



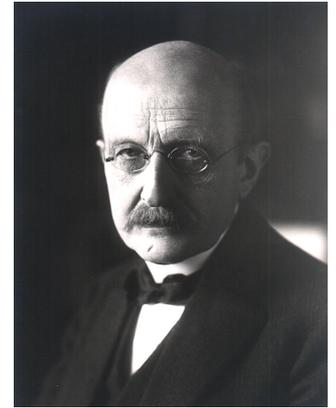
Ядерная физика и Человек

**ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ
ЧАСТИЦЫ МАТЕРИИ.**

КВАРКИ. ЛЕПТОНЫ

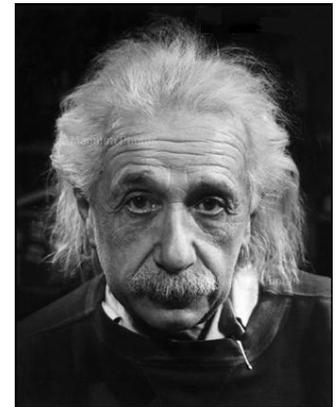
Квантовая физика. Теория относительности

1900 г. М. Планк сформулировал закон излучения черного тела. Гипотеза квантов.



М. Планк
1858-1947

1905 г. А. Эйнштейн объяснил явление фотоэффекта. Специальная теория относительности.



А. Эйнштейн
1879-1955

Энергия

$$E = \frac{mv^2}{2}$$

$$E = mc^2$$

$$c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$$

$$E^2 = c^2 p^2 + m^2 c^4$$

$$E = \hbar \omega$$

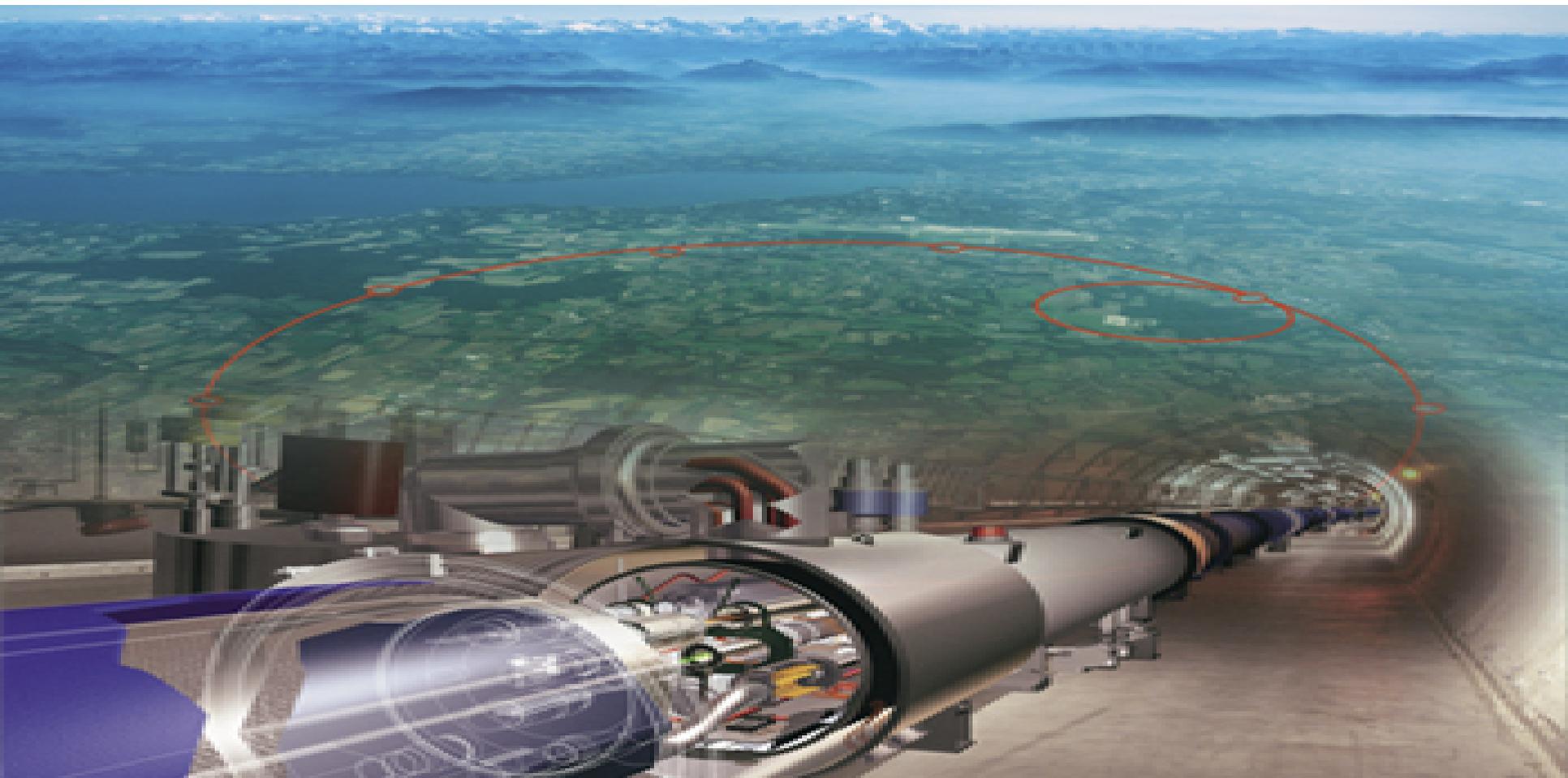
$$\hbar = 6,58 \cdot 10^{-21} \text{ эВ} \cdot \text{с}$$

$$E = kT$$

$$k = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ эВ} \cdot \text{К}^{-1}$$

Зачем нужны ускорители?

$$\hat{\lambda} = \frac{\hbar}{p}, \quad E^2 = c^2 p^2 + m^2 c^4$$

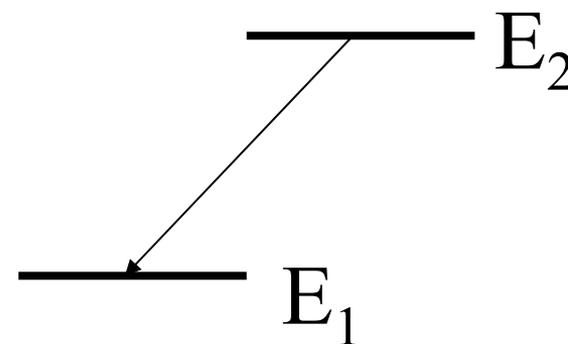
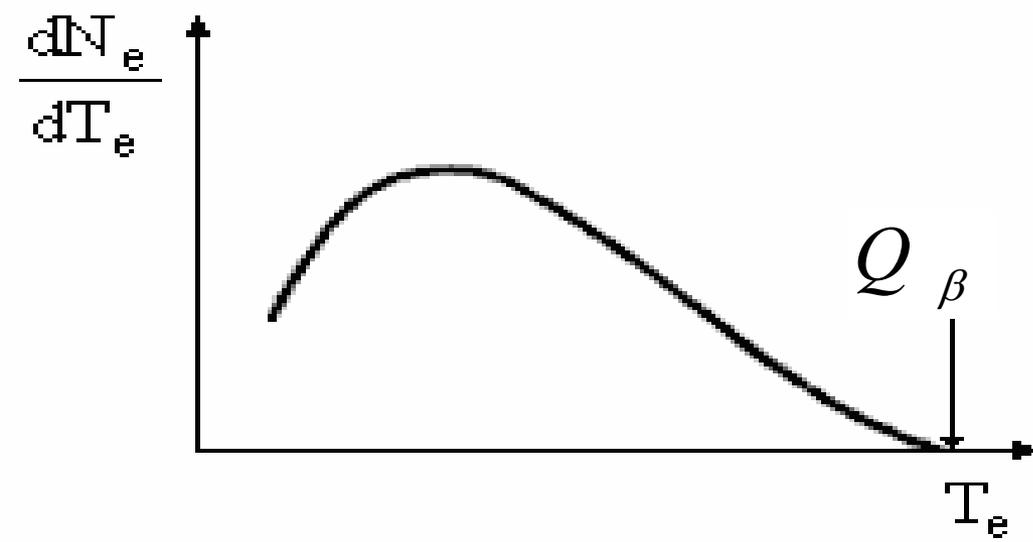
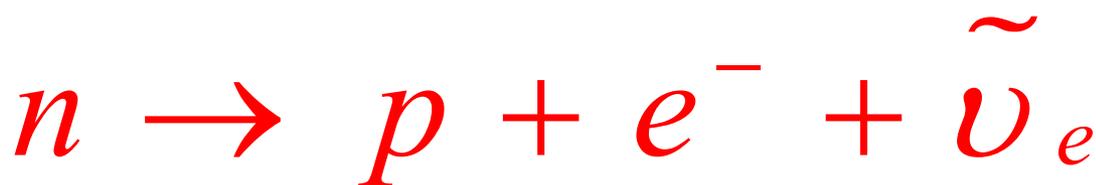


1931 Нейтрино ν

В. Паули выдвинул гипотезу о существовании нейтрино для объяснения спектра электронов β -распада.

