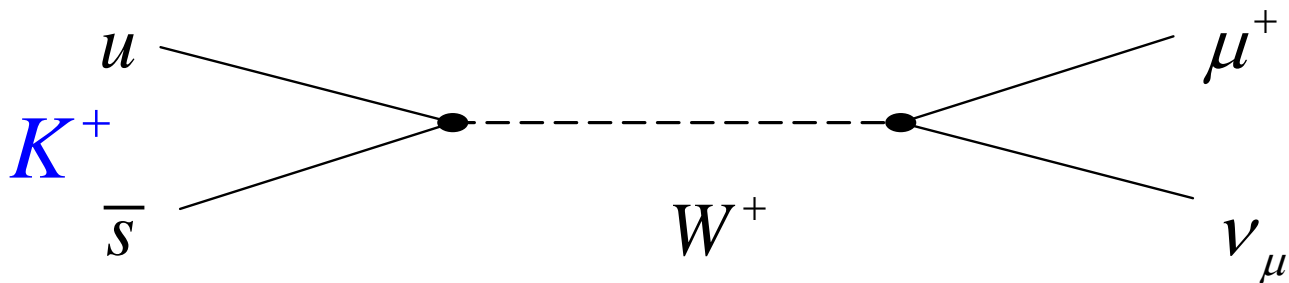
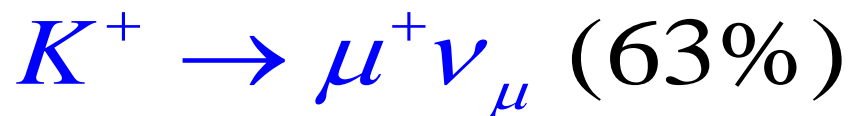
следующим из соотношения неопределенности  $\Delta E \Delta t \approx \hbar$ . Действительно, нарушение закона сохранения энергии на величину  $\Delta E = m_W c^2 \approx m_Z c^2$  ненаблюдаемы в течение временных интервалов

$$\Delta t \leq \frac{\hbar}{\Delta E} \approx \frac{\hbar}{m_W c^2} \approx \frac{\hbar}{m_Z c^2}.$$

Так как  $m_W \approx m_Z \approx 100 \text{ ГэВ}/c^2$ , имеем

$$R_W \approx \frac{0,2 \text{ ГэВ} \cdot \Phi_M}{100 \text{ ГэВ}} = 2 \cdot 10^{-3} \Phi_M.$$

# Пример

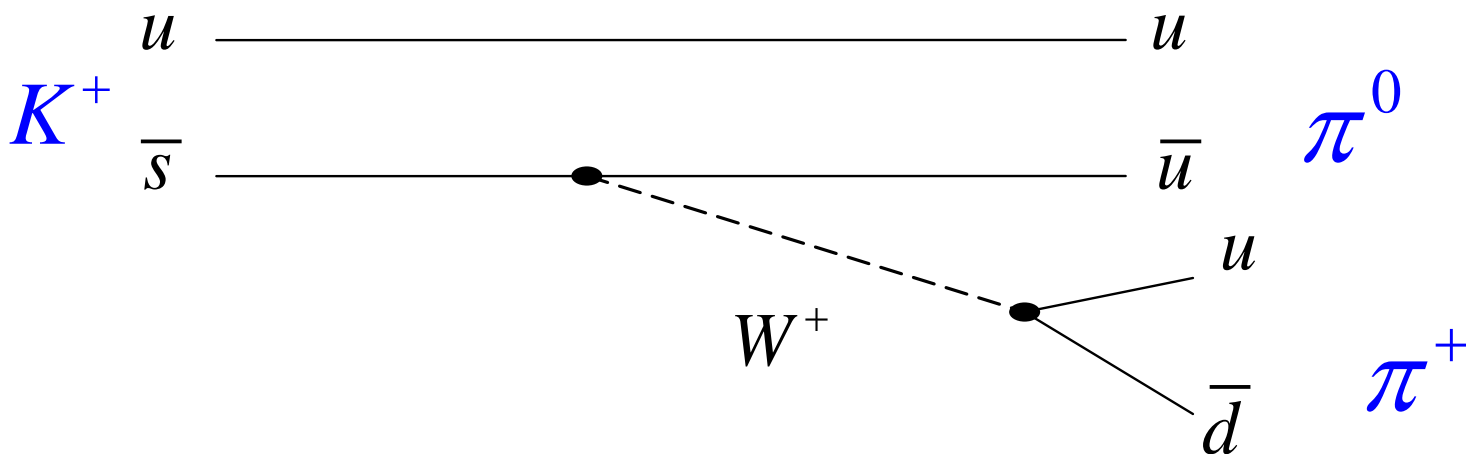
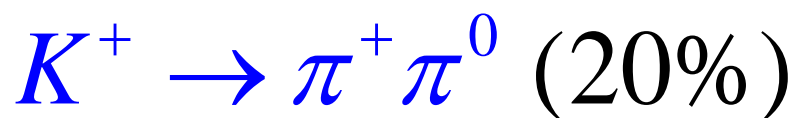


