

# **ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ**

## Общие сведения об элементарных частицах

Дать строгое определение понятия элементарных частиц оказывается затруднительным. В качестве первого приближения можно понимать под *элементарными частицами такие микрочастицы, внутреннюю структуру которых на современном уровне физики нельзя представить как объединение других частиц.*

*Во всех наблюдавшихся до сих пор явлениях каждая такая частица ведёт себя как единое целое.* Элементарные частицы могут превращаться друг в друга (протон в нейтрон и наоборот,  $\gamma$ -квант в  $e^-e^+$  и наоборот и т.д.).

В настоящее время *общее число известных элементарных частиц* (вместе с античастицами) приближается к **400**.

Пока мы встречались только с  
*электроном  $e^-$*  (позитроном  $e^+$ ),  
*протоном  $p$* ,  
*нейтроном  $n$* ,  
*фотоном  $\gamma$*

Эти частицы стабильны или квазистабильны, и они существуют в природе в свободном или слабосвязанном состоянии.

Для описания свойств отдельных элементарных частиц вводится *целый ряд физических величин*, значениями которых они и различаются.

Наиболее известными среди них являются *масса, среднее время жизни, спин, Электрический заряд, магнитный момент.*

Почти все остальные элементарные частицы крайне нестабильны и образуются во **вторичном космическом излучении** или получаются в лаборатории с помощью ускорителей, а затем быстро распадаются, превращаясь в конечном итоге в стабильные частицы.

# КОСМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Развитие физики элементарных частиц тесно связано с изучением **космического излучения** — излучения, приходящего на Землю практически изотропно со всех направлений космического пространства.

Выяснено, что интенсивность космического излучения быстро растет с высотой, достигает максимума, затем уменьшается и с  $h = 50$  км остается практически постоянной.

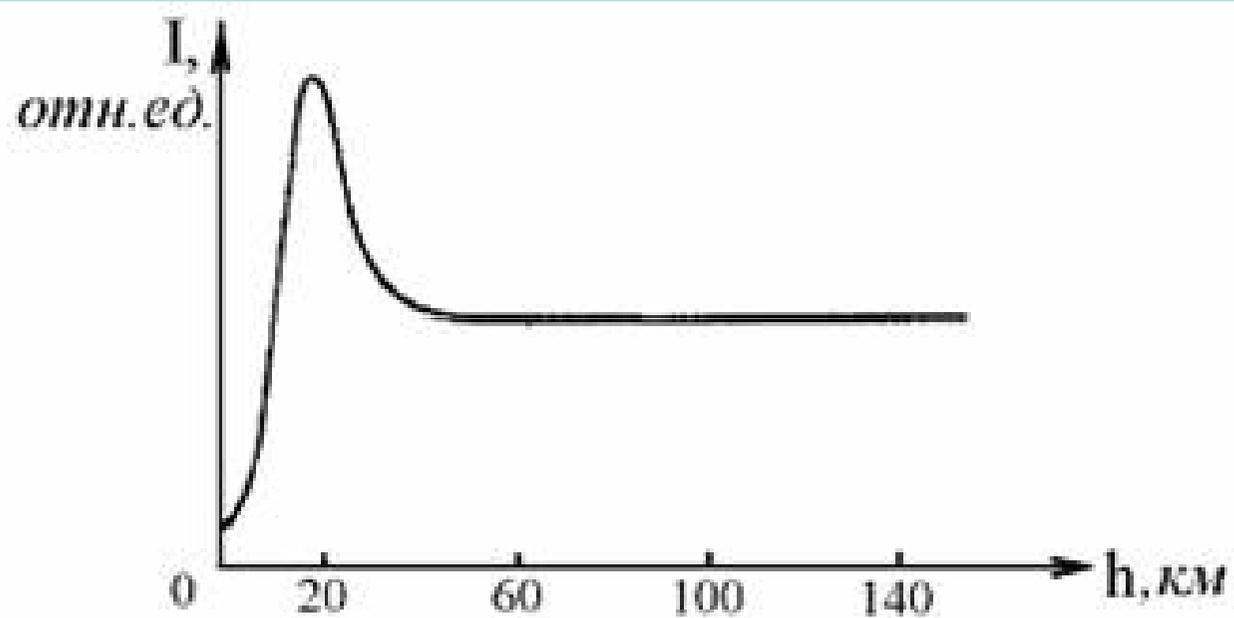


Рис. 1. Кривая зависимости интенсивности космического излучения от высоты над Землей

# КОСМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

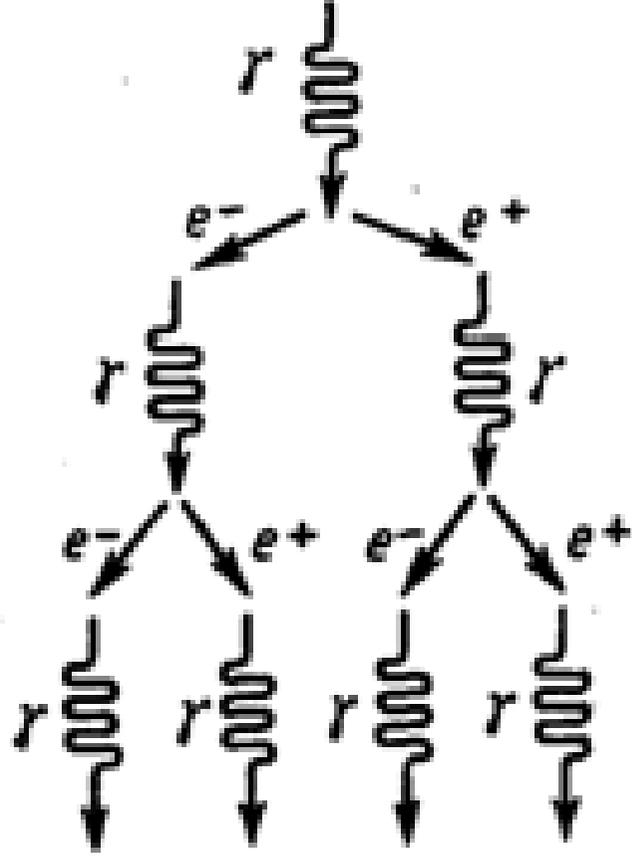
1). **Первичное излучение:** поток элементарных частиц высокой энергии, причем более 90% из них составляют протоны с энергией примерно  $10^9$ — $10^{13}$  эВ, около 7% - альфа-частицы, и небольшая доля (около 1%) приходится на ядра более тяжелых элементов ( $Z > 20$ ). Это излучение имеет галактическое происхождение.

2). **Вторичное излучение:** образуется в результате взаимодействия первичного космического излучения с ядрами атомов земной атмосферы. Во вторичном космическом излучении встречаются практически все известные элементарные частицы

## КОСМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

В составе вторичного космического излучения можно выделить два компонента: мягкий (сильно поглощается свинцом) и жесткий (обладает в свинце большой проникающей способностью).

1). **Мягкий компонент:** электронно-позитронно-фотонный (или каскадный) ливень: В космическом пространстве всегда имеются  $\gamma$ -кванты с большой энергией которые в поле атомных ядер превращаются в электронно-позитронные пары. Образовавшиеся таким образом электроны и позитроны, тормозясь, в свою очередь, создают  $\gamma$ -кванты, энергия которых достаточна для образования новых электронно-позитронных пар и т. д.



# КОСМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

## 2). Жесткий компонент: МЮОНЫ

Японский физик Х. Юкава (1907—1981), изучая природу ядерных сил, выдвинул в 1935 г. гипотезу о существовании частиц с массой, в 200—300 раз превышающей массу электрона. Эти частицы должны, согласно Юкаве, выполнять роль носителей ядерного взаимодействия, подобно тому, как фотоны являются носителями электромагнитного взаимодействия.

**мюоны** ( $\mu^-$ ,  $\mu^+$ ) **МЮОНЫ**

Заряд мюонов равен элементарному заряду  $e$ .

Масса мюонов (оценивается по производимому ими ионизационному действию) равна **206,8  $m_e$** .

Время жизни –  **$2.2 \times 10^{-6}$  с.**

Исследования изменения интенсивности жесткого компонента вторичного космического излучения с высотой показали, что на меньших высотах потоки мюонов менее интенсивны. Это говорит о том, что мюоны претерпевают самопроизвольный распад, **являясь**, таким образом, **нестабильными частицами**.

# МЮОНЫ

Распад мюонов происходит по следующим схемам: .

$$\mu^{-} \rightarrow {}_{-1}^0 e + {}_0^0 \tilde{\nu}_e + {}_0^0 \nu_{\mu}$$

$$\mu^{+} \rightarrow {}_{+1}^0 e + {}_0^0 \nu_e + {}_0^0 \tilde{\nu}_{\mu}$$

Здесь  ${}_0^0 \nu_{\mu}$  и  ${}_0^0 \tilde{\nu}_{\mu}$  так называемые «мюонные»

нейтрино и антинейтрино;

${}_0^0 \nu_e$  и  ${}_0^0 \tilde{\nu}_e$  соответственно «электронные»

нейтрино и антинейтрино;

## МЮОНЫ

Из схем распада выяснено, что **спины мюонов**, как и электрона, должны быть равны  $\frac{1}{2}$ .

Дальнейшие эксперименты привели к выводу, что **мюоны** не взаимодействуют или взаимодействуют весьма слабо с атомными ядрами, иными словами, **являются ядерно-неактивными частицами**. Следовательно, отождествить мюоны с частицами, которые, согласно Х. Юкаве, являлись бы носителями ядерного взаимодействия, не удалось, так как такие частицы должны интенсивно взаимодействовать с ядрами. В 1947 г. была обнаружена **частица**, обладающая свойствами, предсказанными Юкавой, **распадающаяся на мюон и нейтрино**.

## МЕЗОНЫ

С. Пауэлл (1903—1969; английский физик), подвергая на большой высоте ядерные фотоэмульсии действию космических лучей (1947), обнаружил ядерно-активные частицы — так называемые  $\pi$ -мезоны (от греч. «мезос» — средний), или пионы. В этом же году пионы были получены искусственно при бомбардировке мишеней из Be, C и Si альфа-частицами, ускоренными в синхроциклотроне до 300 МэВ.

$\pi$ -мезоны сильно взаимодействуют с нуклонами и атомными ядрами и, по современным представлениям, именно они обуславливают существование ядерных сил.

## МЕЗОНЫ

**$\pi$  - мезоны** или пионы ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$ ),

Заряд мезонов равен элементарному заряду **e**, или нейтральный.

Масса  $\pi^+$  и  $\pi^-$  мезонов одинакова и равна **273,1 ме.**

Масса  $\pi^0$  мезона равна **264,1 ме.**

Время жизни  $\pi^+$  и  $\pi^-$  мезонов – 2.6 x **10-8** с,

Для  $\pi^0$  мезона - 0.8 x **10-16** с

## МЕЗОНЫ

Распад заряженных пионов происходит по следующим схемам: .

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + {}^0_0 V_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + {}^0_0 \tilde{V}_\mu$$

Нейтральный пион распадается на два  $\gamma$ -кванта

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$$

Из схем распада следует, что **спины пи-мезонов должны быть либо целыми, либо равны нулю.**

# **Виды взаимодействий**

## Виды взаимодействий

Для того чтобы объяснить свойства и поведение элементарных частиц, их приходится наделять, кроме массы, электрического заряда, и типа, рядом дополнительных, характерных для них величин (квантовых чисел).

Согласно современным представлениям, в природе осуществляется **четыре** типа фундаментальных взаимодействий между элементарными частицами:

*сильное,*

*электромагнитное,*

*слабое,*

*гравитационное* (они перечислены в порядке убывания интенсивности).

*Интенсивность взаимодействия принято характеризовать константой взаимодействия  $\alpha$* , которая представляет собой безразмерный параметр, определяющий вероятность процессов, обусловленных данным видом взаимодействия.

Тип взаимодействия	Механизм обмена	Интенсивность, $\alpha$	Радиус действия $r$ , м	Характерное время жизни, $\tau$ , с
Сильное	глюонами	$\approx 1$	$\approx 10^{-15}$	$\approx 10^{-23}$
Электромагнитное	фотонами	$\approx 1/137$	$\infty$	$\approx 10^{-18}$
Слабое	промежуточные бозоны	$\approx 10^{-10}$	$\approx 10^{-18}$	$\approx 10^{-13}$
Гравитационное	гравитоны	$\approx 10^{-38}$	$\infty$	?

## *Сильное взаимодействие.*

*Этот вид взаимодействия обеспечивает связь нуклонов в ядре.*

**Константа** сильного взаимодействия имеет величину порядка **1**. Наибольшее расстояние, на котором проявляется сильное взаимодействие, (радиус действия), составляет примерно  $10^{-15}$  м.

## <sup>x</sup> *Электромагнитное взаимодействие.*

Константа взаимодействия  $\alpha = 1/137 \approx 10^{-2}$  (константа тонкой структуры). Радиус действия не ограничен ( $r=\infty$ ).

Оно характерно для всех элементарных частиц, за исключением нейтрино, антинейтрино и фотона. Электромагнитное взаимодействие, в частности, ответственно за существование атомов и молекул, обуславливая взаимодействие в них положительно заряженных ядер и отрицательно заряженных электронов.

## *Слабое взаимодействие.*

Это взаимодействие ответственно за все виды  $\beta$ -распада ядер (включая  $e$  – захваты), за распады элементарных частиц, а также за все процессы взаимодействия нейтрона с веществом.

Константа взаимодействия равна порядку величины  $10^{-10} \div 10^{-14}$ . Слабое взаимодействие, как и сильное, является короткодействующим.

## *Гравитационное взаимодействие.*

**Константа** взаимодействия имеет значение порядка  $10^{-38}$ . Радиус действия не ограничен ( $r=\infty$ ). Гравитационное взаимодействие является универсальным, ему подвержены все без исключения элементарные частицы. Однако в процессах микромира гравитационное взаимодействие ощутимой роли не играет.