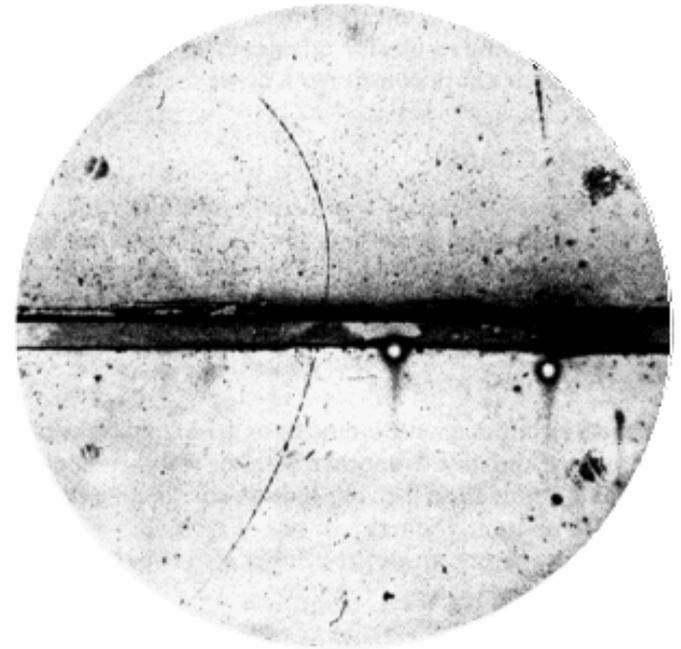
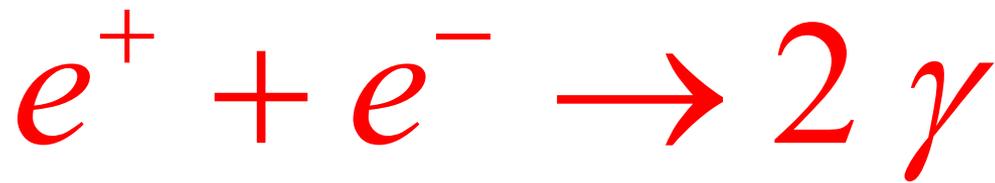


Wolfgang Pauli
(1900-1958)



1932 Позитрон e^+

$$M = 0.511 \text{ МэВ}$$



Наблюдение позитрона в камере Вильсона в магнитном поле. Тонкая изогнутая прерывистая линия, идущая снизу вверх – трек позитрона. Темная полоса, пересекающая трек - слой вещества, в котором позитрон теряет часть энергии, и по выходе из которого двигается с меньшей скоростью. Поэтому трек искривлён сильнее.

Античастицы

В 1928 г. П. Дираком на основе анализа релятивистского уравнения было предсказано существование позитрона

Открытия античастиц

1932 – Позитрон

1955 – Антипротон

1956 – Антинейтрон

1966 – Антидейтерий

1970 – Антигелий

1998 – Антиводород

Каждая частица имеет своего двойника – античастицу. Античастица обладает рядом характеристик, имеющих те же численные значения что и частица, и некоторые характеристики с противоположным знаком. Так частица и античастица имеют одинаковые массы и спины и противоположные значения зарядов.

1947 Странные частицы



1952 Резонансы



$$\Gamma \cdot \tau = \hbar$$

100 МэВ



10^{-23} с

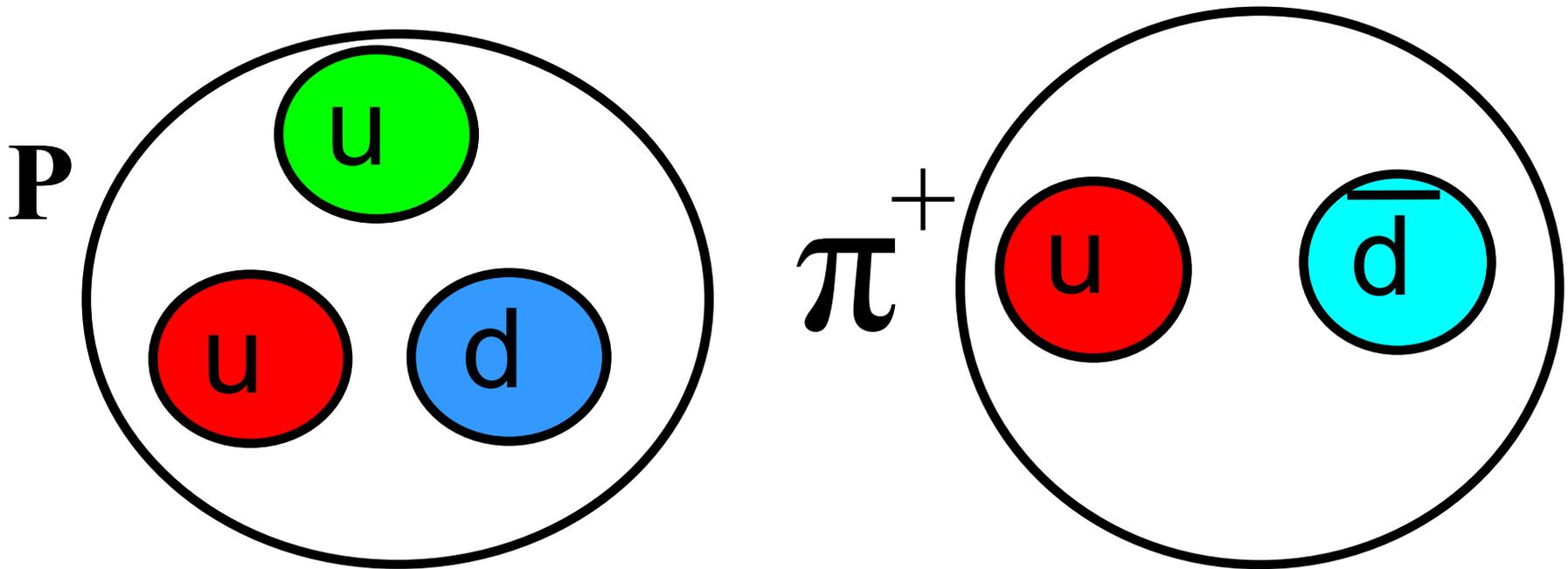


	масса	ширина распада
Δ^{++} (uuu)	1232 МэВ	120 МэВ
Δ^+ (uud)	1232 МэВ	120 МэВ
Δ^0 (udd)	1232 МэВ	120 МэВ
Δ^- (ddd)	1232 МэВ	120 МэВ
Σ^+ (uus)	1382 МэВ	85 МэВ
Ξ^- (dds)	1535 МэВ	9.9 МэВ

1963 г. - М. Гелл-Манн, Г. Цвейг

Кварковая модель адронов

Барионы состоят из трёх кварков,
мезоны – из кварка и антикварка.



Кварки

В 1964 г М. Гелл – Манн и Д. Цвейг независимо предложили модель кварков - частиц из которых состоят адроны. Для того чтобы объяснить наблюдаемые свойства адронов кваркам пришлось приписать довольно необычные свойства. Кварки должны иметь дробный электрический заряд $2/3$ или $-1/3$. Барионы “конструировались” из трех кварков, мезоны из кварка и антикварка. Все обнаруженные до 1974 г. адроны можно было описать, составляя их из кварков трех типов - u , d , s . Каждой комбинации кварков соответствовала экспериментально наблюдаемая частица.

В **1974** г. были открыты частицы, в состав которых входил четвертый **c – кварк.**

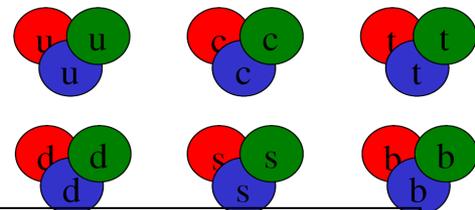
В **1977** г. был открыт **b – кварк.**

В **1995** г. был открыт **t – кварк.**

Все адроны состоят из комбинации этих шести кварков, и есть достаточно веские основания считать, что число кварков не должно быть больше шести.