$$M(K^+) = 494 \text{ МэВ}$$

$$M(\mu^+) = 105,6 \text{ МэВ}$$

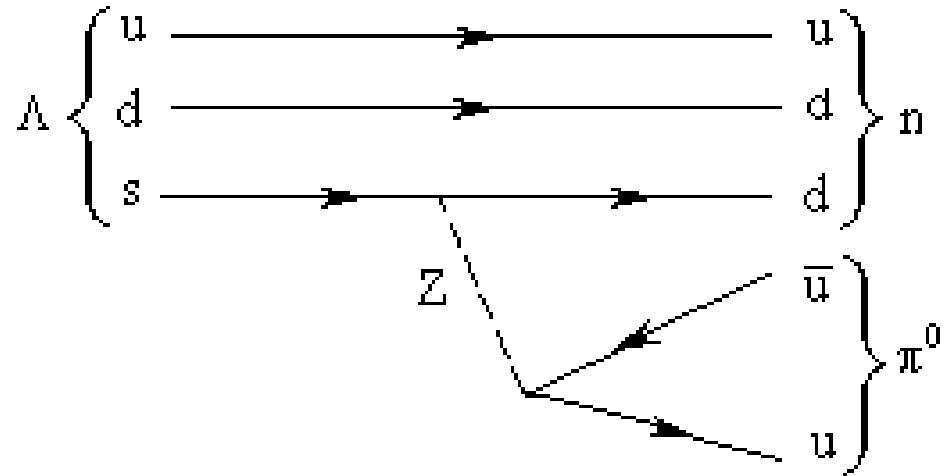
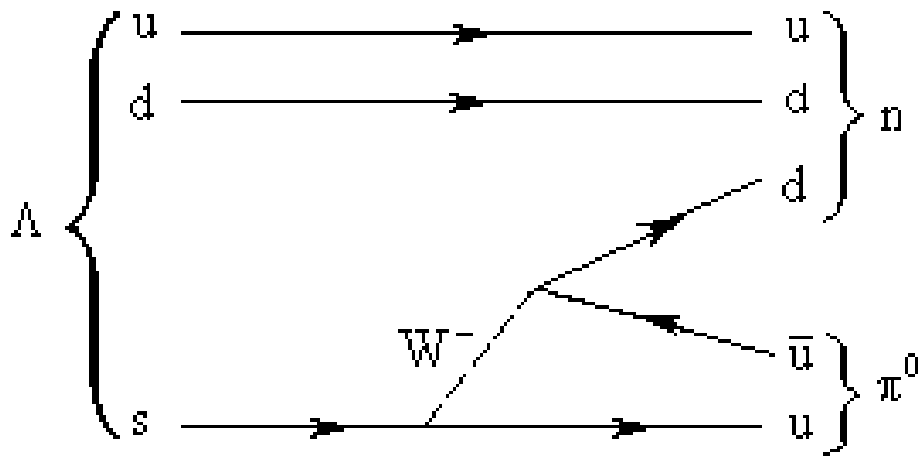
$$M(\pi^+) = 139,6 \text{ МэВ}$$

$$M(\pi^0) = 135 \text{ МэВ}$$



# Пример

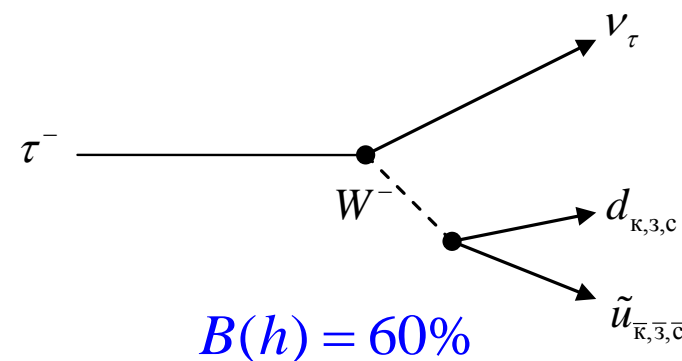
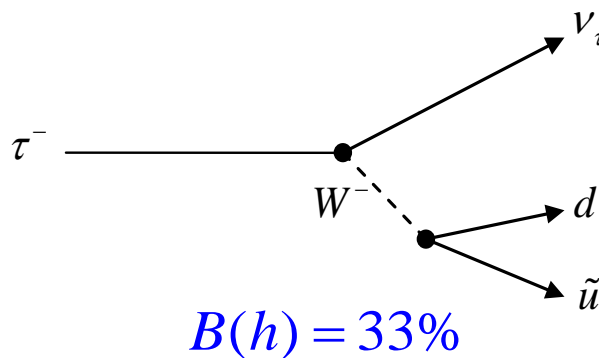
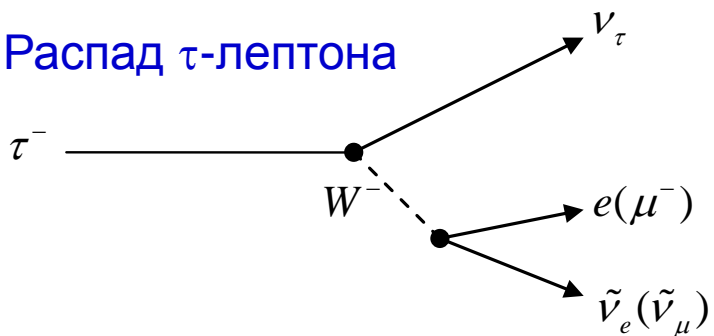
Одна из следующих двух диаграмм, описывающих распад  $\Lambda \rightarrow n + \pi^0$ , неправильная. Какая?



Правая диаграмма неправильная.  $Z$ -бозон фигурирует в нейтральных слабых токах, не изменяющих ароматы кварков, т.е. никаких связанных с кварками квантовых чисел. На правой диаграмме испускание  $Z$ -бозона сопровождается переходом  $s$ -кварка в  $d$ , при котором изменяется странность и изоспин.

# Проверка гипотезы цветных кварков

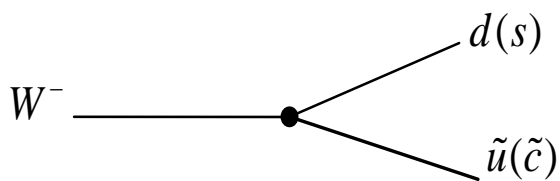
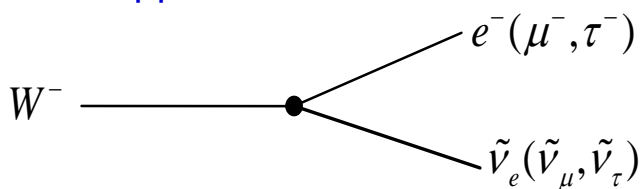
Распад  $\tau$ -лептона



Эксперимент:  $B(\tau^- \rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu + \nu_\tau) = (17,36 \pm 0,05)\%$

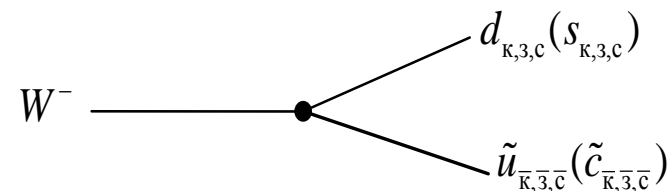
$B(\tau^- \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\tau) = (17,85 \pm 0,05)\%$