# **Краткая классификация и свойства частиц**

## Краткая классификация и свойства частиц

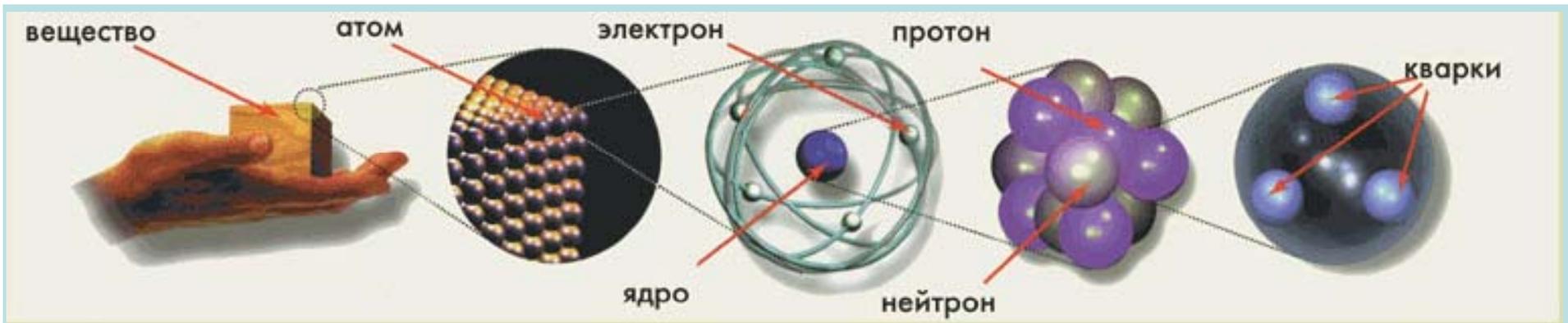
Элементарные частицы обычно подразделяются на *три класса*.

В одном из них только одна частица – *фотон*.

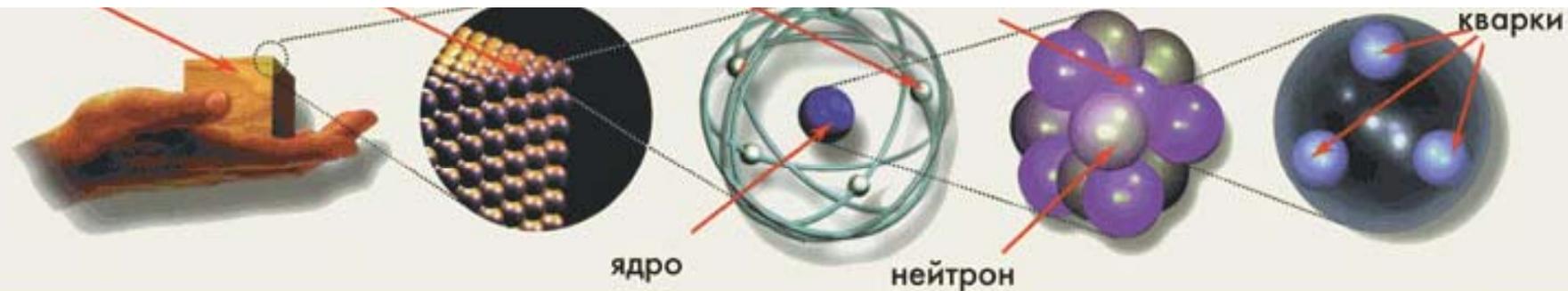
Второй класс образуют *лептоны*,

третий – *адроны*.

Помимо этих классов частиц предполагается существование ещё одного класса частиц – *гравитонов* (квантов гравитационного поля).



**ФОТОНЫ,  $\gamma$**  (*кванты электромагнитного поля*), участвуют в электромагнитных взаимодействиях, но **не обладают сильным и слабым взаимодействием.**



Фундаментальные фермионы

## ЛЕПТОНЫ

Электрический заряд	-1		0	
	Частицы окружающего мира принадлежат этой группе	<b>Электрон</b> переносит электрический ток  $M = 0,511 \text{ МэВ}/c^2$ 	<b>Электронное нейтрино</b> играет фундаментальную роли при горении Солнца. Каждую секунду сквозь нас пролетают миллиарды этих частиц 	
Эти частицы существовали в первый момент после "Большого взрыва".	<b>Мюон</b> аналог электрона Время жизни - 2 микросекунды  $M = 106 \text{ МэВ}/c^2$ 	<b>Мюонное нейтрино</b> образуется при рождении и распаде мюонов  $M < 0,2 \text{ МэВ}/c^2$ 		
Теперь их можно обнаружить в космосе и на ускорителях частиц	<b>Тау</b> аналог электрона Время жизни - доли пикосекунды  $M = 1777 \text{ МэВ}/c^2$ 	<b>Тау нейтрино</b> образуется при рождении и распаде тау лептонов Открыто в 1975 г.  $M < 20 \text{ МэВ}/c^2$ 		

1). участвуют **только в электромагнитном и слабом взаимодействиях.**

2) им соответствуют античастицы

1. **ЛЕПТОНЫ** (греч. «лептос» – лёгкий).

Это легкие частицы, не обладающие сильным взаимодействием:

**электроны**  $(e^-, e^+)$ ,

**мюоны**  $(\mu^-, \mu^+)$ ,

**таоны**  $(\tau^-, \tau^+)$ ,

а также **электронные нейтрино**  $(\nu_e, \bar{\nu}_e)$ ,

**мюонный нейтрино**  $(\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu)$  и

**тау нейтрино**  $(\nu_\tau, \bar{\nu}_\tau)$ .

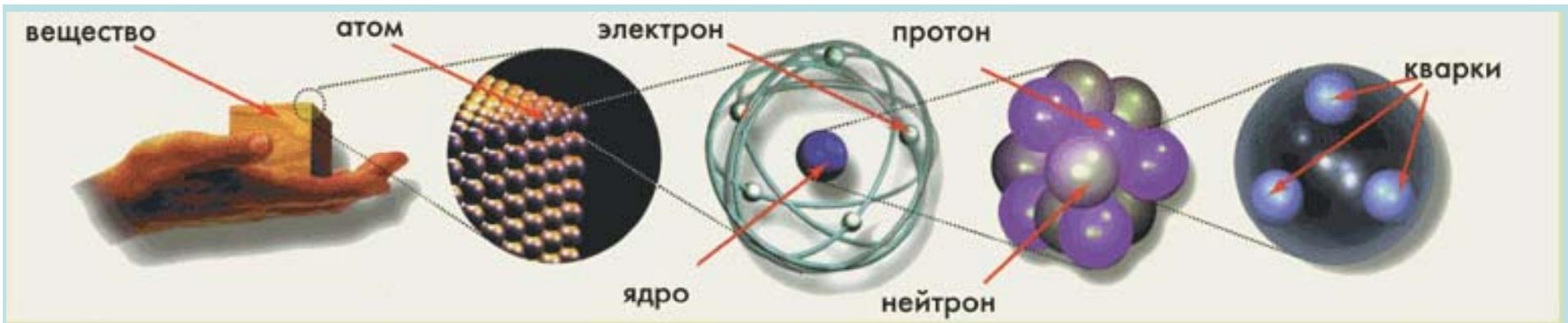
**Все лептоны** имеют **спины**, равные  $1/2\hbar$ , и следовательно **являются фермионами**.

Все лептоны обладают слабым взаимодействием. Те из них, которые имеют электрический заряд (т.е. мюоны и электроны), обладают также и электромагнитным взаимодействием.

Семейство 1	
Частица	Масса, МэВ Заряд
Электрон	0,00054 - 1
Электронно е нейтрино	<10 <sup>-8</sup> 0
U - кварк	0,0047 + 2/3
D - кварк	0,0074 - 1/3

Семейство 2	
Частица	Масса, МэВ Заряд
Мюон	0,11 - 1
Мюонное нейтрино	0,0003 0
C - кварк	1,6 + 2/3
S - кварк	0,16 - 1/3

Семейство 3	
Частица	Масса, МэВ Заряд
Таон	1,9 - 1
Таонное нейтрино	<0,033 0
T - кварк	189,0 + 2/3
B - кварк	5,2 - 1/3



***АДРОНЫ*** (от греч. «адрос» — крупный, сильный). Обладают сильным взаимодействием наряду с электромагнитным и слабым. К ним относятся протон, нейтрон, пи-мезоны (пионы) и К-мезоны (каоны).

## АДРОНЫ: К-МЕЗОНЫ

*К - мезоны* или каоны ( $K^+$ ,  $K^-$ ,  $K^0$ ,  $K^{\prime 0}$ )

Заряд мезонов равен элементарному заряду  $e$  или нейтральный.

Масса  $K$ -мезонов равна **970  $m_e$** .

Время жизни –  $10^{-8}$  -  $10^{-10}$  с

## **АДРОНЫ: ИЗОСПИН**

**Характерным признаком сильных взаимодействий является зарядовая независимость ядерных сил.**

**Поэтому если бы в ядре осуществлялось только сильное взаимодействие, то зарядовая независимость ядерных сил привела бы к одинаковым значениям масс нуклонов (протонов и нейтронов) и всех пи-мезонов. Различие в массах нуклонов и соответственно пи-мезонов обусловлено электромагнитным взаимодействием: энергии взаимодействующих заряженных и нейтральных частиц различны, поэтому и массы заряженных и нейтральных частиц оказываются неодинаковыми.**

## АДРОНЫ:ИЗОСПИН

Важным следствием зарядовой независимости является то, что **близкие по массе частицы** можно рассматривать как **различные зарядовые состояния одной и той же частицы**. Так, нуклон образует дублет (нейтрон, протон), пи-мезоны— триплет, *K*-мезоны— квартет и т.д. Подобные группы «похожих» элементарных частиц, одинаковым образом участвующих в сильном взаимодействии, имеющие близкие массы и отличающиеся зарядами, называют **изотопическими мультиплетами**.

## АДРОНЫ: ИЗОСПИН

Каждый изотопический мультиплет характеризуют **изотопическим спином (изоспином)** — одной из внутренних характеристик адронов, определяющей число  $n$  частиц в изотопическом мультиплете:

$$n = 2I + 1$$

Тогда изоспин нуклона  $I=1/2$ ,  
изоспин пи-мезона  $I=1$ ,  
изоспин К-мезона  $I=3/2$ , и т.д.

**ВАЖНО:** во всех процессах, связанных с превращениями элементарных частиц, обусловленных зарядово-независимыми сильными взаимодействиями, выполняется **закон сохранения изотопического спина.**

# **Странность частиц**

## Странность частиц

В начале 50-ых годов XX в. было обнаружено, что некоторые из недолго до того открытых частиц, а именно  $K, \Lambda$ , ведут себя странно в двух отношениях.

**Во-первых**, они всегда рождаются парами. Например, реакция  $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$

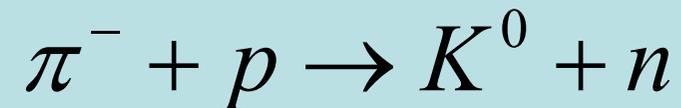
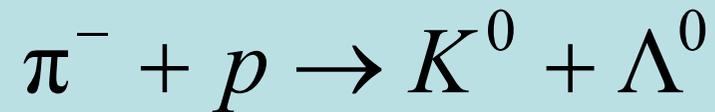
проходит с вероятностью, близкой к 1, а реакция  $\pi^- + p \rightarrow K^0 + n$  никогда не наблюдалась. Это казалось тем более странным, что вторая реакция не нарушала ни одного из известных законов сохранения и для её осуществления было достаточно энергии.

**Во-вторых**, хотя рождение *странных* частиц (как их стали называть) было обусловлено сильным взаимодействием (т.е. происходило с большой вероятностью), их распады не имели характерного для сильного взаимодействия времени жизни, хотя они и распадались на сильно взаимодействующие частицы например,

$$K \rightarrow 2\pi, \quad \Sigma^+ \rightarrow p^+ \pi^0.$$

Время жизни странных частиц оказалось в пределах от  $10^{-10}$  до  $10^{-8}$ с, что характерно для слабого взаимодействия

Для объединения этих фактов были введены **новое квантовое число *странность*** и **новый закон сохранения (сохранности)**.



В первой реакции странность частиц до реакции совпадает со странностью частиц после реакции, а во второй реакции странность не сохраняется и поэтому эта реакция не идет.

Для объяснения особенностей распада странных частиц предполагается, что странность сохраняется в сильном взаимодействии и не сохраняется в слабом взаимодействии. Следовательно, хотя закон сохранения запрещает распад странных частиц на более лёгкие не странные частицы, за счёт сильного взаимодействия, такие распады происходят за счёт слабого взаимодействия. Но слабые распады происходят гораздо медленнее, что соответствует большим временам жизни.

**Сохранение странности оказалось первым примером «частично сохраняющейся величины»:**  
**странность сохраняется в сильном и не сохраняется в слабом взаимодействии.**

# **Кварки и очарование**

## Кварки и очарование

Почти все наблюдаемые частицы принадлежат одному из двух семейств: лептонам и адронам.

**Основное различие** между ними состоит в том, что **лептоны не участвуют** в сильном взаимодействии, а **адроны участвуют**.

**Другое важное различие** состоит в том, что в 60-ых годах были известны четыре лептона ( $e^-$ ,  $\mu^-$ ,  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ) и их античастицы и более сотни адронов.

Лептоны считаются элементарными частицами, т.к. они, насколько известно, не распадаются на составные части, не обнаруживают никакой внутренней структуры и не имеют определённого размера.

Попытки определить размеры лептонов показали, что верхний предел составляет  $10^{-18}$  м.

С другой стороны, адроны оказались более сложными частицами.

Эксперименты показали, что адроны обладают внутренней структурой, и их обилие наводит на мысль, что **адроны совсем не элементарны.**

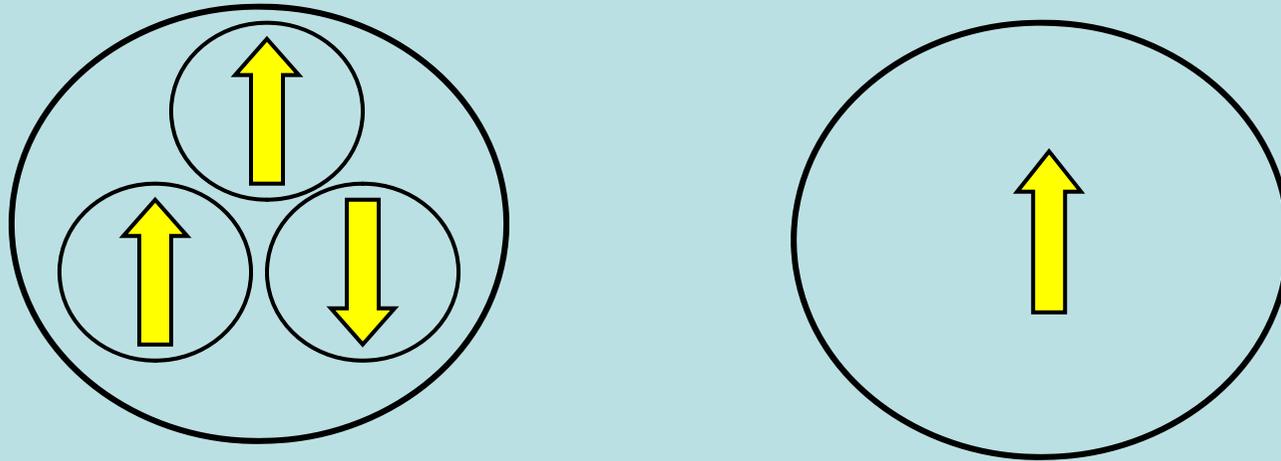
Для решения этой проблемы М. Гелл-Манн и Г. Цвейг в 1963 г. независимо высказали идею согласно которой все известные адроны не элементарны, а построены из **трёх** более фундаментальных точечных объектов, названных ***кварками***.