Каждый кварк имеет квантовое число – цвет, которое может принимать три значения: красный, синий и зеленый. Это чисто условные названия, отражающие тот факт, что каждый кварк характеризуется квантовым числом цвет, имеющим 3 значения.¹

Кварки



Характеристика	Тип кварка (аромат)					
	d	u	s	c	b	t
Электрический заряд Q, в единицах e	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3
Барионное число B	1/3	+1/3	+1/3	+1/3	+1/3	+1/3
Спин J	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
Четность P	+1	+1	+1	+1	+1	+1
Изоспин I	1/2	1/2	0	0	0	0
Проекция изоспина I ₃	-1/2	+1/2	0	0	0	0
Странность s	0	0	-1	0	0	0
Очарование (charm) c	0	0	0	+1	0	0
Bottom b	0	0	0	0	-1	0
Top t	0	0	0	0	0	+1
Масса конститuentного кварка $m c^2$, ГэВ	0.33	0.33	0.51	1.8	5	180
Масса токового кварка	4–8 МэВ	1.5–4 МэВ	80–130 МэВ	1.1-1.4 ГэВ	4.1–4.9 ГэВ	174±5 ГэВ

Связь характеристик частиц и античастиц

Характеристика		Частица	Античастица
Масса		M	
Спин		J	
Чётность	<i>фермион</i>	$+(-)1$	$-(+)1$
	<i>бозон</i>	$+(-)1$	$+(-)1$
Электрический заряд		$+(-)Q$	$-(+)Q$
Магнитный момент		$+(-)\mu$	$-(+)\mu$
Барионное число		$+B$	$-B$
Лептонное число		$+L_e, +L_\mu, +L_\tau$	$-L_e, -L_\mu, -L_\tau$
Изоспин		I	
Проекция изоспина		$+(-)I_3$	$-(+)I_3$
Странность		$-(+)s$	$+(-)s$
Очарование (Charm)		$+(-)c$	$-(+)c$
Bottom		$-(+)b$	$+(-)b$
Топ		$+(-)t$	$-(+)t$
Время жизни		τ	
Схема распада (пример)		$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$	$\bar{d} \rightarrow \bar{u} + e^+ + \nu_e$

Кварковая структура барионов

Барионы — связанные состояния трёх

Частица	Кварковый состав	Масса, $m c^2$ (МэВ)	Время жизни (с) или ширина (МэВ)	Спин, чётность, изоспин $J^P(I)$	Основные каналы распада
p	uud	938.272	$>10^{31}$ лет	$1/2^+(1/2)$	
n	udd	939.565	885.7 ± 0.8	$1/2^+(1/2)$	$p e^- \nu$
Λ	uds	1115.683	$2.63 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(0)$	$p \pi^-, n \pi^0$
Σ^+	uus	1189.37	$0.802 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1)$	$p \pi^0, n \pi^+$
Σ^0	uds	1192.64	$7.4 \cdot 10^{-20}$	$1/2^+(1)$	$\Lambda \gamma$
Σ^-	dds	1197.45	$1.48 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1)$	$n \pi^-$
Ξ^0	uss	1314.8	$2.9 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1/2)$	$\Lambda \pi^0$
Ξ^-	dss	1321.3	$1.64 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1/2)$	$\Lambda \pi^0$
Ω^-	sss	1672.4	$1.64 \cdot 10^{-10}$	$3/2^+(0)$	$\Lambda K^-, \Xi^0 \pi^-$
Δ^{++} Δ^+ Δ^0 Δ^-	uuu uud udd ddd	1230-1234	115-125	$3/2^+(3/2)$	$(p, n) \pi^{0, \pm}$

Пример

Протон (uud)

$$M(P) = 938.272 \text{ МэВ}$$

$\tau(P) = \text{стабильный}$

$$J^P(I) = \frac{1}{2}^+ \left(\frac{1}{2} \right)$$

Нейтрон (udd)

$$M(n) = 939.565 \text{ МэВ}$$

$$\tau(n) = 885.7 \pm 0.8 \text{ с}$$

$$J^P(I) = \frac{1}{2}^+ \left(\frac{1}{2} \right)$$

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

	u	u	d	p
Q	+2/3	+2/3	-1/3	+1
B	+1/3	+1/3	+1/3	+1
J	1/2	1/2	1/2	1/2
I	1/2	1/2	1/2	1/2
I ₃	+1/2	+1/2	-1/2	+1/2
P	+1	+1	+1	+1
s, c, b, t	0	0	0	0

	u	d	d	n
Q	+2/3	-1/3	-1/3	0
B	+1/3	+1/3	+1/3	+1
J	1/2	1/2	1/2	1/2
I	1/2	1/2	1/2	1/2
I ₃	+1/2	-1/2	-1/2	-1/2
P	+1	+1	+1	+1
s, c, b, t	0	0	0	0

Мезоны

Частица	Кварковая структура	Масса mc^2 , МэВ	Время жизни τ [с] или ширина Γ	Спин-четность, изоспин $J^P(I)$	Основные моды распада
π^+	$u\bar{d}$	139,57	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$0^-(1)$	$\mu^+ \nu$
π^-	$d\bar{u}$	139,57	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$0^-(1)$	$\mu^- \bar{\nu}$
π^0	$u\bar{u} - d\bar{d}$	134,98	$8,4 \cdot 10^{-17}$	$0^-(1)$	2γ
K^+	$u\bar{s}$	494	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$0^-(1/2)$	$\mu^+ \nu,$ $\pi^0 \pi^+$
K^-	$s\bar{u}$	494	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$0^-(1/2)$	$\mu^- \bar{\nu},$ $\pi^0 \pi^-$
$\rho^+ \rho^-$ ρ^0	$u\bar{d} \ d\bar{u}$ $u\bar{u} - d\bar{d}$	769	150 МэВ	$1^-(1)$	$\pi\pi$
ω	$u\bar{u} + d\bar{d}$	783	8,4 МэВ	$1^-(0)$	3π
D^+	$c\bar{d}$	1869	$1,1 \cdot 10^{-12}$	$0^-(1/2)$	$K + \text{другие},$ $e + \text{другие},$ $\mu + \text{другие}$
D^-	$d\bar{c}$				
J/Ψ	$c\bar{c}$	3097	87 кэВ	$1^-(0)$	адроны, $2e, 2\mu$
Υ	$b\bar{b}$	9460	53 кэВ	$1^-(0)$	$\tau^+ \tau^-,$ $\mu^+ \mu^-,$ $e^+ e^-$

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

	u	\bar{d}	π^+
Q	+2/3	+1/3	+1
B	+1/3	-1/3	0
J	1/2	1/2	0
I	1/2	1/2	1
I_3	+1/2	+1/2	+1
P	+1	-1	-1

$$M(\pi^+) = 139.57 \text{ MeV}$$

$$\tau(\pi^+) = 2.6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

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

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

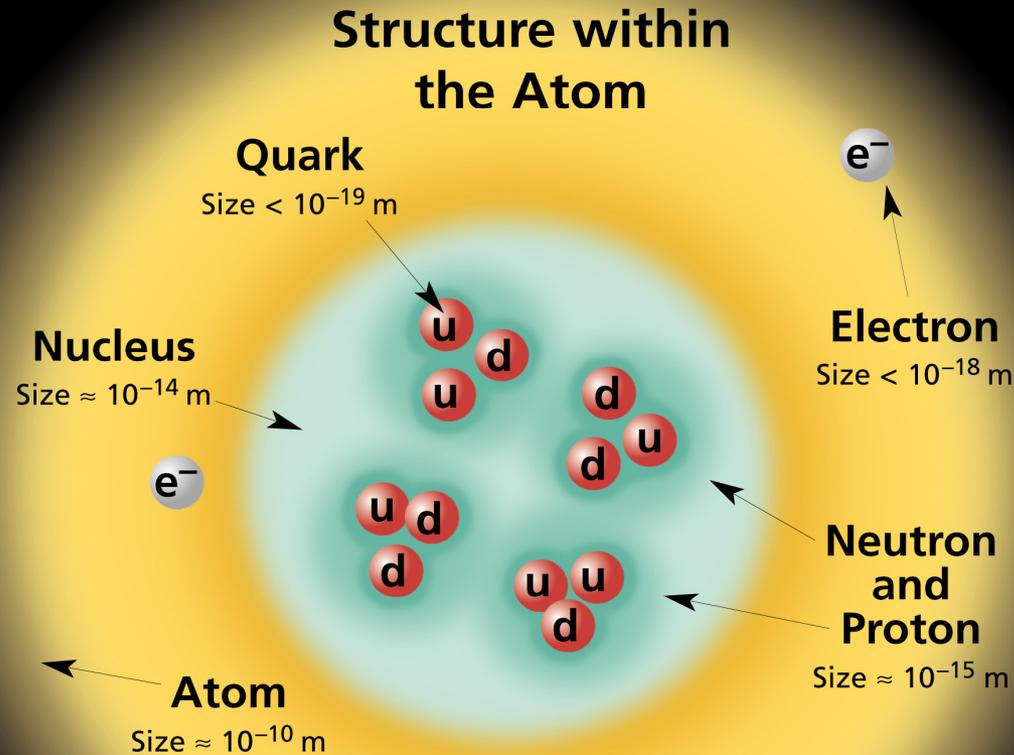
	\bar{u}	d	π^-
Q	-2/3	-1/3	-1
B	-1/3	+1/3	0
J	1/2	1/2	0
I	1/2	1/2	1
I_3	-1/2	-1/2	-1
P	-1	1	-1

$$M(\pi^-) = 139.57 \text{ MeV}$$

$$\tau(\pi^-) = 2.6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

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

АТОМЫ. ЯДРА. Кварки



If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

Лептоны

1897 – Д. Томсон

e^-

1937 – К. Андерсон

μ^-

1956 – Ф. Райнес, К. Козен

$\bar{\nu}_e$

ν_μ

1962 – Л. Ледерман

τ^-

1975 – М. Перл

ν_τ

e^- (0.511 МэВ)