Распад  $W^-$ -бозона



В отсутствие цвета

$B(h) = 40\%$

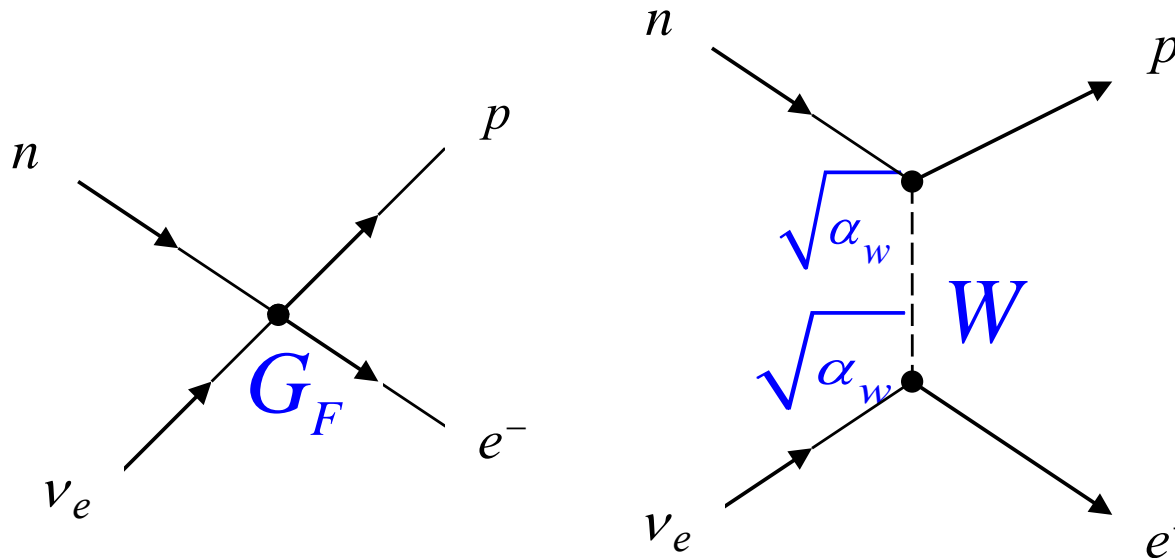


Цветные кварки

$B(h) = 66\%$

Эксперимент:  $B(h) = 67\%$

# Константа слабого взаимодействия



В первоначальной теории слабое взаимодействие описывалось в виде четырехфермионного точечного превращения частиц (слева). Современное представление слабого взаимодействия связано с переносчиками взаимодействия  $W$  и  $Z$  бозонами (справа).

Слабое взаимодействие на начальном этапе развития теории характеризовалось константой  $G_F$ , которая носит название *фермиевской константы связи* и является эффективной константой четырехфермионного взаимодействия. По экспериментальным данным она имеет величину:

$$G_F = 1.4 \cdot 10^{-49} \text{ эрг} \cdot \text{см}^3$$

Фермиевская константа  $G_F$  связана с константой  $\alpha_w$  соотношением:

$$G_F = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \alpha_w \hbar c \left( \frac{\hbar c}{M_W c^2} \right)^2,$$

$M_W$  – масса  $W$ -бозона.

# Константа сильного взаимодействия?

Значения констант зависят от масштаба относительных расстояний, на которых происходят взаимодействия. Константы  $\alpha_e$  и  $\alpha_w$  в широкой области энергий имеют значения:

$$\alpha_e = \frac{1}{137} = 0.0073$$

$$\alpha_w = 0.032$$

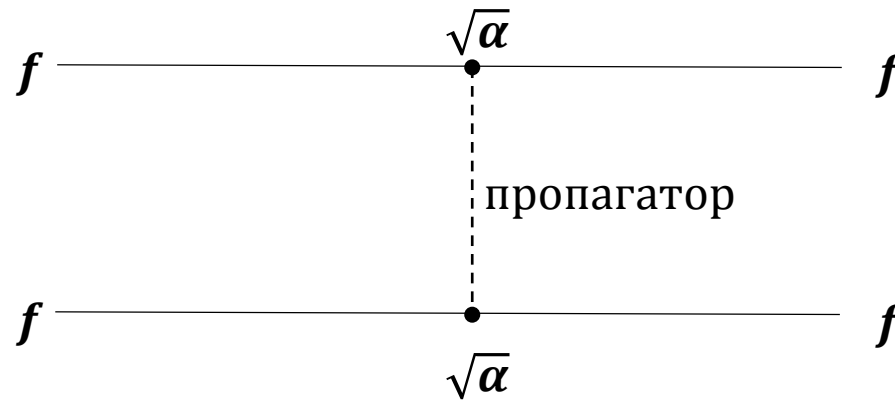
Константа сильного взаимодействия  $\alpha_s$  в области расстояний ( $\approx 1$  Фм) имеет порядок единицы. Эта особенность сильного взаимодействия получила специальное название непертурбативного режима сильного взаимодействия. С уменьшением относительных расстояний константа сильного взаимодействия заметно уменьшается.

$$\alpha_s (1 \text{ Фм}) \approx 1 - 2$$

$$\alpha_s (0.1 \text{ Фм}) \approx 0.31$$

$$\alpha_s (0.001 \text{ Фм}) \approx 0.105$$

# Взаимодействие



$$\text{пропагатор} = \frac{1}{m_i^2 c^2 - q^2}$$

$$q^2 = q_0^2 - \vec{q}^2 \quad q_0 = E/c$$

$$A = \sqrt{\alpha} \frac{1}{m_i^2 c^2 - q^2} \sqrt{\alpha}$$

Вероятность процесса зависит от

1. константы взаимодействия,
2. степени нарушения соотношения  $E^2 = c^2 p^2 + m^2 c^4$ ,
3. полной энергии взаимодействия





*u*

(1,5-4 МэВ)

*c*

(1,8 ГэВ)

*t*

(175 ГэВ)

*d*

(4-8 МэВ)

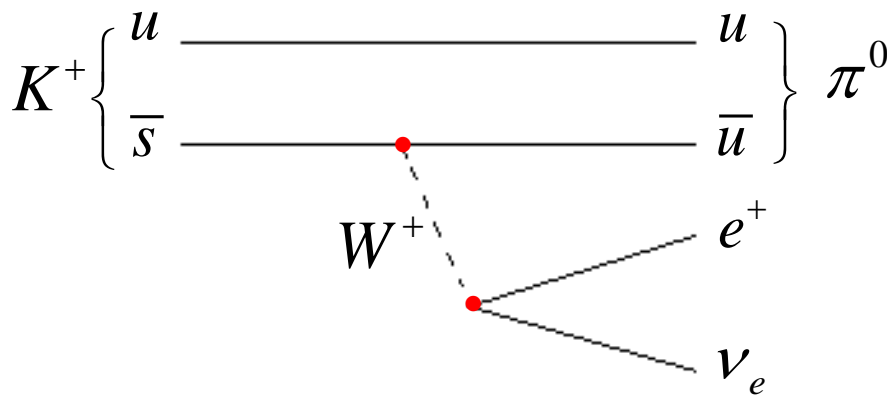
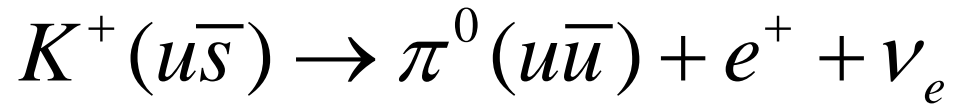
*s*