Согласно модели Гелл-Манна —Цвейга, все известные в то время адроны (**мезоны и барионы**) можно было построить, постулировав существование трех типов кварков (**u, d, s**) и соответствующих антикварков (**u', d', s'**), если им приписать характеристики, указанные в таблице (следующий слайд)

Кварк (антикварк)	Электрическ ий заряд в единицах $e$	Барионное число $B$	Спин, в единицах $\hbar$	Странность $S$
$u(\tilde{u})$	$+\frac{2}{3}(-\frac{2}{3})$	$+\frac{1}{3}(-\frac{1}{3})$	$\frac{1}{2}$	0
$d(\tilde{d})$	$-\frac{1}{3}(+\frac{1}{3})$	$+\frac{1}{3}(-\frac{1}{3})$	$\frac{1}{2}$	0
$s(\tilde{s})$	$-\frac{1}{3}(+\frac{1}{3})$	$+\frac{1}{3}(-\frac{1}{3})$	$\frac{1}{2}$	-1(+1)

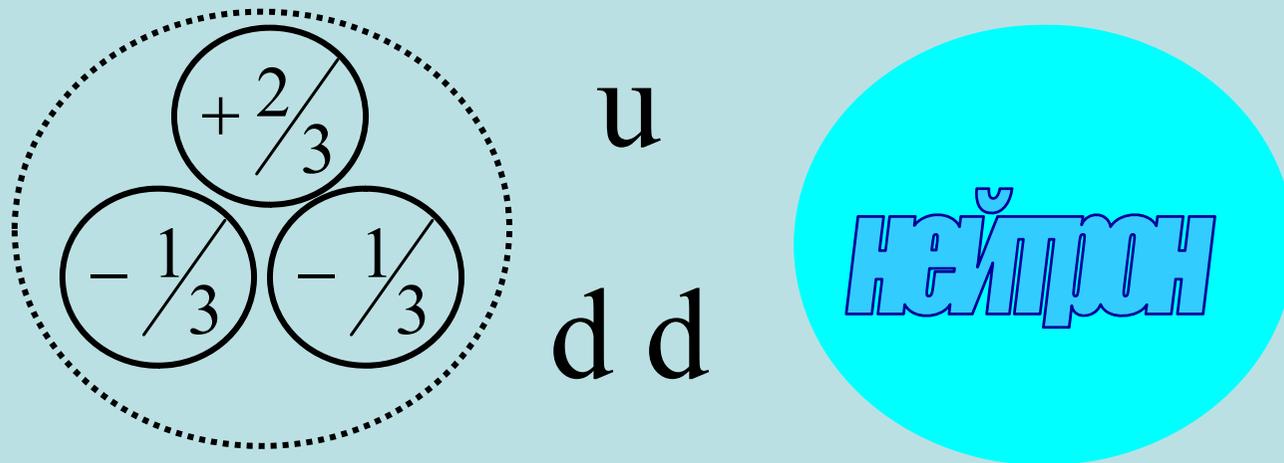
Адроны строятся из кварков следующим образом: мезоны состоят из пары кварк — антикварк, барионы — их трех кварков (антибарион — из трех антикварков).

# Привычное свойство - спин: векторное сложение



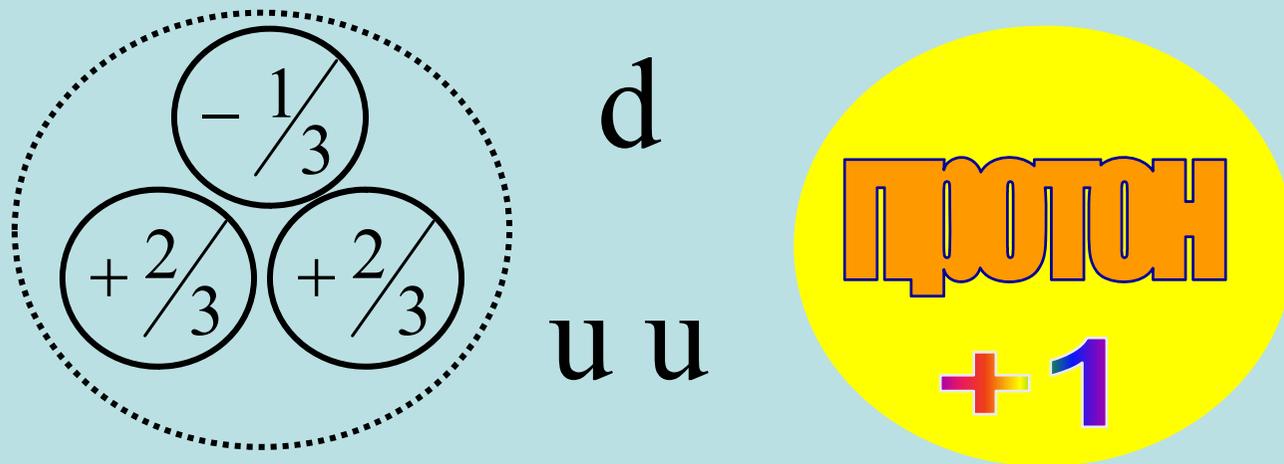
**Спин составной частицы  
равен сумме спинов кварков**

# Непривычное свойство - дробные заряды



**Заряд составной частицы  
равен сумме зарядов  
кварков**

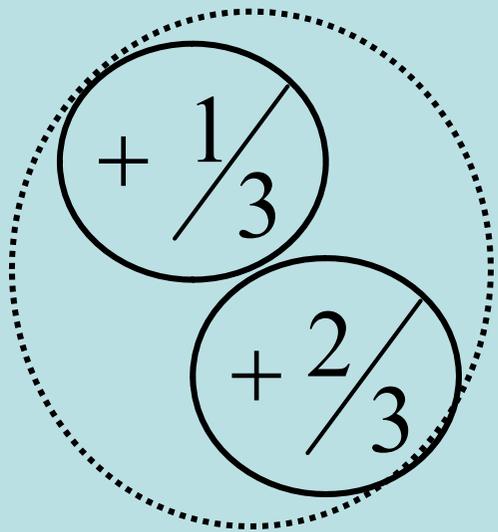
# Непривычное свойство - дробные заряды



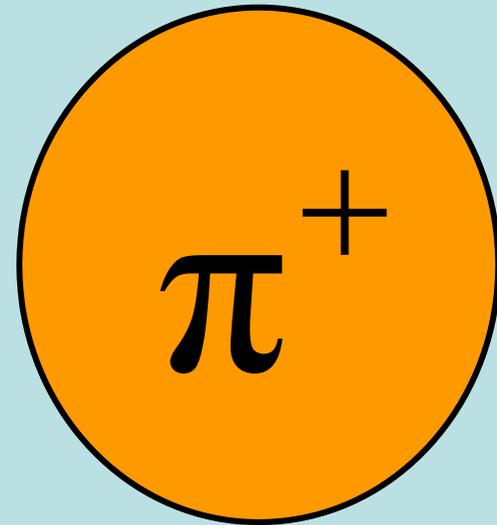
**Заряд составной частицы  
равен сумме зарядов  
кварков**

***Мезоны** состоят из сочетания  
кварк-антикварк.*

Например,  
 $\pi^+$ -мезон представляет собой пару  $u \bar{d}$



$u \bar{d}$



Вскоре после появления гипотезы кварков физики занялись поиском этих частиц с дробным знаком.

Хотя имеются новейшие экспериментальные доказательства их существования, *непосредственно обнаружить кварки не удалось.*

Подобно лептонам *кварки*  
*представляют собой истинно*  
*элементарные частицы.*

*Три «сорта» кварков* были  
обозначены буквами

**u** (up – вверх),

**d** (down – вниз),

**s** (strange – странный).

Все известные в то время *адроны*  
теоретически можно было построить *из*  
*кварков трёх видов: u, d, s.*

В 1964 г. ряд физиков высказал предположение о существовании четвертого кварка. Они основывались на глубокой симметрии природы, включая связь кварков и лептонов.

Если существуют (как считали в 60-ых годах) четыре лептона, то и кварков должно быть четыре.

1. **ЛЕПТОНЫ** (греч. «лептос» – лёгкий).

Это легкие частицы, не обладающие сильным взаимодействием:

**электроны**  $(e^-, e^+)$ ,

**мюоны**  $(\mu^-, \mu^+)$ ,

а также **электронные нейтрино**  $(\nu_e, \bar{\nu}_e)$ ,  
**мюонный нейтрино**  $(\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu)$  и

**Все лептоны** имеют **спины**, равные  $1/2\hbar$ , и следовательно **являются фермионами**.

Все лептоны обладают слабым взаимодействием. Те из них, которые имеют электрический заряд (т.е. мюоны и электроны), обладают также и электромагнитным взаимодействием.

Кварк (антикварк)	Электрическ ий заряд в единицах $e$	Барионное число $B$	Спин, в единицах $\hbar$	Странность $S$
$u(\bar{u})$	$+\frac{2}{3}(-\frac{2}{3})$	$+\frac{1}{3}(-\frac{1}{3})$	$\frac{1}{2}$	0
$d(\bar{d})$	$-\frac{1}{3}(+\frac{1}{3})$	$+\frac{1}{3}(-\frac{1}{3})$	$\frac{1}{2}$	0
$s(\bar{s})$	$-\frac{1}{3}(+\frac{1}{3})$	$+\frac{1}{3}(-\frac{1}{3})$	$\frac{1}{2}$	-1(+1)
$c(\bar{c})$	$+\frac{2}{3}(-\frac{2}{3})$	$+\frac{1}{3}(-\frac{1}{3})$	$\frac{1}{2}$	-1(+1)

Четвертый кварк получил название *очарованный*. Его *электрический заряд* должен быть равен  $2/3e$ .

Кроме того, четвёртый кварк должен обладать ещё одним свойством, отличающим его от трёх остальных кварков. Это новое свойство или квантовое число, было названо *очарованием*.

Предполагалось, что *очарование*  $c$  ведёт себя подобно странности: сохраняется в сильном и электромагнитном взаимодействии и не сохраняется в слабом взаимодействии.

У нового очарованного кварка  $c = +1$ , у его антикварка  $-c = -1$ .

Между тем до 1974 г. необходимости в очарованном кварке не возникало.

В этом году был открыт тяжёлый  $J/\Psi$ -мезон: его масса  $3100 \text{ МэВ}/c^2$ .

Для объяснения существования этого тяжёлого мезона и других тяжёлых мезонов, которые были открыты позже и понадобился очарованный кварк.

После открытия (экспериментального)  $\tau$ -лептона с массой 178 МэВ/с и соответствующего  $\nu_\tau$ , семейство лептонов стало насчитывать шесть частиц (и шесть античастиц).

Исходя из симметрии природы физики предположили существование *ещё двух кварков* ***b-кварки*** (bottom – низ или beauty - *красивый*) и ***t – кварки*** (top – высший или truth - *истинный*).

Соответственно новые свойства (квантовые числа), отличающие новые кварки от ранее известных, называются t и b - свойствами или *истиной и красотой*.

Вскоре после возникновения модели кварков было выдвинуто предположение, что *кварки обладают ещё одним свойством* (или качеством), которое получило название *цвет*.

Первоначально *цвета кварков были введены для того , чтобы удовлетворить принципу Паули* для частиц со спинами  $1/2$  (или любым полуцелым спином, например,  $3/2$  ,  $5/2$  и т. д.) – таким, как электрон или нуклон.

Т.к. спин кварков равен  $1/2$ , они должны подчиняться принципу Паули. Но у трёх барионов **uuu**, **ddd**, **sss** все три кварка имели бы одинаковые квантовые числа, и по крайней мере у двух из них спины имели бы одинаковое направление (т.к. существует только два возможных направления спина  $+1/2$  и  $-1/2$ ). Это означало бы нарушение принципа Паули.

Но если бы кварки обладали дополнительным числом (цветом), которое у каждого кварка принимало своё значение, то кварки могли бы различаться этим квантовым числом и принцип Паули не нарушался бы.

Хотя цвет кварков и связанное с ним (троекратное) увеличение числа кварков было введено искусственно, это позволило улучшить согласие теории с экспериментом и, в частности, предсказать правильное время жизни  $\pi^0$ -мезона.

Различие между шестью кварками **u,d,s,c,b,t** стали называть *аромат*.

Согласно существующим представлениям, *каждый из ароматов кварка может иметь три цвета*, обычно обозначаемых как **КРАСНЫЙ**, **ЗЕЛЁНЫЙ** и **СИНИЙ**.

*Цвета антикварков* называются соответственно *антикрасный*, *антизеленый* и *антисиний*.

*Барионы содержат три кварка – по одному каждого цвета;*

*мезоны состоят из пары кварк – антикварк определенного цвета и соответствующего антицвета,*

*поэтому и барионы, и мезоны оказываются «белыми» или «бесцветными».*



**ТОЛЬКО БЕЛЫЕ СОЧЕТАНИЯ**

**ЯВЛЯЮТСЯ СТАБИЛЬНЫМИ СОСТОЯНИЯМИ**

Каждому кварку приписывается  
**ЦВЕТОВОЙ ЗАРЯД**, аналогичный  
электрическому заряду и *сильное взаи-  
мдействие между кварками часто  
называют*  
**ЦВЕТОВЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ.**

*Новая теория сильного  
взаимодействия получила название*  
*квантовой хромодинамики* («хрома» —  
*цвет*) или **КХД.**

*Считается, что сильное взаимодействие адронов сводится к взаимодействию составляющих их кварков.*

*Частицы, переносящие взаимодействие, называются ГЛЮОНАМИ (от англ. glue— клей). Согласно теории существует восемь глюонов все с нулевой массой покоя, часть из них имеют цветовой заряд.*

# ГЛЮОНЫ-

"окрашенные" фотоны -  
частицы глюонного поля,  
передающие цветовые  
взаимодействия

Резюмируя все выше изложенное, можно сделать **вывод**, что в современных теориях **истинно элементарными частицами являются фотон, лептоны, кварки, глюоны**. До сих пор наблюдались только комбинации кварков (барионы, мезоны). Весьма вероятно, что кварки не существуют в свободном состоянии.

С другой стороны, **некоторые физики считают, что лептоны и кварки не являются фундаментальными частицами, а состоят из ещё более фундаментальных частиц**.