μ^- (106 МэВ)

τ^- (1770 МэВ)

ν_e (<3 эВ)

ν_μ (<0.17 МэВ)

ν_τ (<18 эВ)

Фундаментальные частицы Стандартной Модели

 e^- μ^- τ^- ν_e ν_μ ν_τ u c t d s b

$8g, \gamma, W^+, W^-, Z$

Лептоны и кварки связаны в обычной материи. Атом

Лептоны

$$J = 1/2$$

$$e^{-}$$

0,511 МэВ

$$\mu^{-}$$

105,7 МэВ

$$\tau^{-}$$

1777 МэВ

$$\nu_e$$

< 3 эВ

$$\nu_\mu$$

< 0,19 МэВ

$$\nu_\tau$$

< 18,2 МэВ

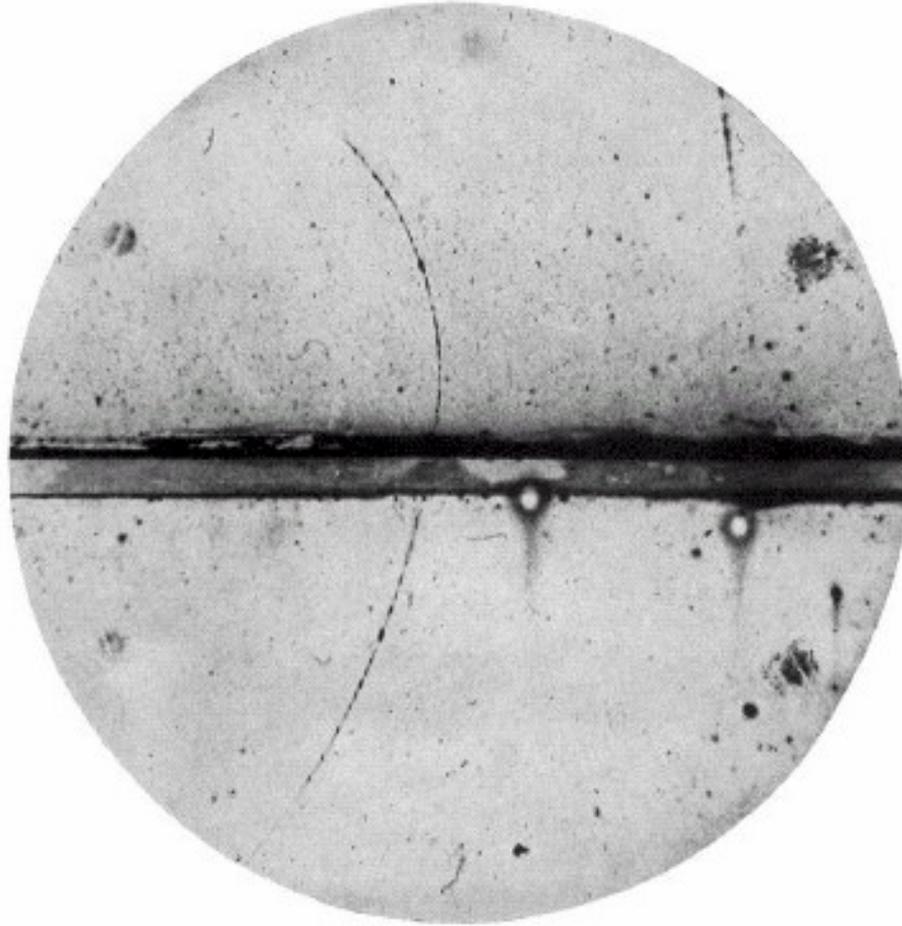
Лептоны – класс фундаментальных частиц Стандартной Модели, не участвующих в сильных взаимодействиях. Заряженные лептоны участвуют в электромагнитных и слабых взаимодействиях. Нейтрино — только в слабых.

Все лептоны обладают полуцелым спином $J = 1/2$ и в соответствии с этим являются фермионами.

1897 г. Дж. Томсон. Открытие электрона

Характеристика	Численное значение
Спин J	1/2
Масса $m_e c^2$, МэВ	$0.51099892 \pm 0.000000004$
Электрический заряд, Кулон	$-(1.60217653 \pm 0.000000014) \cdot 10^{-19}$
Магнитный момент, $e\hbar/2m_e c$	$1.001159652187 \pm 0.000000000000004$
Время жизни τ , лет	$> 4.6 \cdot 10^{26}$
Лептонное число L_e	+1
Лептонные числа L_μ, L_τ	0

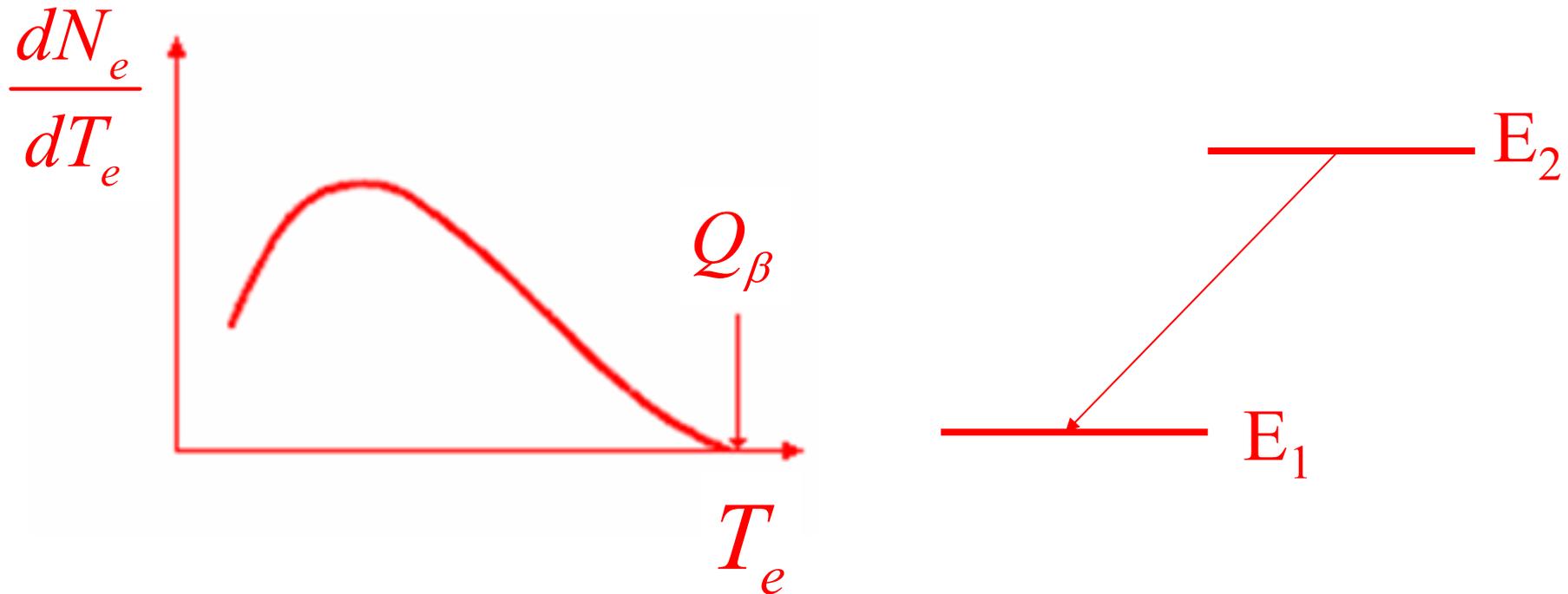
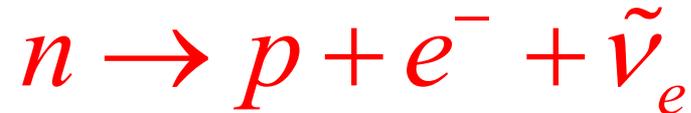
1932 г. Открытие позитрона



Позитрон, зарегистрированный в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле.