(80-130 МэВ)

*b*

(4,1-4,9 ГэВ)

# Распад s-кварка

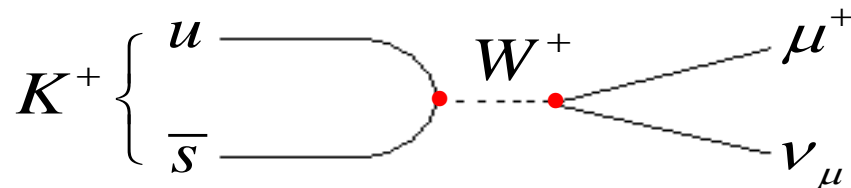
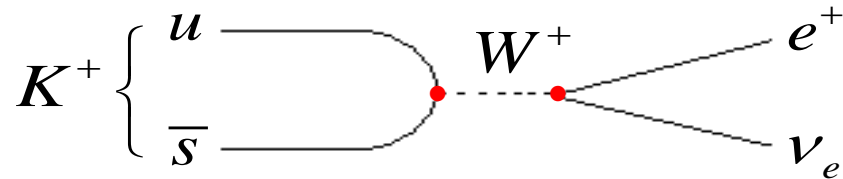


$u$      $c$      $t$   
 $d$      $s$      $b$

$$M(K^+) = 4,94 \text{ МэВ}$$

$$M(\pi^0) = 135 \text{ МэВ}$$

$$\tau(K^+) = 1.2 \cdot 10^{-8} \text{ с}$$

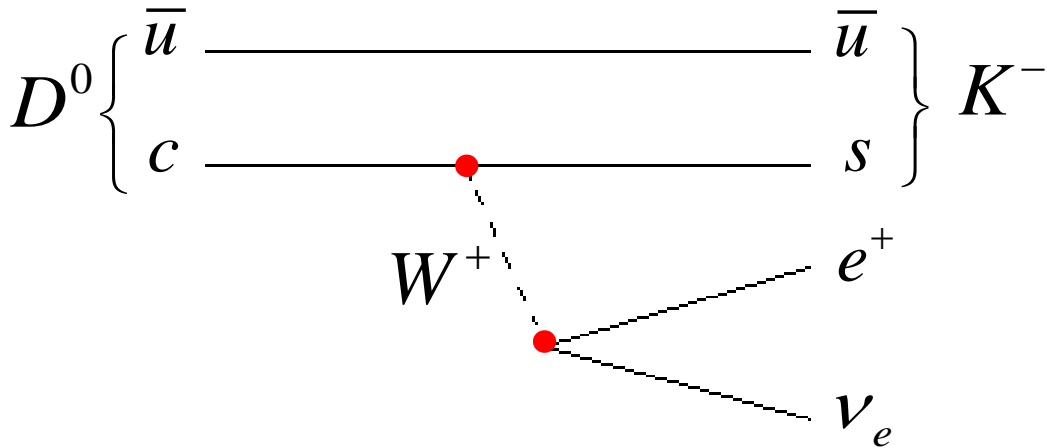


# Распад с-кварка

$$M(D^0) = 1864.5 \text{ МэВ}$$

$$\tau(D^0) = 4,1 \cdot 10^{-13} \text{ сек}$$

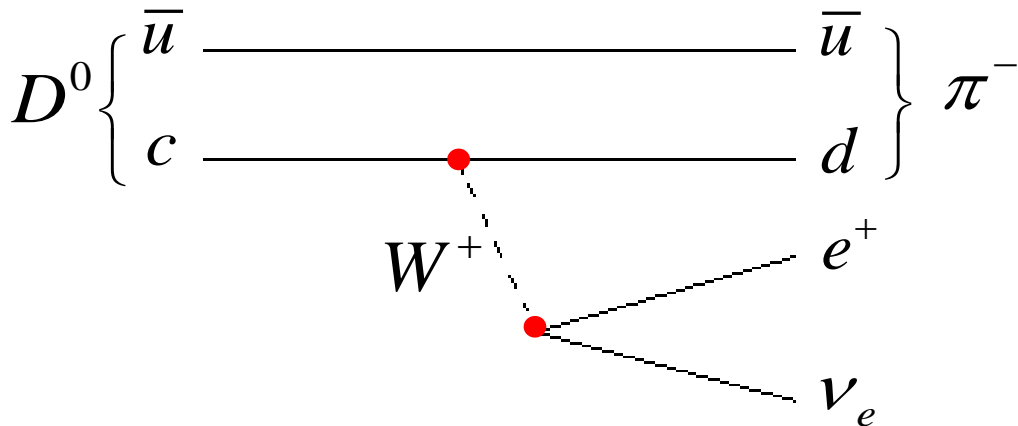
$$D^0 (c\bar{u})$$



$u$	$c$	$t$
$d$	$s$	$b$

$$D^0 \rightarrow K^- + e^+ + \nu_e$$

$$(3.63 \pm 0.18)\%$$



$$D^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e$$

$$(3.7 \pm 0.6) \cdot 10^{-3}$$

Распады  $c \rightarrow s$  происходят гораздо чаще чем распады  $c \rightarrow d$