# **Великое объединение и стандартная модель**

**Великое объединение  
(идеи объединения фундаментальных  
взаимодействий)**

*Одна из главных задач физики описать  
разнообразие природы единым способом.*

Самые большие научные достижения  
прошлого были шагами к этой цели:

- *объединение земной и небесной механики*  
Исааком Ньютоном в XVII столетии;
- *оптики с теорией электричества и  
магнетизма* Дж. Максвеллом в XIX столетии;
- *геометрии пространства–времени и  
гравитации* Альбертом Эйнштейном с 1905-16г
- *химии и атомной физики в квантовой  
механике* в 20-ых годах.

Последняя в их ряду – **Стандартная модель** взаимодействия элементарных частиц (СМ), включающая в себя **модель электрослабого взаимодействия** Глэшоу-Вайнберга-Салама и **Квантовую хромодинамику (КХД)**.

Можно сказать, что на сегодняшний день именно СМ является реальным итогом многолетней работы **сотен тысяч людей** от теоретиков до простых инженеров и лаборантов.

Есть идеи относительно того, как *теория сильных взаимодействий* может быть объединена с теорией слабых и электромагнитных взаимодействий – такое объединение часто называется **Великим Объединением**, но они могут сработать, только если подключить гравитацию. Это само по себе является тяжелой задачей.

В теории ненарушенной калибровочной симметрии, которая лежит в основе Стандартной модели сильного и электрослабого взаимодействий, массы всех фундаментальных частиц равны нулю. Ненулевыми они становятся в результате спонтанного нарушения симметрии в процессе взаимодействия с хиггсовым полем, квантами которого являются бозоны Хиггса с нулевым спином и неизвестной (плохо предсказываемой теоретически) массой.

*Существование бозонов Хиггса предсказано в теории электрослабого взаимодействия, а их поиск является одной из важнейших задач физики элементарных частиц ближайшего будущего.*

***Стандартная Модель*** – квантово-полевая теория. Основные объекты такой теории – поля, включая электромагнитное поле.

*Колебания таких полей переносят энергию и импульс. Эти волны собираются в пакеты, или кванты, которые наблюдаются в лаборатории как элементарные частицы.*

*В частности, квант электромагнитного поля – частица, известная как фотон.*

*Стандартная Модель* включает в себя *поля для каждого типа элементарных частиц* (рис.)

Имеются *лептонные поля*, кванты которых представляют собой знакомые нам *электроны*.

Более тяжелые частицы, известны как *мю-мезоны ( $\mu$ )* и *тау-мезоны ( $\tau$ )*, а также соответствующие им электрически нейтральные частицы, известные как *нейтрино ( $\nu$ )*.

Имеются также *поля для кварков* различных типов, некоторые из которых связаны вместе внутри протонов и нейтронов, составляющих ядра обычных атомов.

Силы между этими частицами обусловлены процессами *обмена фотонами и калибровочными бозонами*  $W^+$ ,  $W^-$  и  $Z^0$ , *передающих слабые взаимодействия*, а также *восемью типами глюонов*, *ответственных за сильное взаимодействие*.

Эти частицы демонстрируют *широкое разнообразие масс*, в котором скрыта еще не открытая закономерность, где электрон 350 000 раз легче, чем самый тяжелый кварк, а нейтрино еще легче, чем электрон.

**СТАНДАРТНАЯ** **МОДЕЛЬ** физики  
элементарных частиц *описывает каждую*  
*частицу материи и каждую силу как квантовые*  
*поля.*

*Элементарные частицы материи – три*  
*поколения фермионов (a).* Каждое поколение этих  
частиц имеет сходную структуру свойств.

*Фундаментальные взаимодействия*  
*переносятся бозонами (b),* которые организованы  
согласно трем близко родственными симметриям.

Кроме того, *одна или большее количество*  
*частиц или полей Хиггса (c) порождают массы*  
*других полей.*

Стандартная Модель не позволяет рассчитать любую из этих масс, пока мы не введем в нее дополнительные *скалярные поля*.

*«Скаляр» означает, что эти поля не чувствительны к направлению в пространстве, в отличие от электрических, магнитных и других полей Стандартной Модели.*

Скалярные поля могут заполнять все пространство, не противореча изотропным свойствам пространства.

*Взаимодействие других полей Стандартной Модели со скалярными полями, как полагают, дает массы частицам Стандартной Модели.*

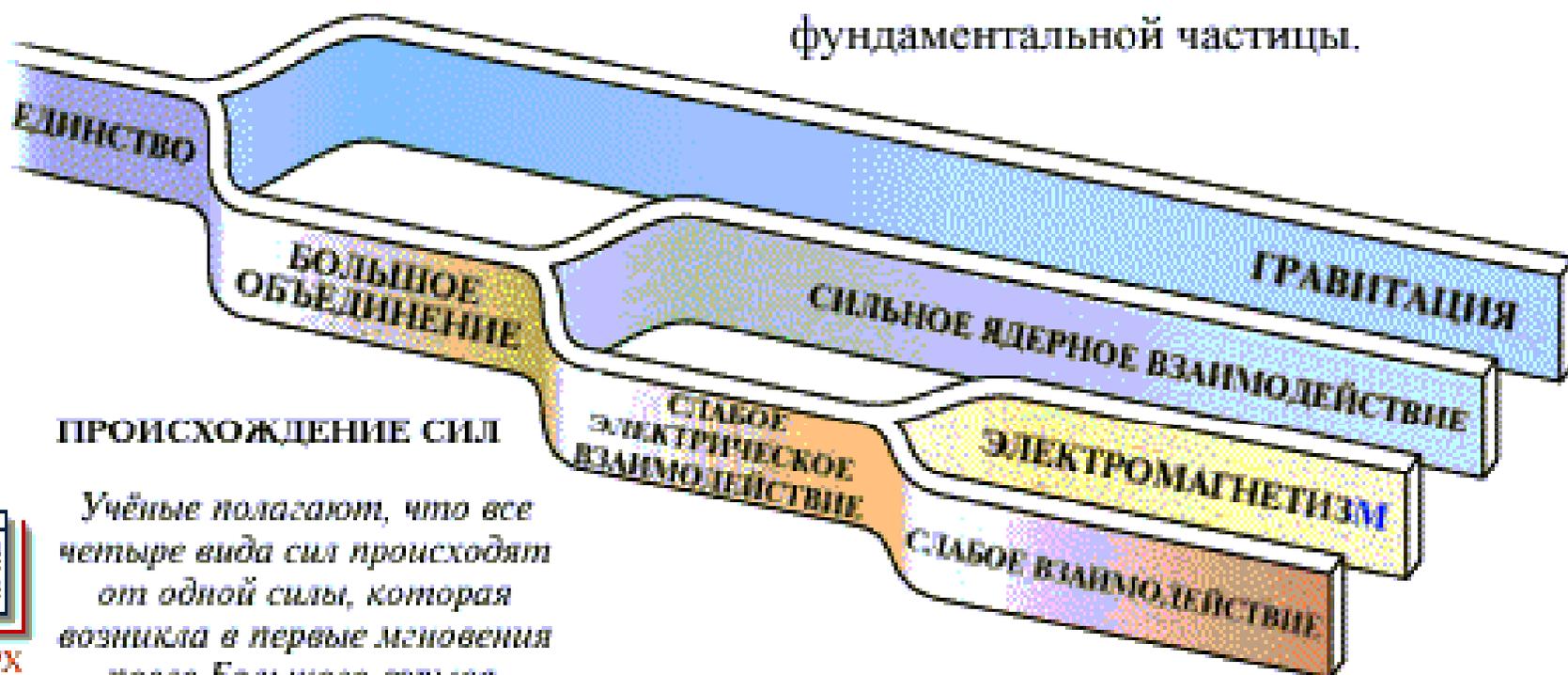
Электричество	Электромагнетизм	электрослабое взаимодействие	Стандартная модель
магнетизм			
свет			
бета-распад	слабое взаимодействие		
нейтрино			
протоны	сильное взаимодействие		
нейтроны			
пионы			
земное притяжение	универсальная гравитация		Общая теория относительности
небесная механика			
	геометрия пространства-времени		

?

# ВСЕОБЩАЯ ТЕОРИЯ

В течение многих лет физики пытались создать единую научную теорию, обосновывающую все виды взаимодействий во Вселенной. Сейчас они разрабатывают "всеобщую теорию", которая объяснила бы, как

гравитационная и электромагнитная силы, а также сильное ядерное и слабое взаимодействия связаны между собой. Кроме того, эта теория призвана доказать, что все субатомные частицы происходят от единой фундаментальной частицы.



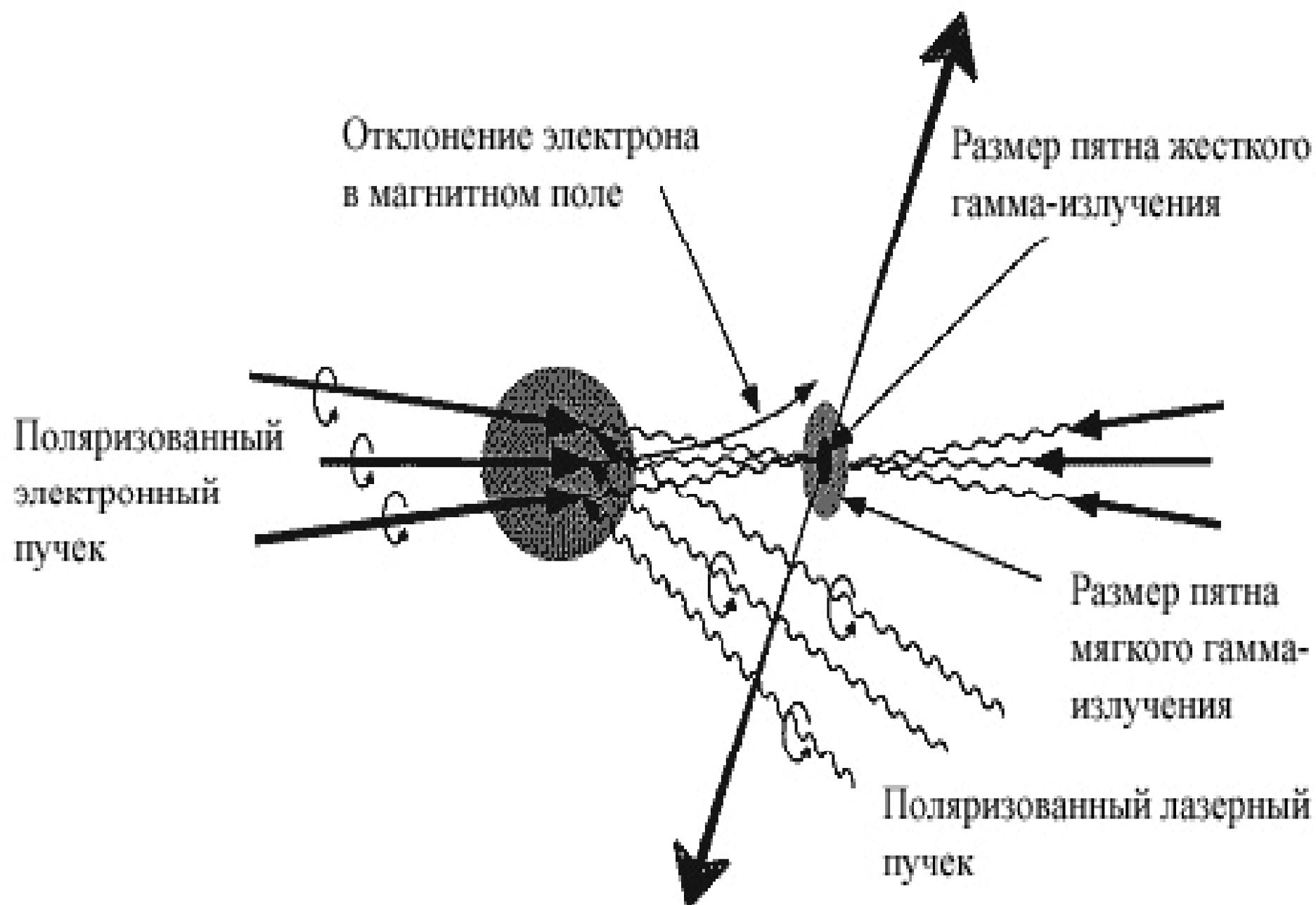
Учёные полагают, что все четыре вида сил происходят от одной силы, которая возникла в первые мгновения после Большого взрыва.



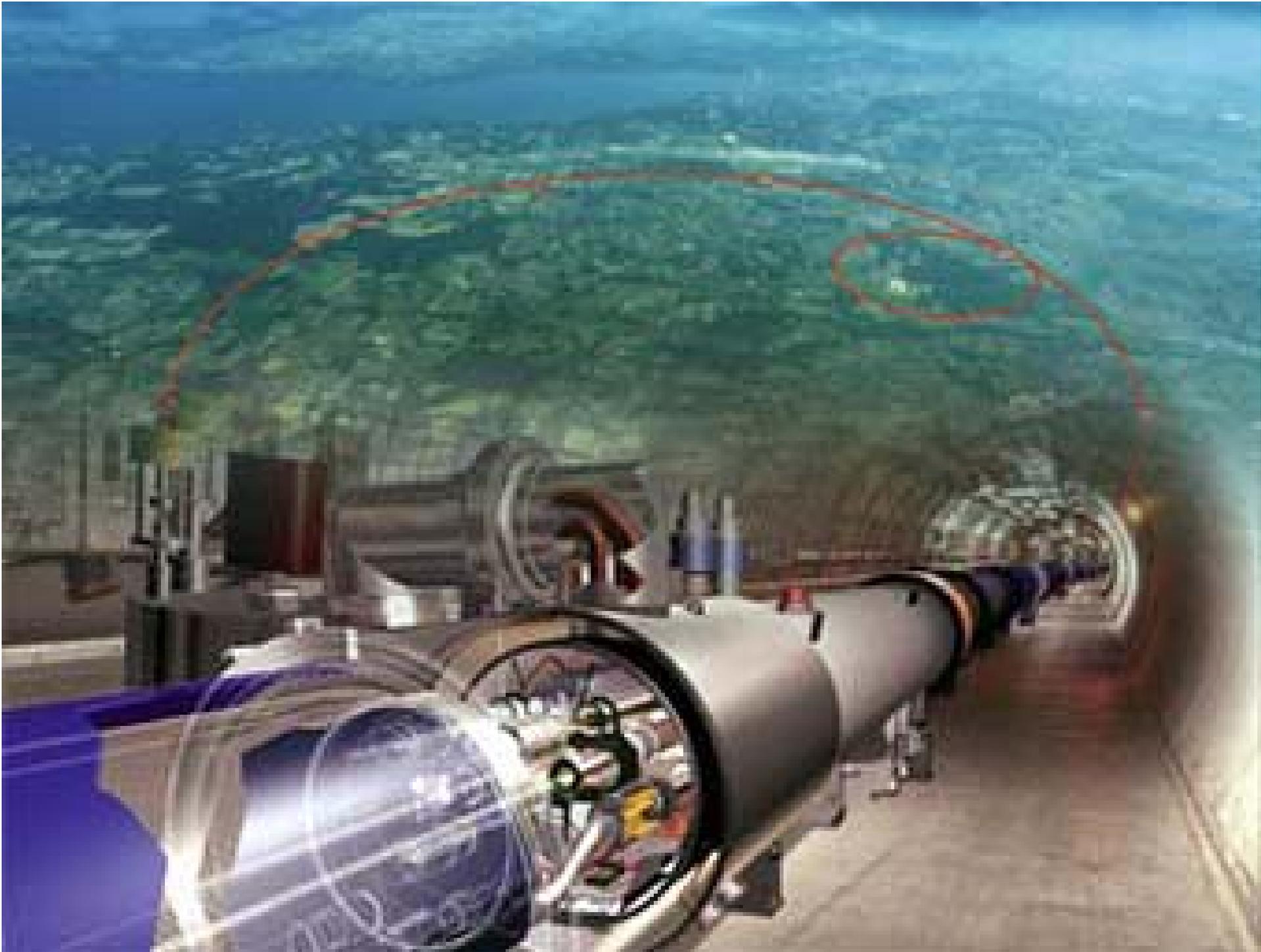
СВЕРХ  
СТРУНЫ

*Чтобы завершить Стандартную Модель, необходимо подтвердить существование скалярных полей и выяснить, сколько существует типов полей.*