Нейтрино ν

1931 г. В.Паули выдвинул гипотезу о существовании нейтрино для объяснения спектра электронов β -распада

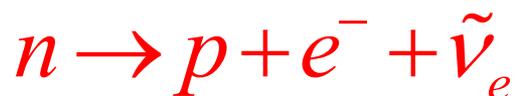


Алгебра частиц-античастиц $\tilde{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$

1956 г. Ф. Райнес, К. Козн зарегистрировали антинейтрино.

Электронное антинейтрино

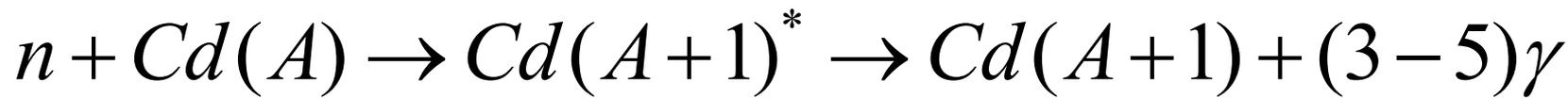
1953–1956. Ф. Райнес, К. Козн



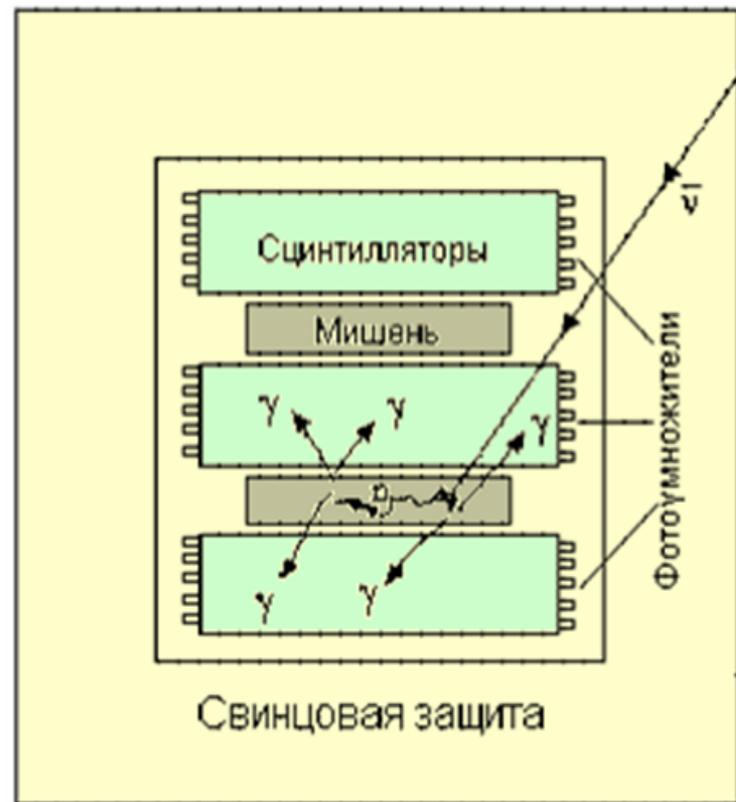
Первое свидетельство существования нейтрино



Источник антинейтрино – ядерный реактор



$$\sigma(\tilde{\nu} p) = 10^{-43} \text{ см}^2 \quad t = 200 \text{ часов. } N = 567. \text{ Фон} = 209$$



Пример

Определить длину L и время t пробега реакторного нейтрино в воде, $\sigma \approx 10^{-43} \text{ см}^2$.

Число нейтрино прошедших через слой вещества толщиной x ,

$$N(x) = N(0) \exp(-n\sigma x),$$

n — количество ядер вещества в единице объема.

L — длина, на которой поток антинейтрино уменьшается в e раз, то есть $L = 1/n\sigma$.

$n = \rho N_A / A$, N_A — число Авогадро, ρ — плотность вещества, A — молярная масса.

Для воды $\rho = 1 \text{ г/см}^3$, $A(\text{H}_2\text{O}) = 18$.

$$L = \frac{1}{n\sigma} = \frac{A}{\rho N_A \sigma} = \frac{18}{1 \text{ г/см}^3 \times 6 \cdot 10^{23} \times 10^{-43} \text{ см}^2} = 3 \cdot 10^{20} \text{ см} = 3 \cdot 10^{15} \text{ км.}$$

$$t = \frac{L}{c} = \frac{3 \cdot 10^{15} \text{ км}}{3 \cdot 10^5 \text{ км/с}} = 10^{10} \text{ с} \approx 320 \text{ лет,}$$

(1 год $\approx 3,156 \cdot 10^7 \text{ с}$).

Тождественны ли ν_e и $\tilde{\nu}_e$?

Если ν_e и $\bar{\nu}_e$ являются тождественными частицами, то должна наблюдаться реакция



Это следует из того, что имеют место реакции



Обе реакции ((*) и (**)) при тождественности ν_e и $\bar{\nu}_e$ должны иметь одинаковые характерные для нейтрино (антинейтрино) сечения $\approx 10^{-43}$ см².



Если процесс (*) возможен, то под действием потока антинейтрино от реактора один из нейтронов, входящих в состав ядра ${}^{37}\text{Cl}$, должен превращаться в протон, что приводит к образованию радиоактивного изотопа ${}^{37}\text{Ar}$ с периодом полураспада 35.04 суток. Регистрируя радиоактивность изотопа ${}^{37}\text{Ar}$, можно судить о возможности протекания реакции (*).

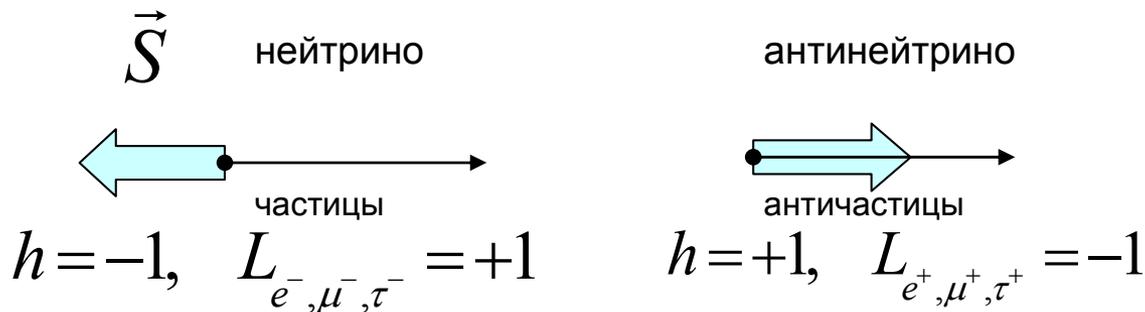
Образование изотопа ${}^{37}\text{Ar}$ не было обнаружено.

$\sigma < 2 \cdot 10^{-45}$ см². M (детектор) = 4000 литров

Спиральность

$$h = \frac{\vec{S} \cdot \vec{p}}{|\vec{S}| \cdot |\vec{p}|}.$$

Правополяризованная частица имеет положительную спиральность ($h = +1$), левополяризованная — отрицательную ($h = -1$).



Экспериментально показано, что спиральность нейтрино всегда отрицательна ($h_\nu = -1$), а спиральность антинейтрино всегда положительна ($h_{\bar{\nu}} = +1$). Нейтрино рождаются только в процессах слабого взаимодействия. Во всех наблюдаемых в природе слабых процессах с участием нейтрино участвуют только левополяризованные нейтрино. Правополяризованные нейтрино в наблюдаемых процессах не проявляются. Появление частиц с определенным значением поляризации обусловлено природой слабого взаимодействия.