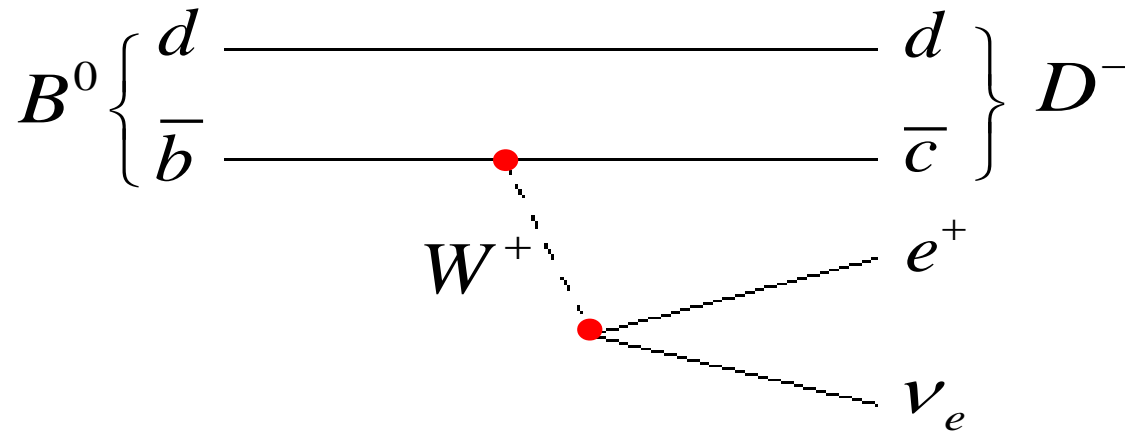
# Распад b-кварка

$$M(B^0) = 5279.4 \pm 0.5 M_{\text{эВ}}$$

$$B^0 (d\bar{b})$$

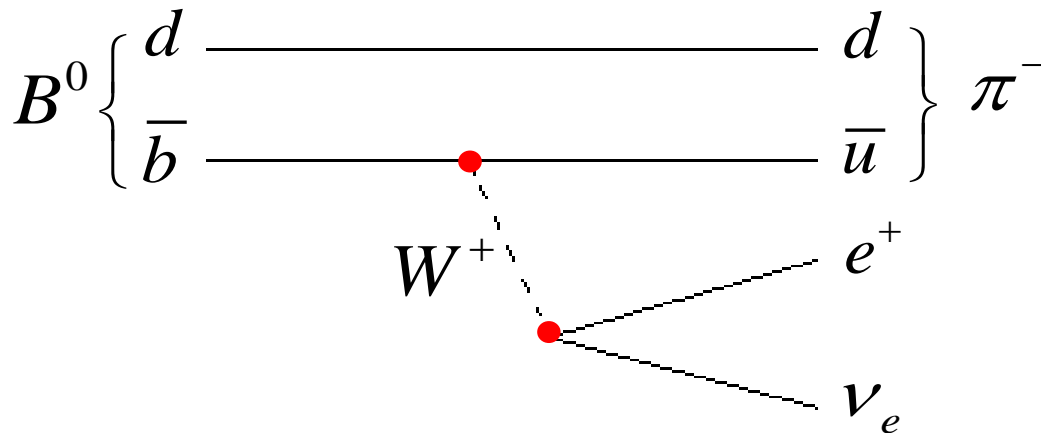
$$\tau(B^0) = 1,5 \cdot 10^{-12} \text{ сек}$$

<i>u</i>	<i>c</i>	<i>t</i>
<i>d</i>	<i>s</i>	<i>b</i>



$$B^0 \rightarrow D^- + e^+ + \nu_e$$

$(2.10 \pm 0.19)\%$



$$B^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e$$

$(1.0 \pm 0.6) \cdot 10^{-4}$

Распады  $b \rightarrow c$  происходят гораздо чаще чем распады  $b \rightarrow u$