*Это – проблема обнаружения новых элементарных частиц, часто называемых частицами Хиггса, которые могут быть зарегистрированы как кванты этих полей.*



Имеется достаточно оснований ожидать, что *эта задача будет выполнена к 2020 г.*, поскольку ускоритель, называемый *Большим Адронным Коллайдером Европейской лаборатории физики элементарных частиц* близ Женевы (CERN) будет работать для этого более десяти лет. По меньшей мере, должна быть обнаружена *единственная электрически нейтральная скалярная частица.*



# Объединение

электричество	Электромагнетизм	электрослабое взаимодействие	Стандартная Модель	?
магнетизм				
свет				
бета распад	слабое взаимодействие			
нейтрино				
протоны	сильное взаимодействие			
нейтроны				
пионы				
земное притяжение	универсальная гравитация	Общая Теория Относительности		
небесная механика				
	геометрия пространства-времени			

*Объединение разнородных явлений в одной теории уже долгое время является центральной темой физики.*

*Стандартная Модель физики частиц успешно описывает три (электромагнетизм, слабые и сильные взаимодействия) из четырех известных науке сил, но впереди еще окончательное объединение с общей теорией относительности, которая описывает гравитацию и природу пространства и времени*

**<http://www.youtube.com/watch?v=7-mOxkMfa4A>**

## 2. Кварки

### Кварки, лептоны, калибровочные бозоны.

На современном уровне знания фундаментальными частицами вещества считаются кварки и лептоны.

Они имеют полуцелый спин (фермионны).

Кроме кварков и лептонов существуют частицы с целым значением спина. Они переносят взаимодействие между фундаментальными частицами. Эти частицы получили название калибровочных бозонов.

Лептоны не участвуют в сильных взаимодействиях, имеют спин  $1/2$  и лептонные заряды  $L_e, L_\mu, L_\tau$ .

## Кварки

Характеристика	Тип кварка					
	d	u	s	c	b	t
Электрический заряд $Q$	-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
<i>Charm</i> (очарование) $c$	0	0	0	+1	0	0
<i>Bottomness</i> ( <i>beauty</i> ) $b$	0	0	0	0	-1	0
<i>Topness</i> ( <i>truth</i> ) $t$	0	0	0	0	0	+1
Масса в составе адрона, ГэВ	0,33	0,33	0,51	1,8	5	180
Масса «свободного» кварка, ГэВ	0,00 7	0,00 5	0,15	1,3	4,1–4,4	174

# Типы микроскопов:

*оптические,*

*электронные,*

*рентгеновские,*

*туннельные*





# Оптическая микроскопия

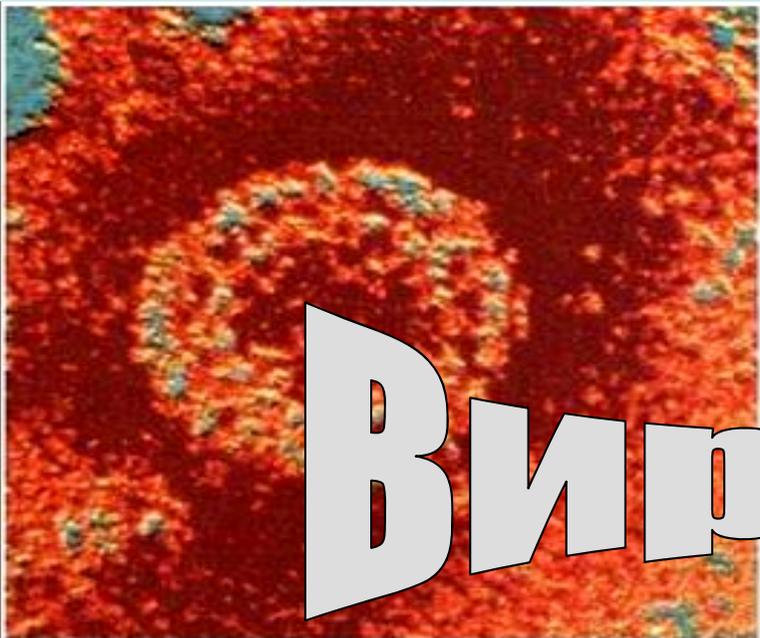
# Электронный растровый микроскоп

1 мкм

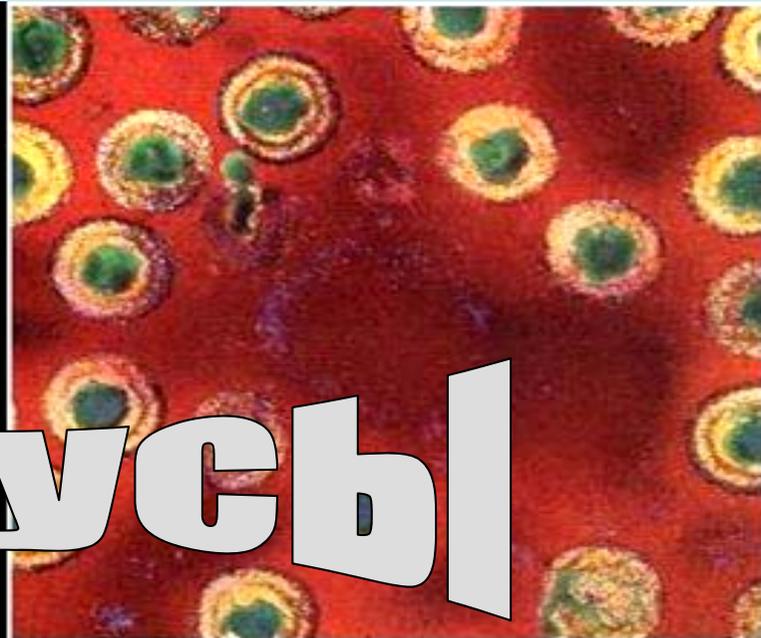
---



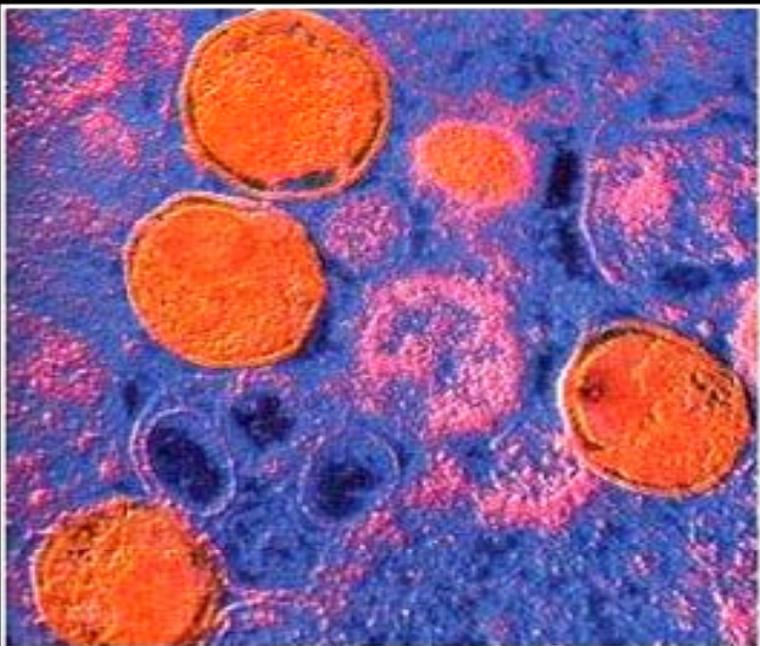
# Вирусы



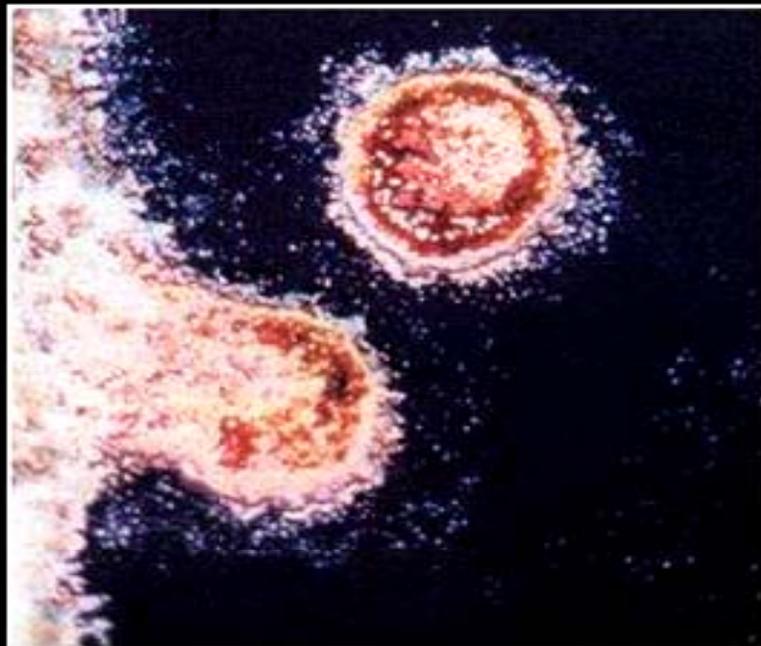
Вирус гепатита В



Вирус герпеса

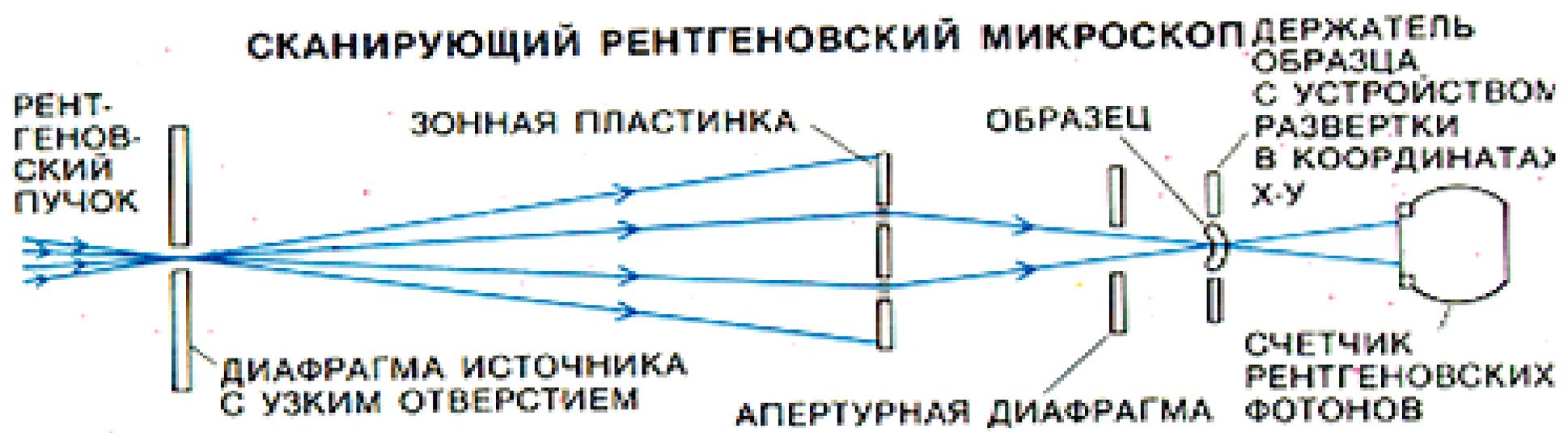


Внутриклеточные бактерии хламидии



Вирус СПИД

# СКАНИРУЮЩИЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ МИКРОСКОП





Молекулы  
бензола

Туннельный микроскоп

# Электронный растровый микроскоп

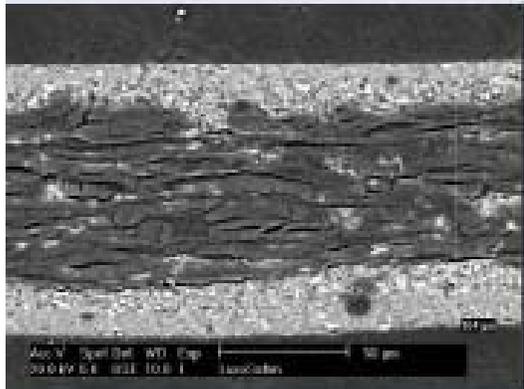




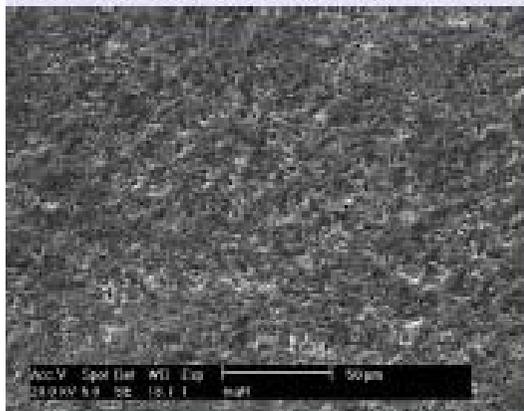
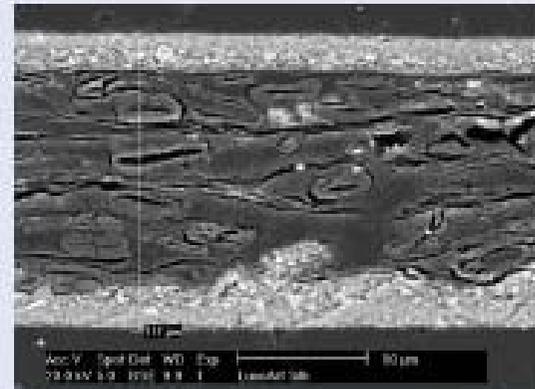
Поверхность глянцевой мелованной бумаги