1937 г. Открытие мюона

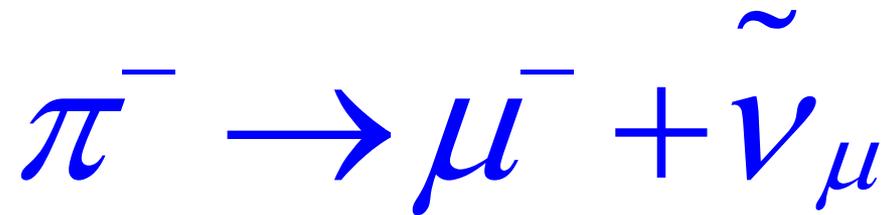
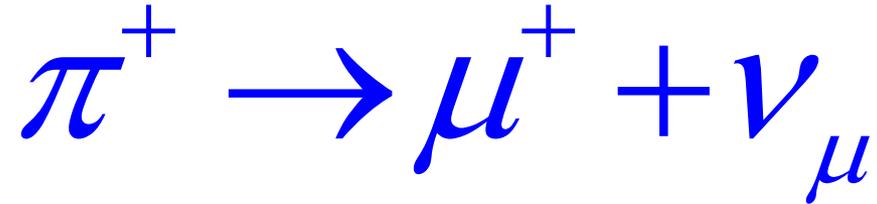
Характеристика	Численное значение
Спин J	1/2
Масса $m_\mu c^2$, МэВ	$105.6583692 \pm 0.00000094$
Электрический заряд	Равен заряду электрона
Магнитный момент, $e\hbar/2m_\mu c$	$1.0011659203 \pm 0.00000000007$
Время жизни, сек	$(2.19703 \pm 0.00004) \cdot 10^{-6}$
Лептонное число L_μ	+1
Лептонные числа L_e, L_τ	0



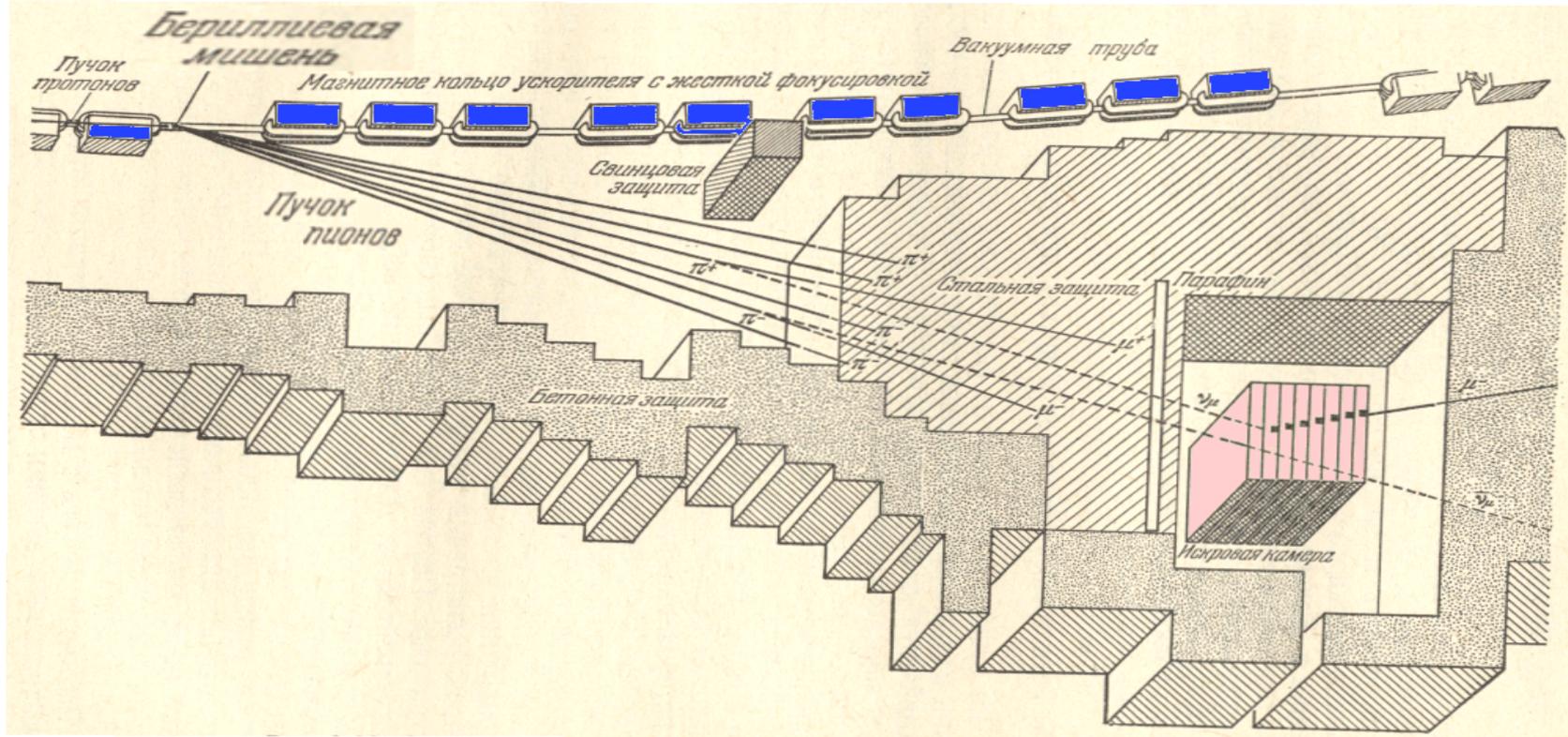
μ^- и μ^+ соответственно частица и античастица

1962 г. Открытие мюонного нейтрино

Мюонное нейтрино отличается от электронного нейтрино.



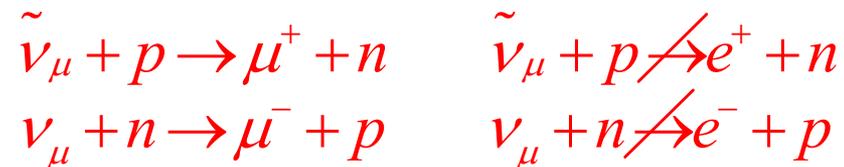
$$\nu_\mu \neq \nu_e \quad \tilde{\nu}_\mu \neq \tilde{\nu}_e$$



Мюонные нейтрино образовывались в результате распада π^+ , π^- - мезонов.



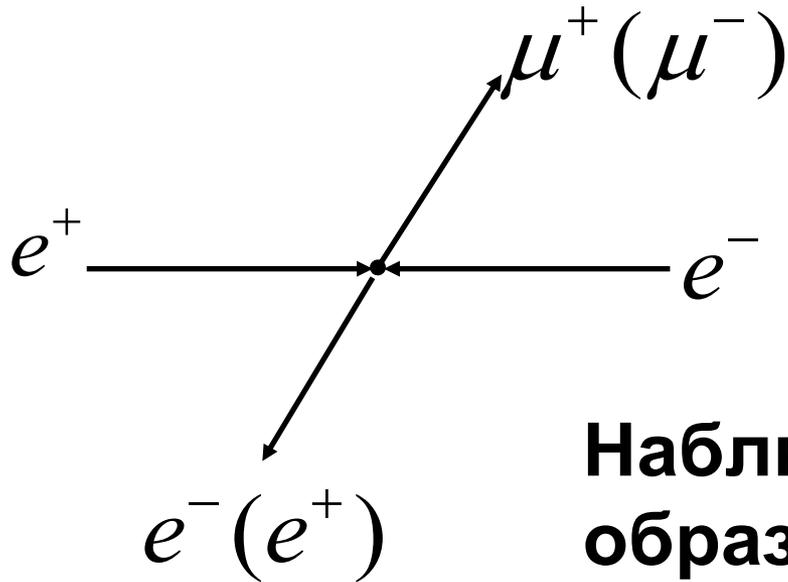
Мюонные нейтрино детектировались в искровых камерах по результатам их взаимодействия с протонами и нейтронами вещества искровых камер.



В искровых камерах наблюдались только положительно и отрицательно заряженные мюоны. Не было зарегистрировано ни одного случая образования электронов или позитронов.

1975 г. Открытие τ -лептона

τ -лептон и τ -нейтрино образуют
третье поколение лептонов



Наблюдались события
образования μ, e -пары
с противоположными знаками
заряженных частиц