# Рождение и распад $\Omega^-$ -гиперона



$$M(\Omega) = 1672,5 \text{ МэВ}$$

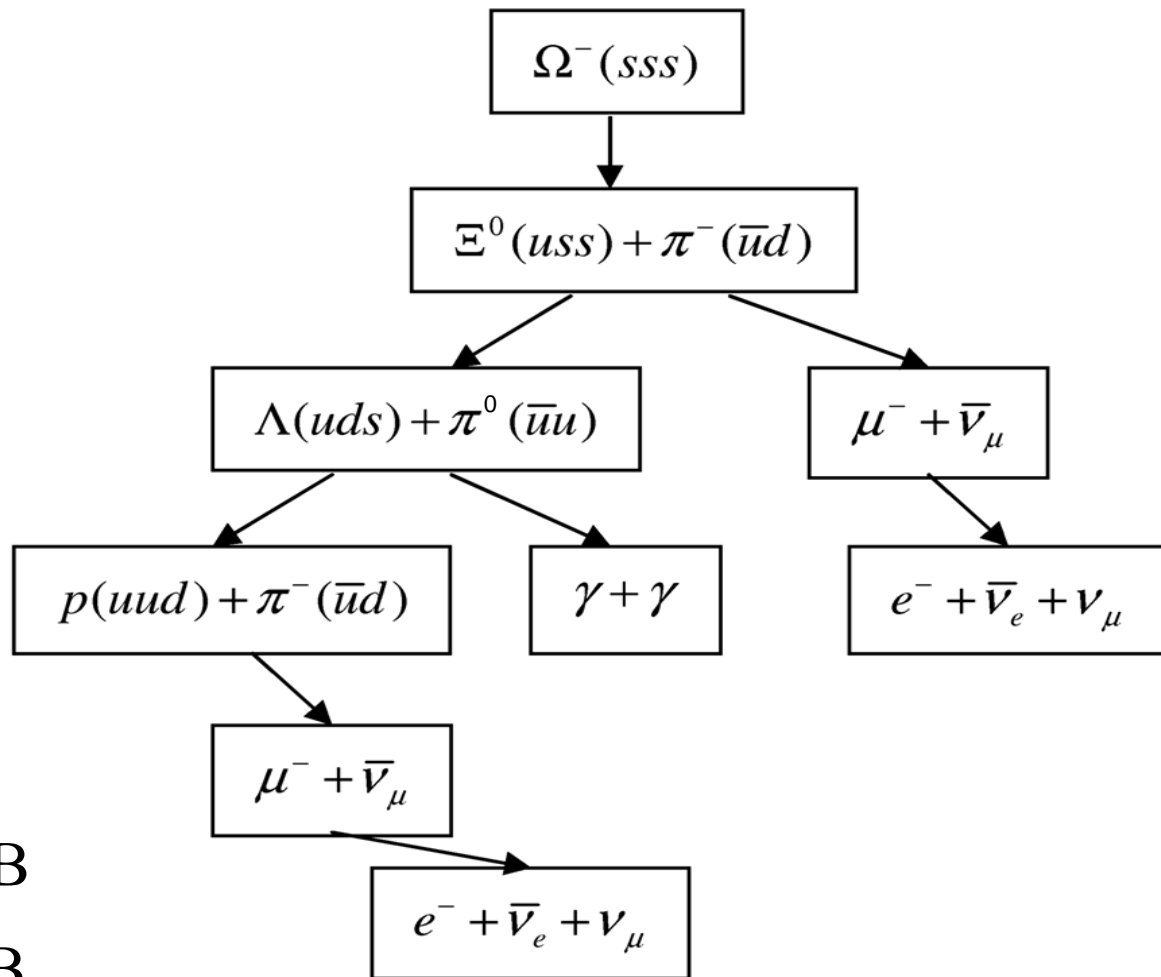
$$M(\Xi^0) = 1314,9 \text{ МэВ}$$

$$M(\Lambda) = 1115,6 \text{ МэВ}$$

$$M(p) = 938,3 \text{ МэВ}$$

$$M(\mu^-, \mu^+) = 105,7 \text{ МэВ}$$

$$M(\pi^+, \pi^-) = 139,6 \text{ МэВ}$$



Каналы распада	Относительные вероятности
$\mu^+ \nu_\mu$	63.4%
$\pi^+ \pi^0$	21.1%
$\pi^+ \pi^+ \pi^-$	5.6%
$\pi^0 e^+ \nu_e$	4.9%
$\pi^0 \mu^+ \nu_\mu$	3.3%
$\pi^+ \pi^0 \pi^0$	1.7%
$\mu^+ \nu_\mu \gamma$	$5.5 \cdot 10^{-3}$
$\pi^0 \pi^0 \gamma$	$2.8 \cdot 10^{-4}$
$\pi^0 e^+ \nu_e \gamma$	$2.7 \cdot 10^{-4}$
$\pi^+ \pi^+ \pi^- \gamma$	$1.0 \cdot 10^{-4}$
$\pi^+ \pi^- e^+ \nu_e$	$4.1 \cdot 10^{-5}$
$\pi^0 \pi^0 e^+ \nu_e$	$2.1 \cdot 10^{-5}$
$e^+ \nu_e$	$1.6 \cdot 10^{-5}$
$\pi^+ \pi^- \mu^+ \nu_\mu$	$1.4 \cdot 10^{-5}$

## Распады $K^+$ - мезона

$M(K^+) = 494 \text{ МэВ}$

$\tau = 1.2 \times 10^{-8} \text{ с}$

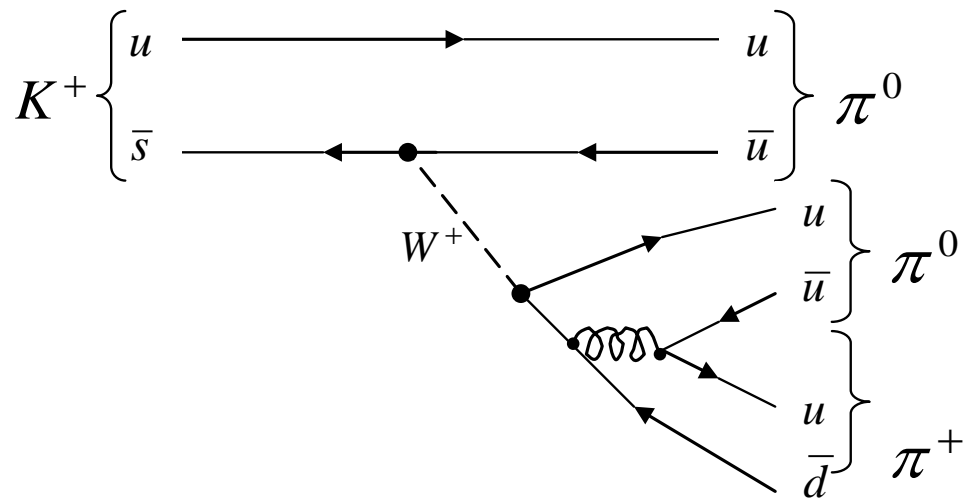
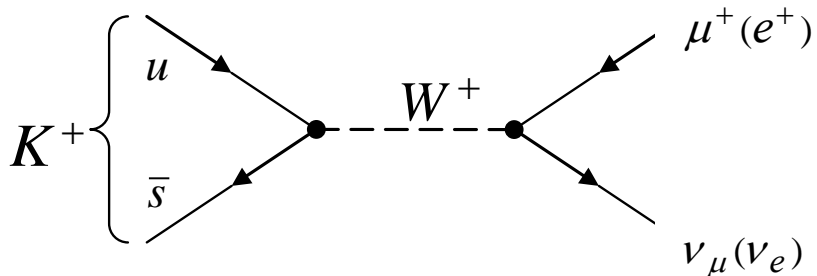
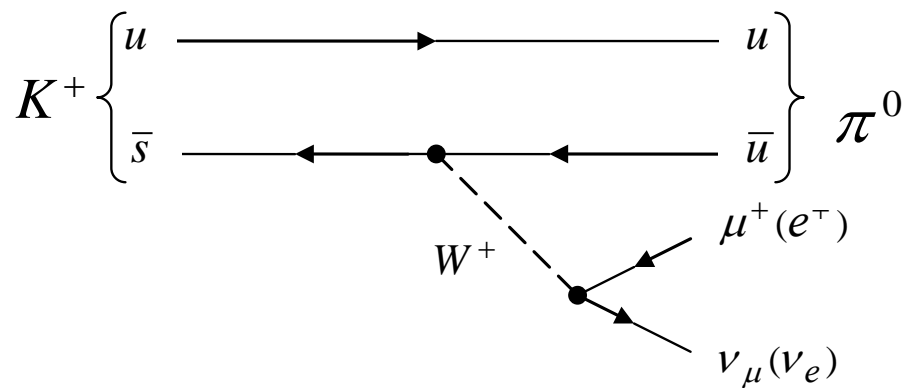
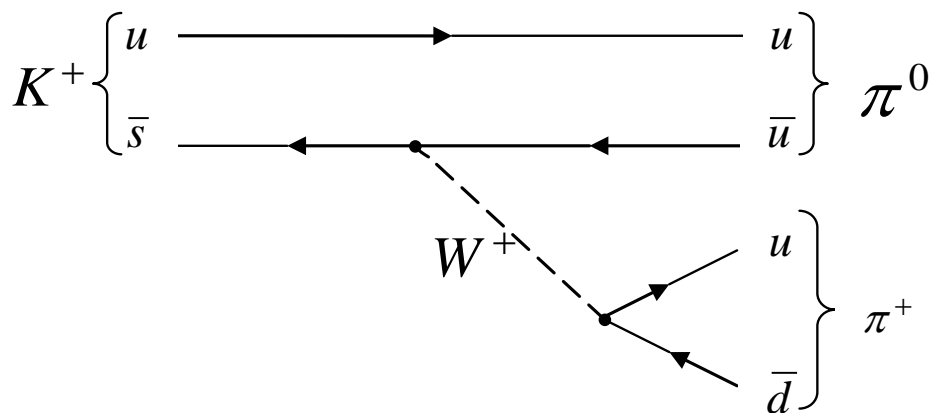
$J^P(I) = 0^-(1/2)$