Поверхность полуматовой мелованной бумаги



Поперечный срез двух видов бумаги ( $135 \text{ г/м}^2$ ) демонстрирует разницу в толщине и плотности после каландрирования



Поверхность матовой мелованной бумаги



Пористая поверхность немелованной бумаги

Поверхность бумаги под электронным растровым микроскопом



**Изображение  
СНЕЖИНКИ,  
полученное с  
ПОМОЩЬЮ  
электронного  
растрового  
микроскопа**

# Электронный сканирующий микроскоп



# Туннельный микроскоп









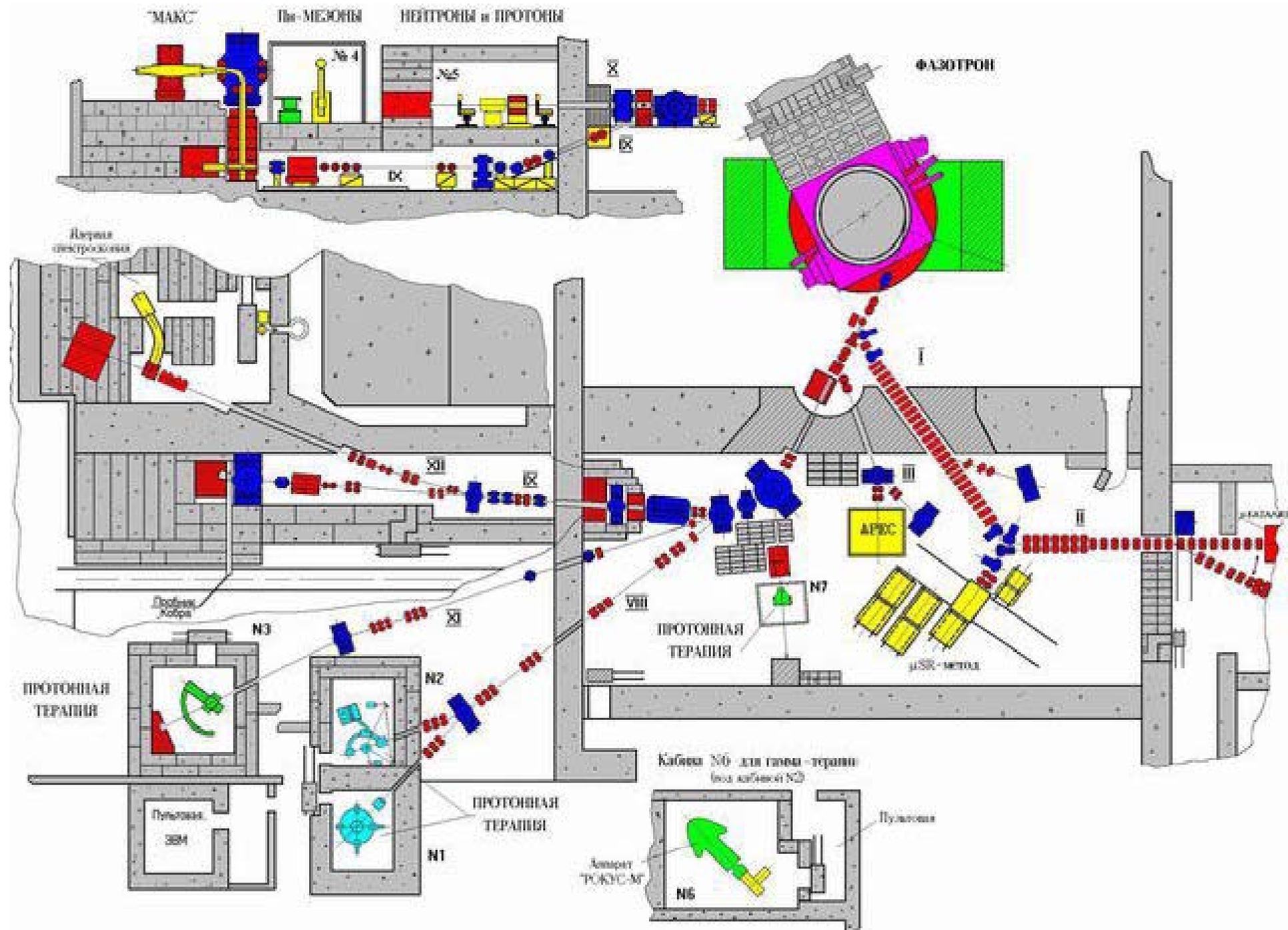


СХЕМА ПУЧКОВ ФАЗОТРОНА ЛДН ОИЯИ

Зачем потребовались  
все более мощные  
ускорители?

Из соотношений неопределенностей Гейзенберга  $\Delta r \Delta p \geq h$  следует, что для выявления деталей структуры порядка  $\Delta r$  нужно иметь зондирующие частицы с импульсом:

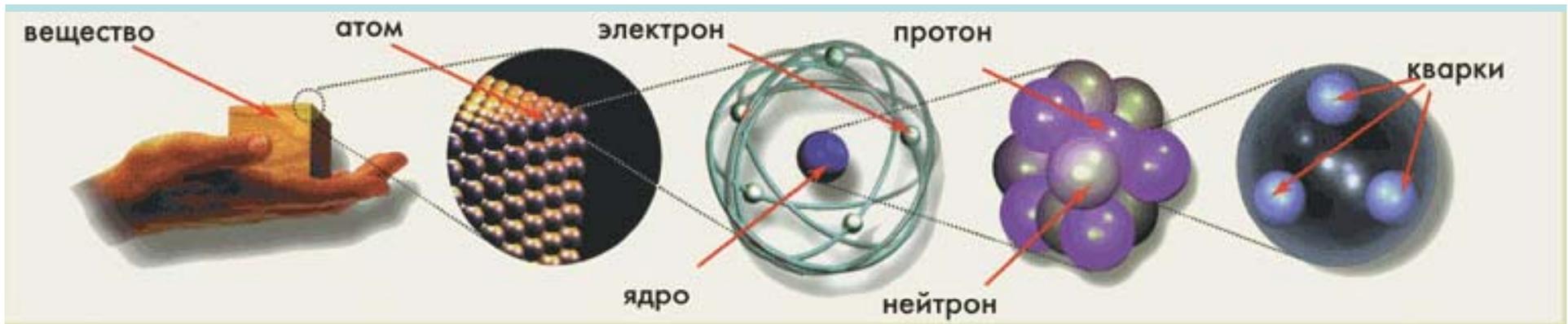
$\Delta p > h/\Delta r$ . Если принять  $\Delta p = E/c$ , то

$$\Delta r = hc/E.$$

Современные ускорители позволяют получать частицы с энергией до 1000 ГэВ  $\approx 10^{16}$  эВ. Следовательно,

$$\Delta r \approx (10^{-34} \cdot 10^8) / (10^{12} \cdot 10^{-19}) \approx 10^{-19} \text{ м}$$

Таким образом с помощью современных методов исследования мы можем проникнуть вглубь структуры вещества до  $10^{-19}$  м



Различают *три уровня микромира*:

1. *Молекулярно-атомный*

$$E = 1 - 10 \text{ эВ}$$

$$\Delta r \approx 10^{-8} - 10^{-10} \text{ м}$$

2. *Ядерный*

$$E = 10^6 - 10^8 \text{ эВ}$$

$$\Delta r \approx 10^{-14} - 10^{-15} \text{ м}$$

3. *Мельчайшие частицы*

$$E < 10^8 \text{ эВ}$$

$$\Delta r < 10^{-15} \text{ м}$$

# Ускорители элементарных частиц

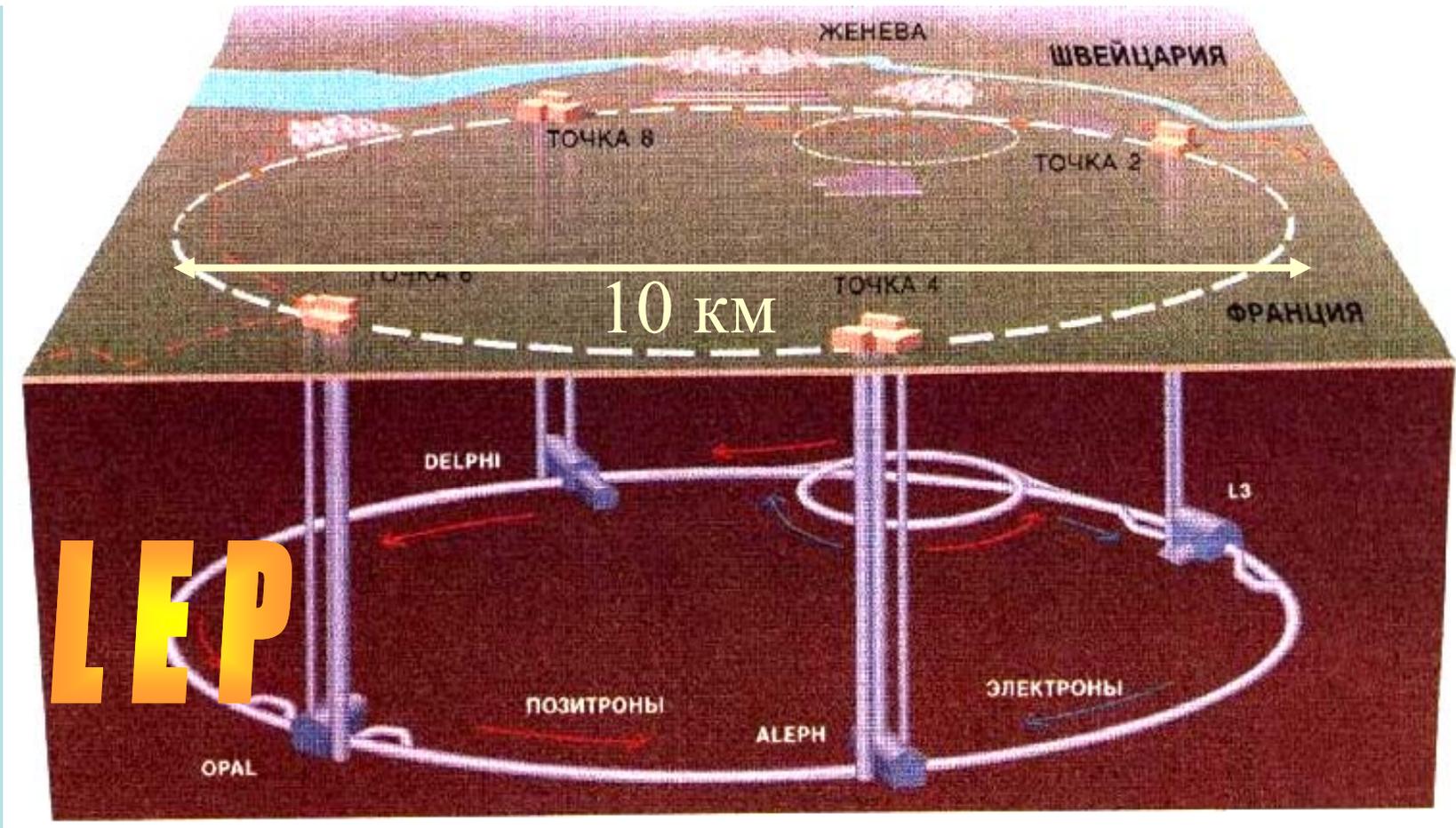
(с их помощью проводятся исследования элементарных частиц, в частности, были обнаружены переносчики слабых взаимодействий)



## Стенфордский центр линейного ускорителя

(*Stanford Linear Accelerator Center, SLAC*) — нац. лаборатория США.

3,2-километровый (2-мильный) подземный ускоритель является самым длинным линейным ускорителем и считается «самым прямым объектом в мире».



## **Большой электрон-позитронный коллайдер (LEP).**

**Построен в 1988 г. в долине Женевского озера на глубине 100 метров - туннель длиной 27 км**

**Получены энергии до 210 ГэВ: была учтена зависимость энергии от положения Луны по отношению к Земле, от уровня воды в Женевском озере, от прибытия поездов на железнодорожный вокзал Женевы и т.д.**