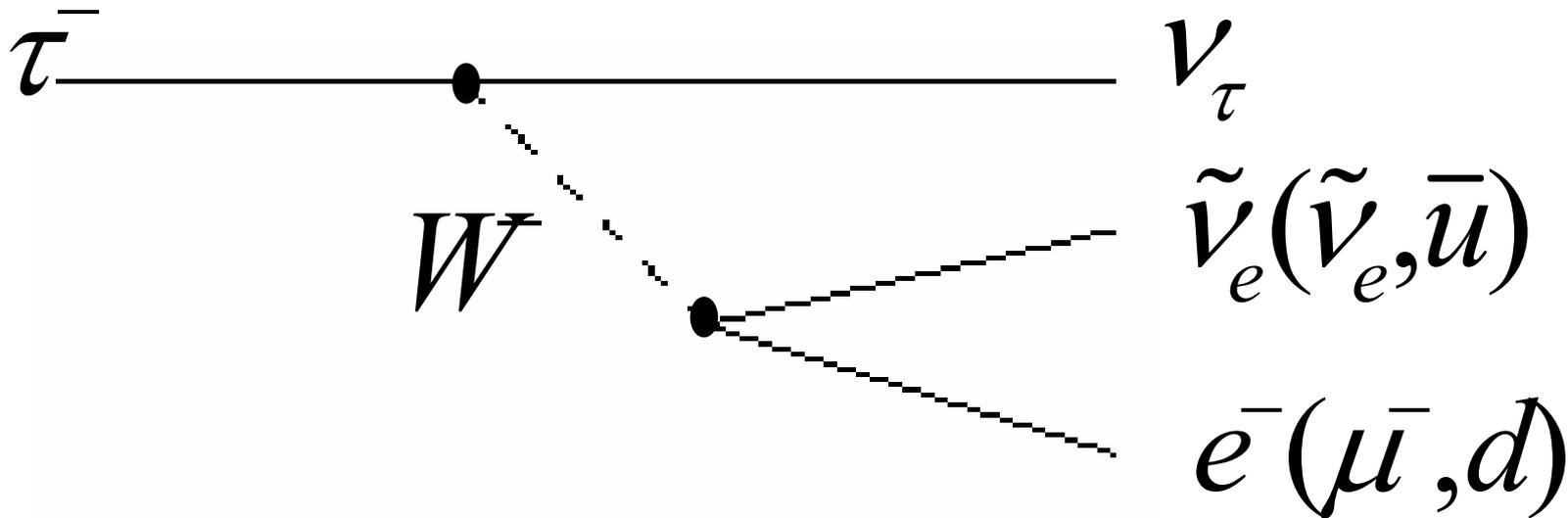
Наблюдение τ -лептона

τ^- -лептон имеет время жизни $\tau \approx 2.9 \cdot 10^{-13}$ с и поэтому, как правило, регистрируется по каналам его распада. Для наблюдения реакции $e^+ + e^- \rightarrow \tau^+ + \tau^-$.

$$e^+ + e^- \rightarrow \begin{cases} \tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau & \text{ИЛИ} & \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau \\ \tau^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\tau & \text{ИЛИ} & \mu^+ \nu_\mu \bar{\nu}_\tau \end{cases} \quad (*)$$

$e\mu$ -пары, имеющие противоположные электрические заряды, являются наиболее подходящими для наблюдения τ -лептонов, так как в этом случае не образуются адроны, которые трудно регистрировать и интерпретировать. Нейтрино и антинейтрино, образующиеся в реакции (*), непосредственно не регистрируются.

Распад τ -лептона



τ^- -лептон в результате слабого взаимодействия, которое происходит под действием W^- -бозона, превращается в τ -нейтрино ν_τ . W^- -бозон затем распадается, превращаясь в одну из следующих пар частиц:

- электрон e^- , электронное антинейтрино $\bar{\nu}_e$,
- отрицательно заряженный мюон μ^- , мюонное антинейтрино $\bar{\nu}_\mu$,
- кварк d , антикварк \bar{u} .

τ -ЛЕПТОН

Характеристика	Численное значение
Спин J	1/2
Масса $m_\tau c^2$, МэВ	1776.99±0.28
Электрический заряд	Равен заряду электрона
Магнитный момент, $e\hbar/2m_\tau c$	1±0.06
Время жизни, сек	$(2.906\pm 0.011)\cdot 10^{-13}$
Лептонное число L_τ	+1
Лептонные числа L_e, L_μ	0

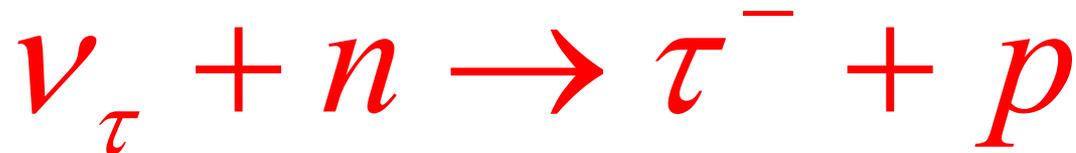
$$\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau \quad 17.84\%$$

$$\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau \quad 17.36\%$$

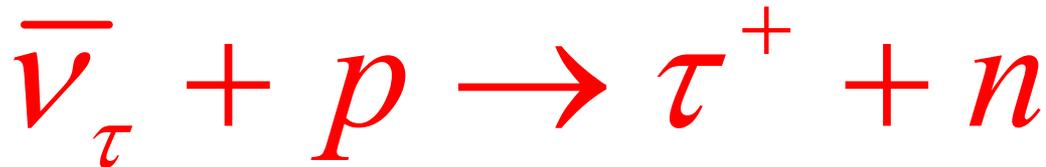
$$\tau^- \rightarrow \text{адроны} + \nu_\tau \quad 63\%$$

τ -нейтрино

Тау-нейтрино и соответствующее антинейтрино были впервые зарегистрированы в 2000 г. на нейтринном детекторе DONUT (Direct Observation of the NU Tau) в реакциях:



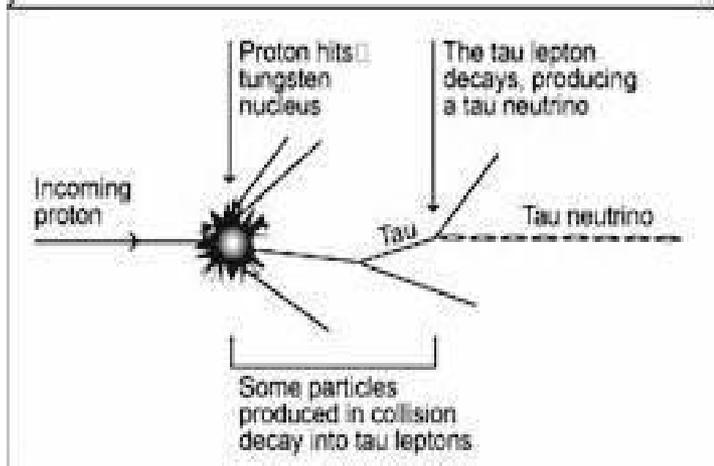
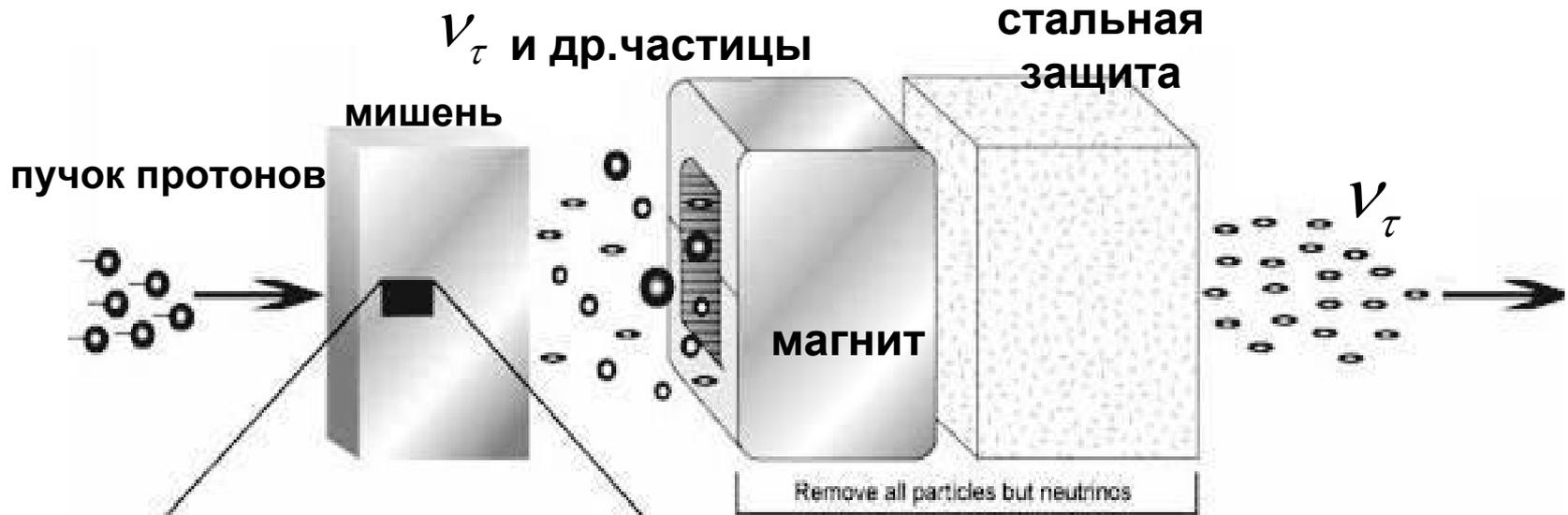
(*)



Нейтринный детектор DONUT состоял из железных пластин, между которыми располагались слои фотоэмульсии.