# Распады $K^+$ - мезона

$$M(K^+) = 494 \text{ МэВ}$$

$$\tau = 1.2 \times 10^{-8} \text{ с}$$

$$J^P = 0^-$$





# Распады $\pi^-$ – мезонов

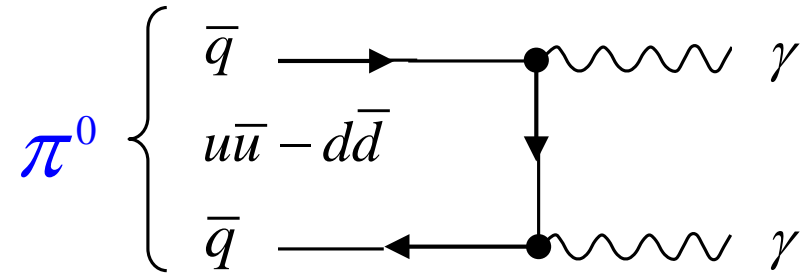
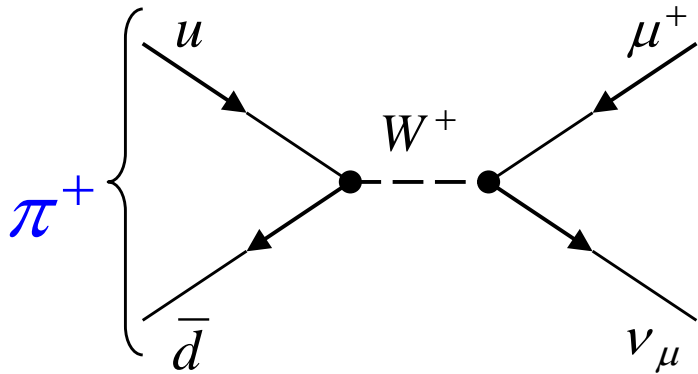
Каналы распада  $\pi^+$ -мезона ( $\tau = 2.6 \cdot 10^{-8}$  с)

Каналы распада	Относительная вероятность
$\mu^+ \nu_\mu$	99.988%
$\mu^+ \nu_\mu \gamma$	$2.0 \cdot 10^{-4}$
$e^+ \nu_e$	$1.2 \cdot 10^{-4}$
$e^+ \nu_e \gamma$	$1.6 \cdot 10^{-7}$
$e^+ \nu_e \pi^0$	$1.0 \cdot 10^{-8}$
$e^+ \nu_e e^+ e^-$	$3.2 \cdot 10^{-9}$
$e^+ \nu_e \nu \bar{\nu}$	$< 5 \cdot 10^{-6}$

Каналы распада  $\pi^0$ -мезона ( $\tau = 0.84 \cdot 10^{-16}$  с)

Каналы распада	Относительная вероятность
$2\gamma$	98.80%
$e^+ e^- \gamma$	1.2%
$e^+ e^+ e^- e^-$	$3.1 \cdot 10^{-5}$
$e^+ e^-$	$6.2 \cdot 10^{-8}$
$4\gamma$	$< 2 \cdot 10^{-8}$

# Распады $\pi$ – мезонов



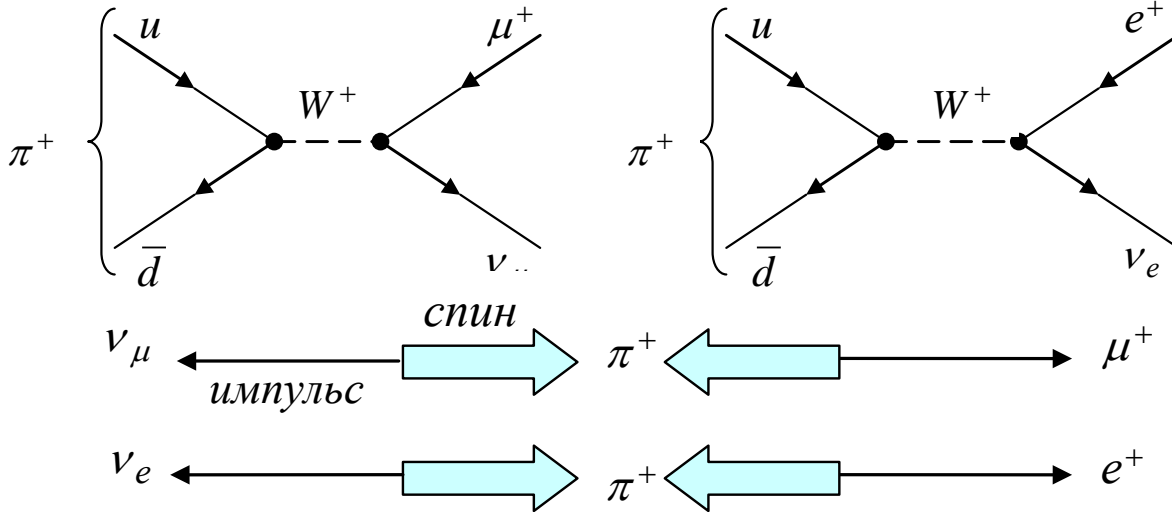
Так как  $\pi^\pm$ -мезон является самым легким положительно заряженным адроном, он должен распадаться на легкие заряженные лептоны  $e^\pm$  или  $\mu^\pm$  и соответствующие нейтрино  $\nu_e(\nu_\mu)$  или антинейтрино  $\bar{\nu}_e(\bar{\nu}_\mu)$ . Распад происходит в результате слабого взаимодействия, поэтому  $\pi^\pm$ -мезон имеет характерное для слабого взаимодействия время жизни  $\tau(\pi^\pm) = 2.6 \cdot 10^{-8}$  с.

Распад  $\pi^0$ -мезона происходит в результате электромагнитного взаимодействия. Поэтому время жизни  $\pi^0$ -мезона ( $\tau(\pi^0) = 0.84 \cdot 10^{-16}$  с) много меньше времени жизни заряженных пионов.

# Распады $\pi^+$ мезона

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (99,99\%)$$

$$\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e \quad (0,01\%)$$



$$M(\pi^+) = 139,57 \text{ МэВ}$$

$$M(\mu^+) = 105,7 \text{ МэВ}$$

$$M(e^+) = 0,511 \text{ МэВ}$$

При распаде  $\pi^+$ -мезона доминирует канал распада  $\pi^+$ -мезона на мюон и мюонное нейтрино

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu.$$

Этот факт на первый взгляд является удивительным, поскольку существует не запрещенный законами сохранения распад:

$$\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e,$$

который идет со значительно бóльшим энерговыделением (масса  $e^\pm$  меньше массы  $\mu^\pm$  в 207 раз).