**Время эксплуатации – 11 лет.**

**БАК**

**LHC**

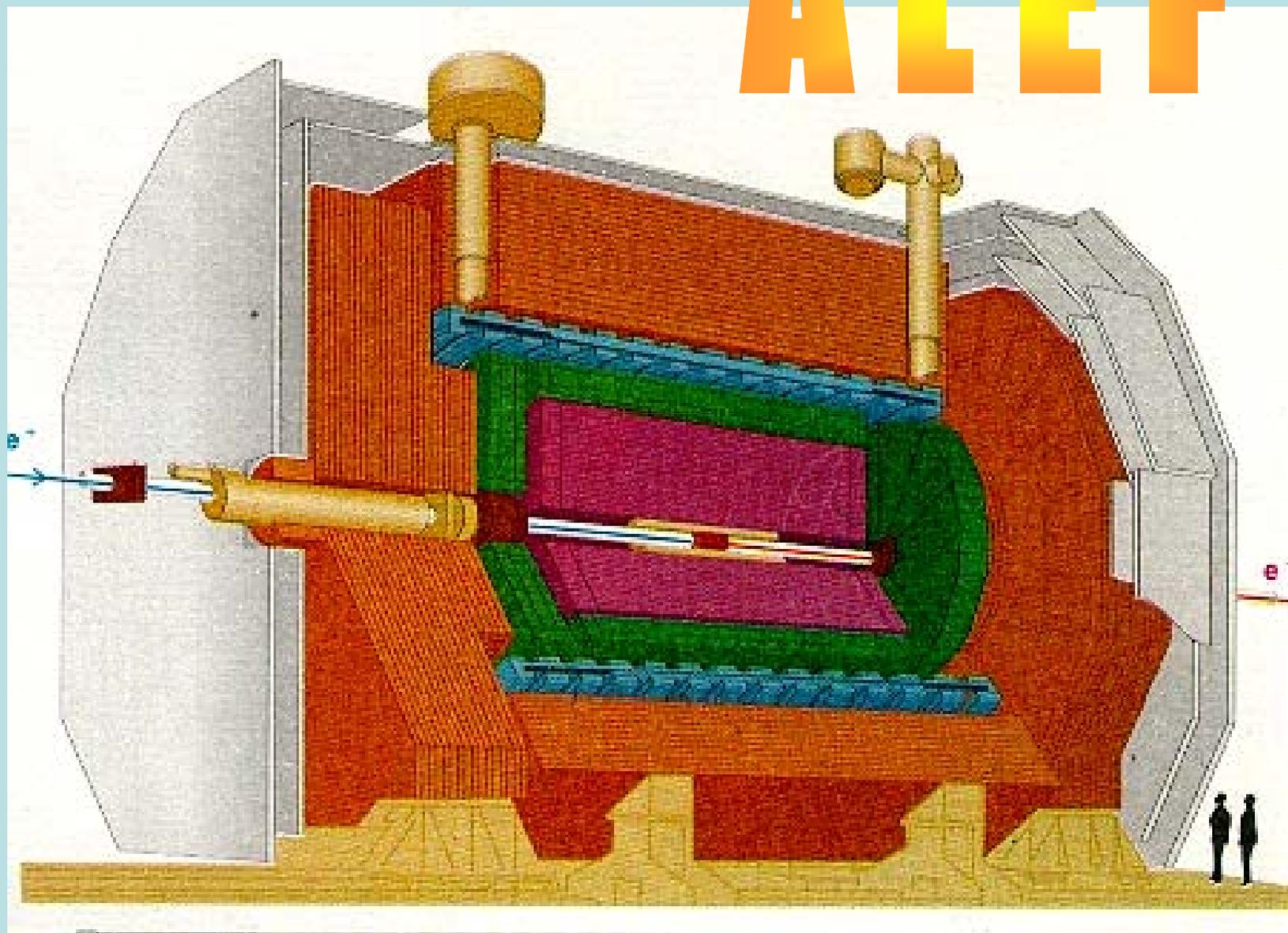


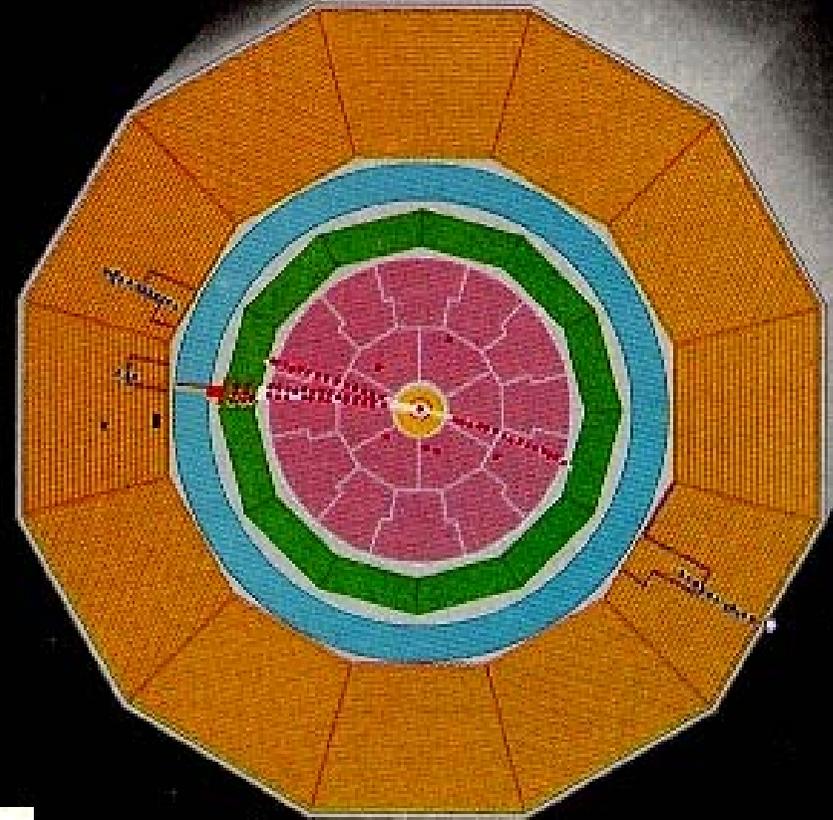
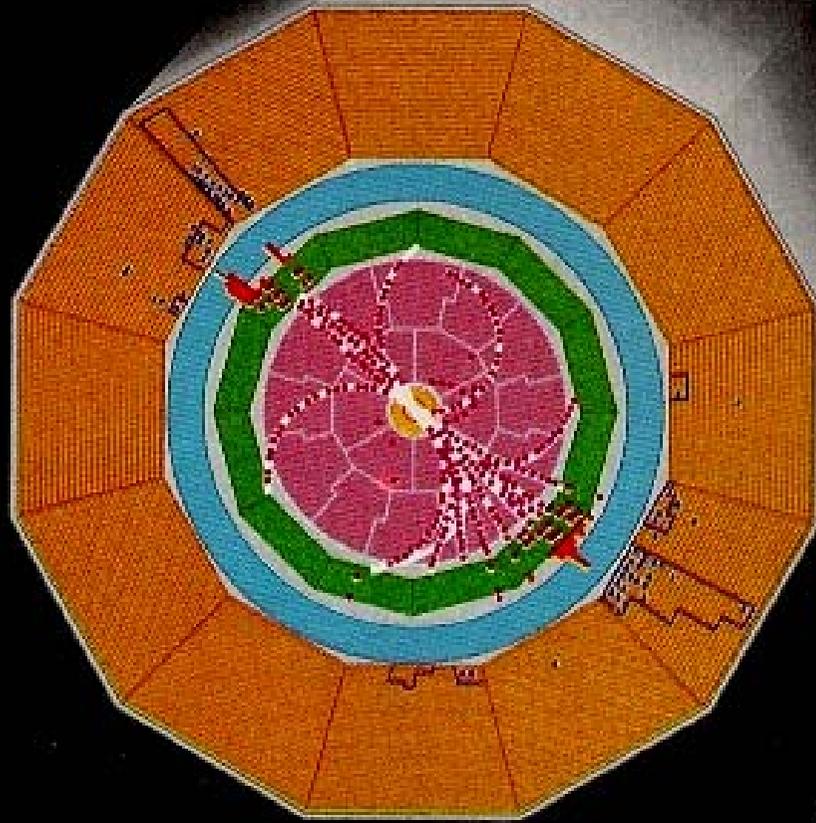
*В 90-х гг. LEP был демонтирован и в 2000 г. в старом туннеле начато строительство LHC – Large Hadron Collider – Большого адронного коллайдера - нового кольца труб, в котором одновременно разгоняются два пучка протонов. За 1 с происходит более одного миллиарда соударений. В основу работы положен эффект сверхпроводимости.*

*Температура установки  $-271^{\circ}$  С. Полученные энергии – тераэВ ( $10^{12}$ ).*

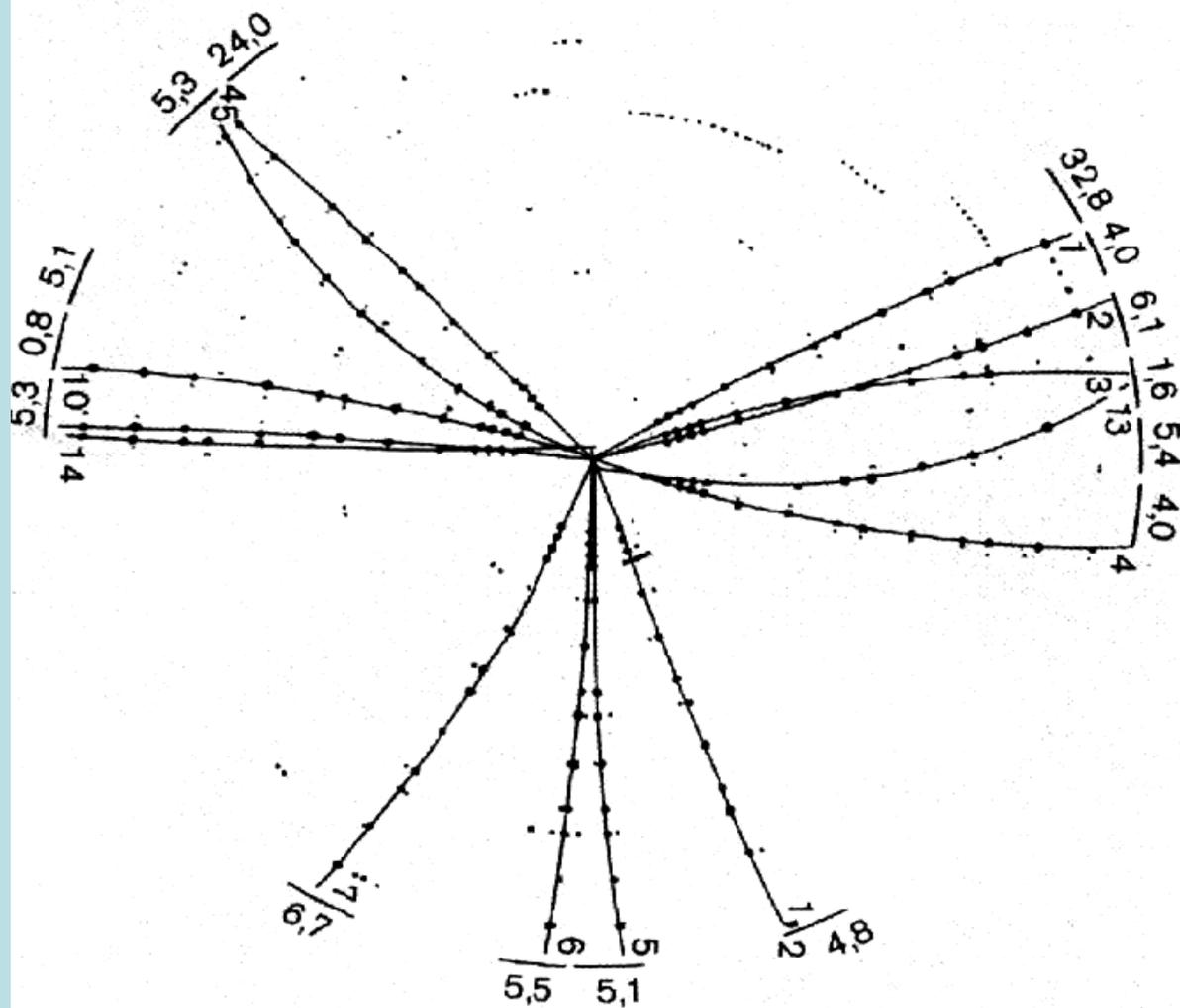
Запуск LHC произведен 10 сент. 2008 г. В работе над созданием LHC принимали участие **720 российских ученых.**