τ - нейтрино

DONUT (Direct Observation of the ν Tau)

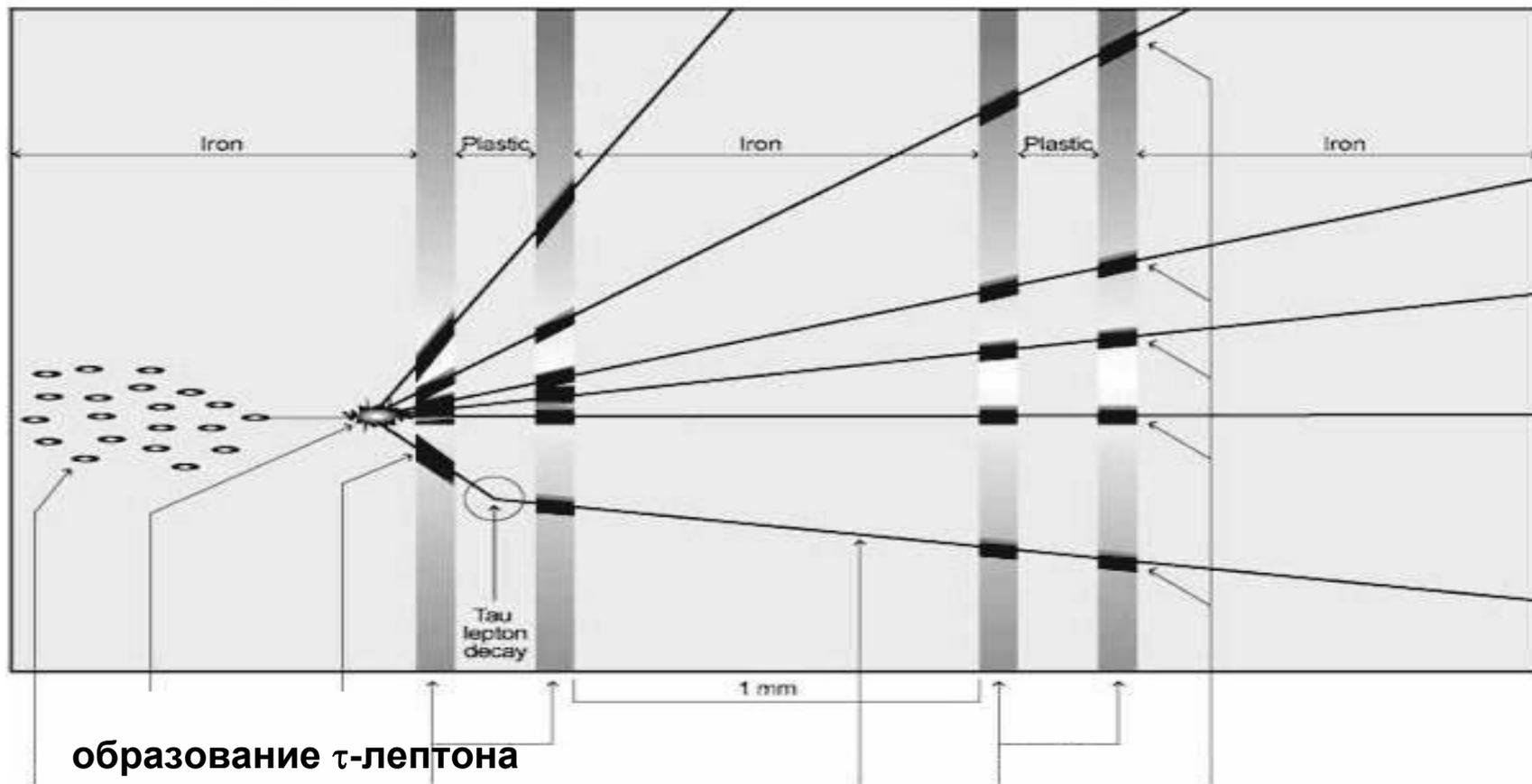


τ - нейтрино

DONUT (Direct Observation of the NU Tau)



Detecting a Tau Neutrino



образование τ -лептона

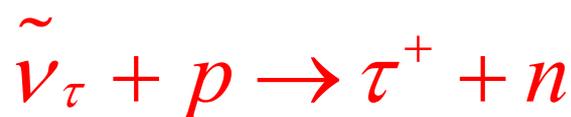
пучок τ -нейтрино

след τ -лептона в эмульсии

В результате взаимодействия ν_τ с железом образовывались τ -лептоны, которые оставляли следы в фотоэмульсии



(*)



В результате анализа 10^7 событий было надёжно зарегистрировано 4 события (*).

τ -нейтрино

Основные характеристики тау-нейтрино

Характеристика	Численное значение
Спин J, \hbar	1/2
Масса $m_{\nu_\tau} c^2, \text{ МэВ}$	< 18.2
Электрический заряд	0
Магнитный момент, $e\hbar/2m_e c$	$< 3.9 \cdot 10^{-7}$
Время жизни	не измерено
Лептонное число L_τ	+1
Лептонные числа L_e, L_μ	0

Лептонные числа

	L_e	L_μ	L_τ		L_e	L_μ	L_τ		L_e	L_μ	L_τ
e^-	+1	0	0	μ^-	0	+1	0	τ^-	0	0	+1
ν_e	+1	0	0	ν_μ	0	+1	0	ν_τ	0	0	+1
e^+	-1	0	0	μ^+	0	-1	0	τ^+	0	0	-1
$\tilde{\nu}_e$	-1	0	0	$\tilde{\nu}_\mu$	0	-1	0	$\tilde{\nu}_\tau$	0	0	-1

Почему e^- и e^+ являются стабильными частицами?
Это следует из закона сохранения электрического заряда.

Лептонные числа

Каждому поколению лептонов следует приписать свой лептонный заряд, соответственно L_e , L_μ , L_τ . Этот заряд, как и обычный электрический заряд, является **сохраняющимся** и **аддитивным**, т. е. заряд системы лептонов равняется сумме лептонных зарядов отдельных лептонов и должен быть одинаковым до и после завершения любого процесса.

Закон сохранения L_e , L_μ , L_τ

В процессах, происходящих в замкнутой системе в результате сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий, каждое лептонное число L_e , L_μ , L_τ сохраняется порознь.

Лептонные числа L_e, L_μ, L_τ

Во всех процессах происходящих в замкнутой системе в результате сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий лептонные числа L_e, L_μ, L_τ сохраняются порознь. Поэтому

наблюдаются процессы

$$\tilde{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n$$

$$\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\mu$$

$$\tau^- \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\tau$$

$$\tau^- \rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu + \nu_\tau$$

не наблюдаются процессы

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

$$\nu_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n$$

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

$$w(\mu^- \rightarrow e^- + \gamma)/w(\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu) < 10^{-11},$$

$$w(\mu^- \rightarrow e^- + e^- + e^+ \gamma)/w(\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu) < 10^{-12},$$

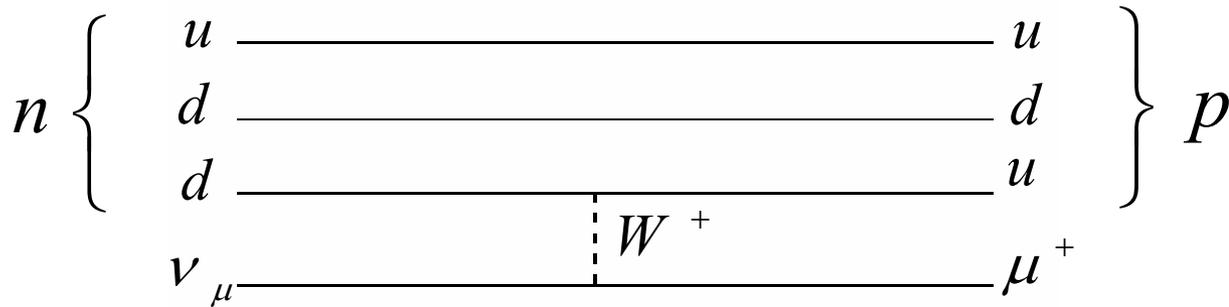
$$w(\tau^- \rightarrow e^- + \gamma)/w(\tau^- \rightarrow \text{все моды распада}) < 3 \cdot 10^{-6},$$

$$w(\tau^- \rightarrow \mu^- + \gamma)/w(\tau^- \rightarrow \text{все моды распада}) < 10^{-6}.$$

Пример

$$\nu_{\mu} + n \rightarrow \mu^{-} + p$$

L_e	0	0	0	0
L_{μ}	+1	0	+1	0
L_{τ}	0	0	0	0



Процесс разрешён

$$\nu_{\mu} + p \rightarrow \mu^{+} + n$$

L_e	0	0	0	0
L_{μ}	+1	0	-1	0
L_{τ}	0	0	0	0

Процесс **запрещён**