Однако по какой-то причине происходит он в  $10^4$  раз реже.

# Спиральность. Киральность

**Поляризация** частицы — это состояние частицы с преимущественной ориентацией ее спина вдоль выбранного направления. При поперечной поляризации спин частицы перпендикулярен ее импульсу. При продольной (круговой) поляризации спин направлен вдоль импульса частицы.

**Спиральность** частицы  $h$  определяется соотношением

$$h = \frac{\vec{s} \vec{p}}{|\vec{s}| |\vec{p}|},$$

$\vec{s}$  — спин частицы, а  $\vec{p}$  — ее импульс.

Состояние, при котором направления спина и импульса совпадают, соответствует спиральности  $h = +1$  (правая поляризация, правая спиральность). Состояние с противоположно направленными спином и импульсом (левая поляризация, левая спиральность) соответствует спиральности  $h = -1$ . Лептоны и кварки, участвующие в слабых взаимодействиях, имеют отрицательную спиральность или левополяризованы. Антилептоны и антикварки, участвующие в слабых взаимодействиях, имеют положительную спиральность или правую поляризацию.

$$h(e^-, \nu_e, \mu^-, \nu_\mu, \tau^-, \nu_\tau, u, d, s, c, b, t) = -1,$$

$$h(e^+, \bar{\nu}_e, \mu^+, \bar{\nu}_\mu, \tau^+, \bar{\nu}_\tau, \bar{u}, \bar{d}, \bar{s}, \bar{c}, \bar{b}, \bar{t}) = +1.$$

Это эмпирический результат, следующий из анализа всей совокупности экспериментальных данных. В природе не наблюдаются правополяризованные нейтрино и левополяризованные антинейтрино.

**Нейтрино всегда имеет левую поляризацию ( $h = -1$ ), а антинейтрино — правую ( $h = +1$ ).**

# Распады

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$$

Для качественного объяснения подавления распада  $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$  по сравнению с распадом  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$  следует учесть, что  $e^+$  и  $\mu^+$  рождаются в слабых процессах со спиральностью  $h = v/c$  т.е.  $v/c$  всех рождающихся  $e^+$  и  $\mu^+$  должны быть правополяризованными. Эту поляризацию мы назовём «правильной». Соответственно  $1 - v/c$  положительно заряженных лептонов будут левополяризованными, т.е. поляризованными «неправильно». Распад с «правильно» поляризованными  $e^+$  и  $\mu^+$  **запрещен законом сохранения углового момента**. Поэтому распад  $\pi^+$  идёт с «неправильно» поляризованными  $e^+$  и  $\mu^+$ , а доля таких распадов равна  $1 - v/c$ . Так как в распаде  $\pi \rightarrow e \nu$  электроны (позитроны) ультрарелятивистские, то  $v_e/c \approx 1$  и  $1 - v_e/c \approx 0$ . В распаде  $\pi \rightarrow \mu \nu$  мюоны нерелятивистские,  $v_\mu/c$  относительно мало и  $1 - v_\mu/c$  велико. Т.е. вероятность рождения «неправильно» поляризованных мюонов значительна. Поэтому вероятность распада  $\pi \rightarrow \mu \nu$  во много раз превосходит вероятность распада  $\pi \rightarrow e \nu$ .

# Пример

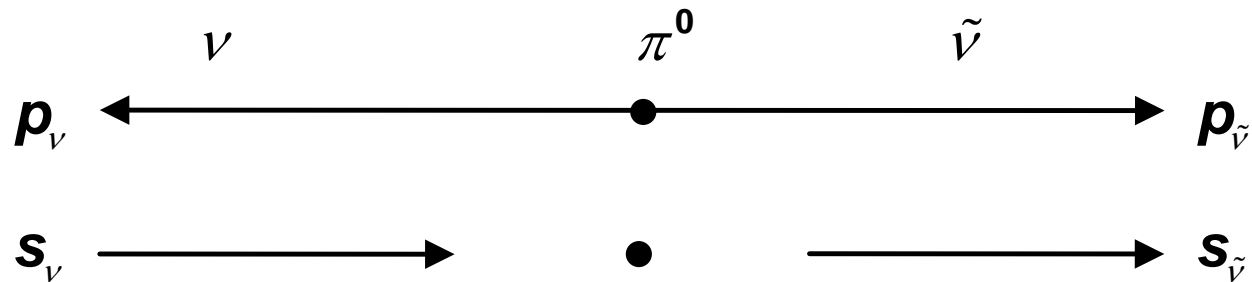
Возможен ли распад  $\pi^0 \rightarrow \nu_e + \bar{\nu}_e$  для нейтрино с нулевой массой?

Нейтрино всегда имеет отрицательную спиральность, а антинейтрино всегда имеет положительную спиральность.

Спин нейтрино  $s_\nu$  равен  $1/2$ , и направление его вектора противоположно направлению движения частицы. Спин антинейтрино  $s_{\bar{\nu}}$  также равен  $1/2$ , но направление его вектора совпадает с направлением движения частицы.

При распаде, исходя из закона сохранения импульса, нейтрино должны разлетаться строго в противоположные стороны. Момент количества движения  $\nu_e$  и  $\bar{\nu}_e$   $\vec{J} = \vec{s}_\nu + \vec{s}_{\bar{\nu}} = \vec{1}$ . Однако, спин  $\pi^0$ -мезона равен  $0$ , то есть данный распад невозможен из-за нарушения закона сохранения момента количества движения

$$J_i = J_\pi = 0, \quad J_f = \vec{s}_\nu + \vec{s}_{\bar{\nu}} = 1$$



# Законы сохранения

Характеристика		Взаимодействие		
		сильное	электромагнитное	слабое
<b>Аддитивные законы сохранения</b>				
Электрический заряд	$Q$	+	+	+
Энергия	$E$	+	+	+
Импульс		+	+	+
Момент количества движения		+	+	+
Барионный заряд	$B$	+	+	+
Лептонные заряды	$L_e, L_\mu, L_\tau$	+	+	+
Странность	$s$	+	+	-
Очарование (charm)	$c$	+	+	-
Bottom	$b$	+	+	-
Top	$t$	+	+	-
Изоспин	$I$	+	-	-
Проекция изоспина	$I_3$	+	+	-
<b>Мультипликативные законы сохранения</b>				
Пространственная чётность	$P$	+	+	-
Зарядовая чётность	$C$	+	+	-
Комбинированная чётность	$CP$	+	+	-
Обращение времени	$T$	+	+	-
CPT-инвариантность		+	+	+