# ALEF

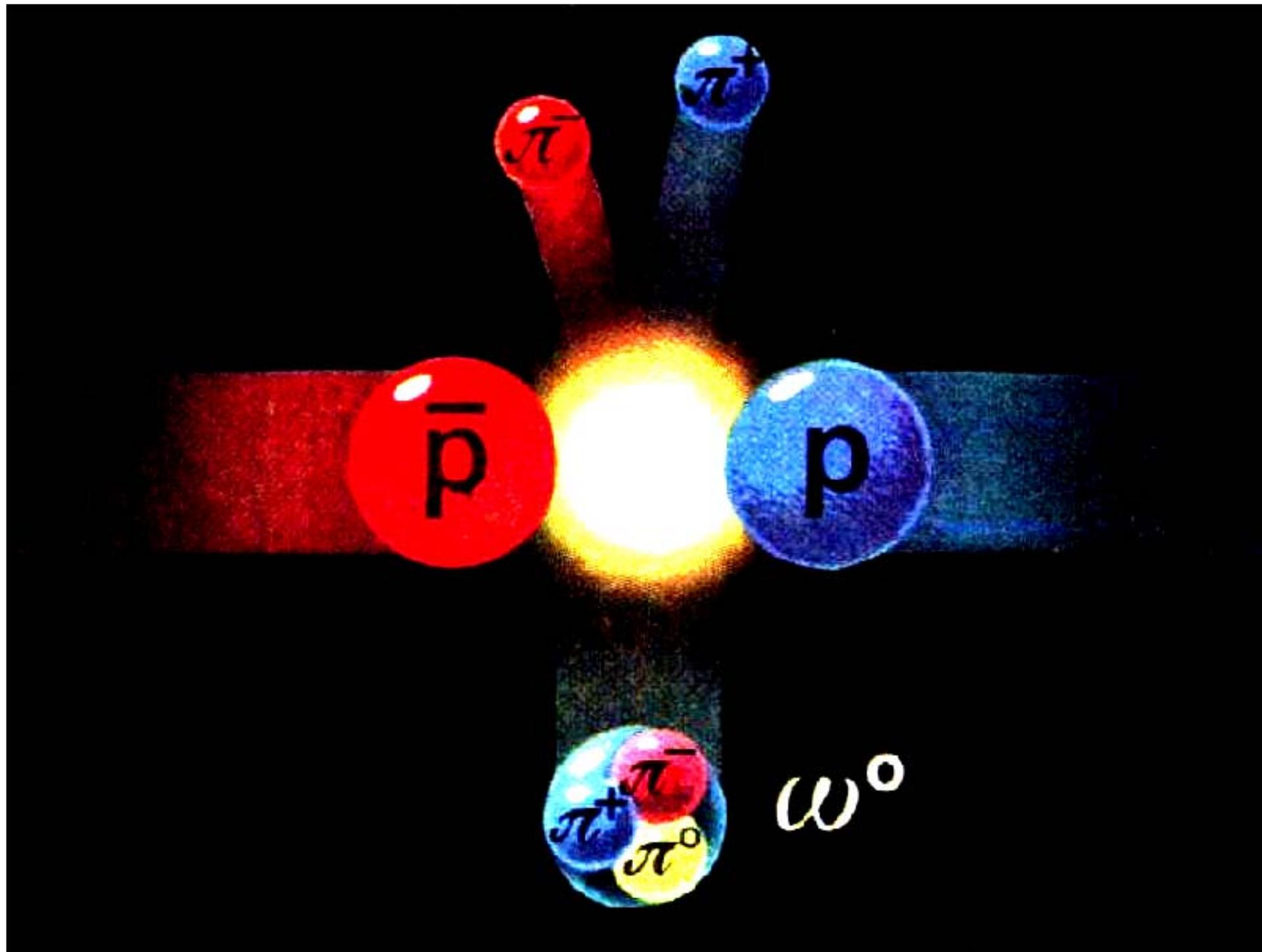


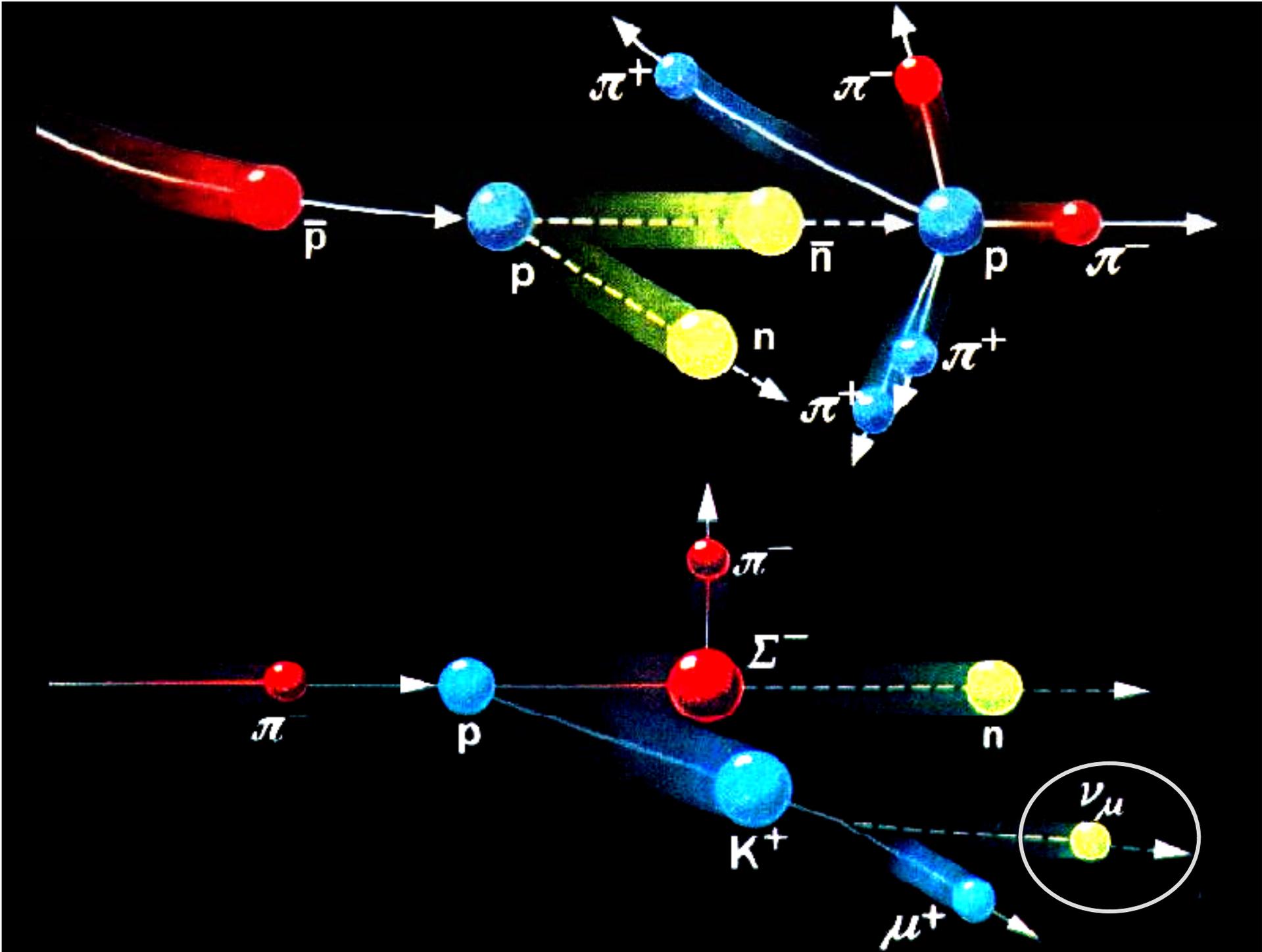


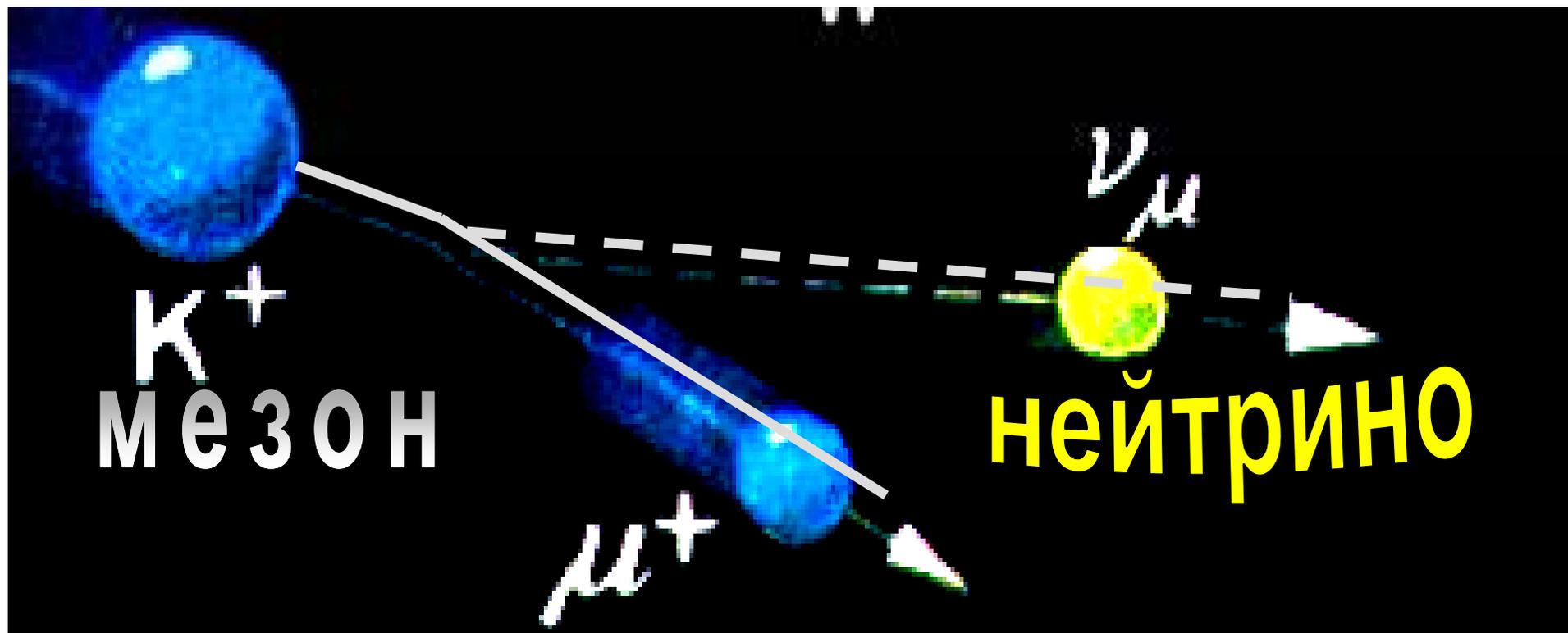
2 M



Одно из трехструйных событий в процессе электрон-позитронной аннигиляции, зарегистрированное на детекторе TASSO в 1980 г. Отчетливо видны три струи частиц



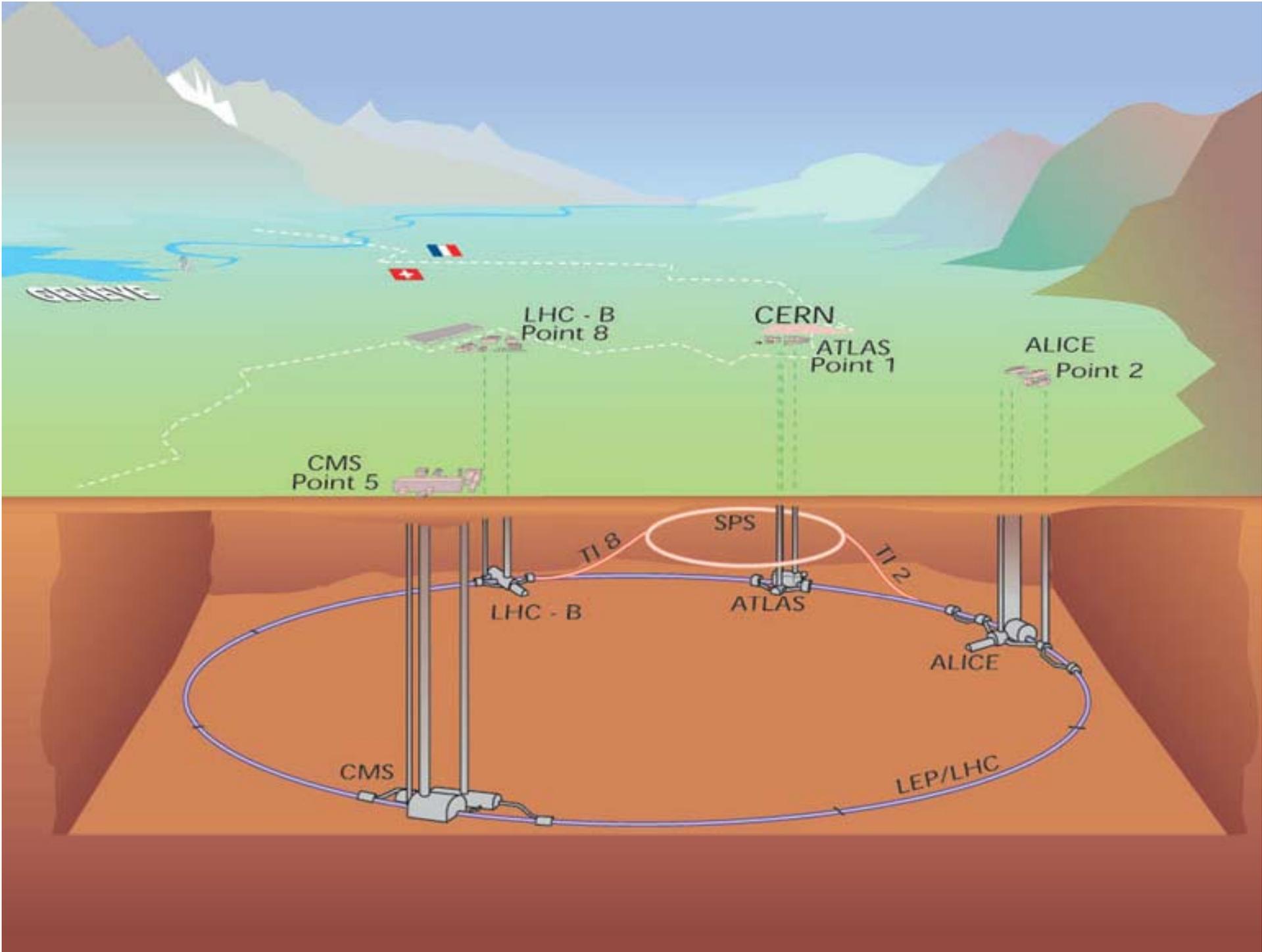


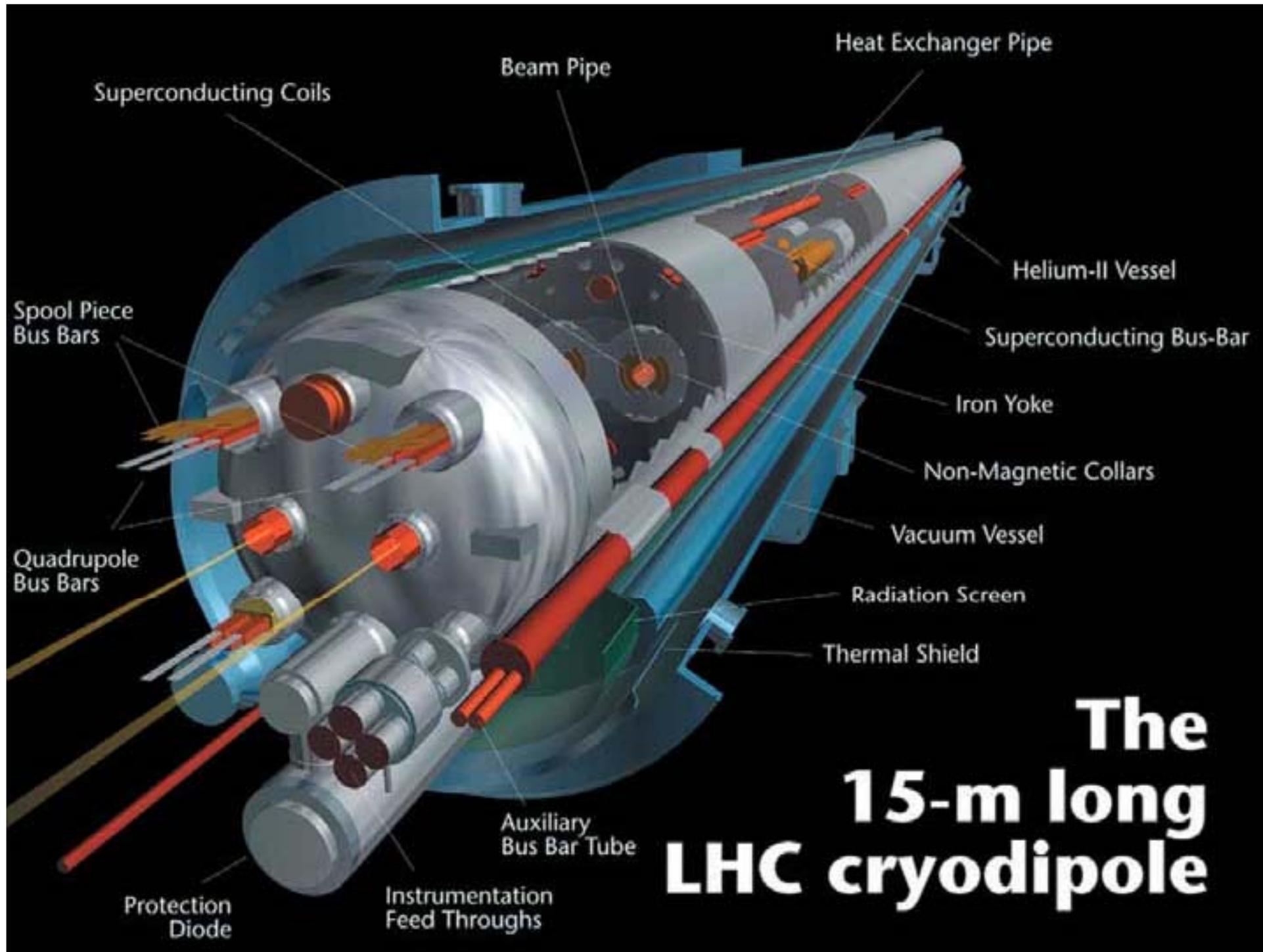


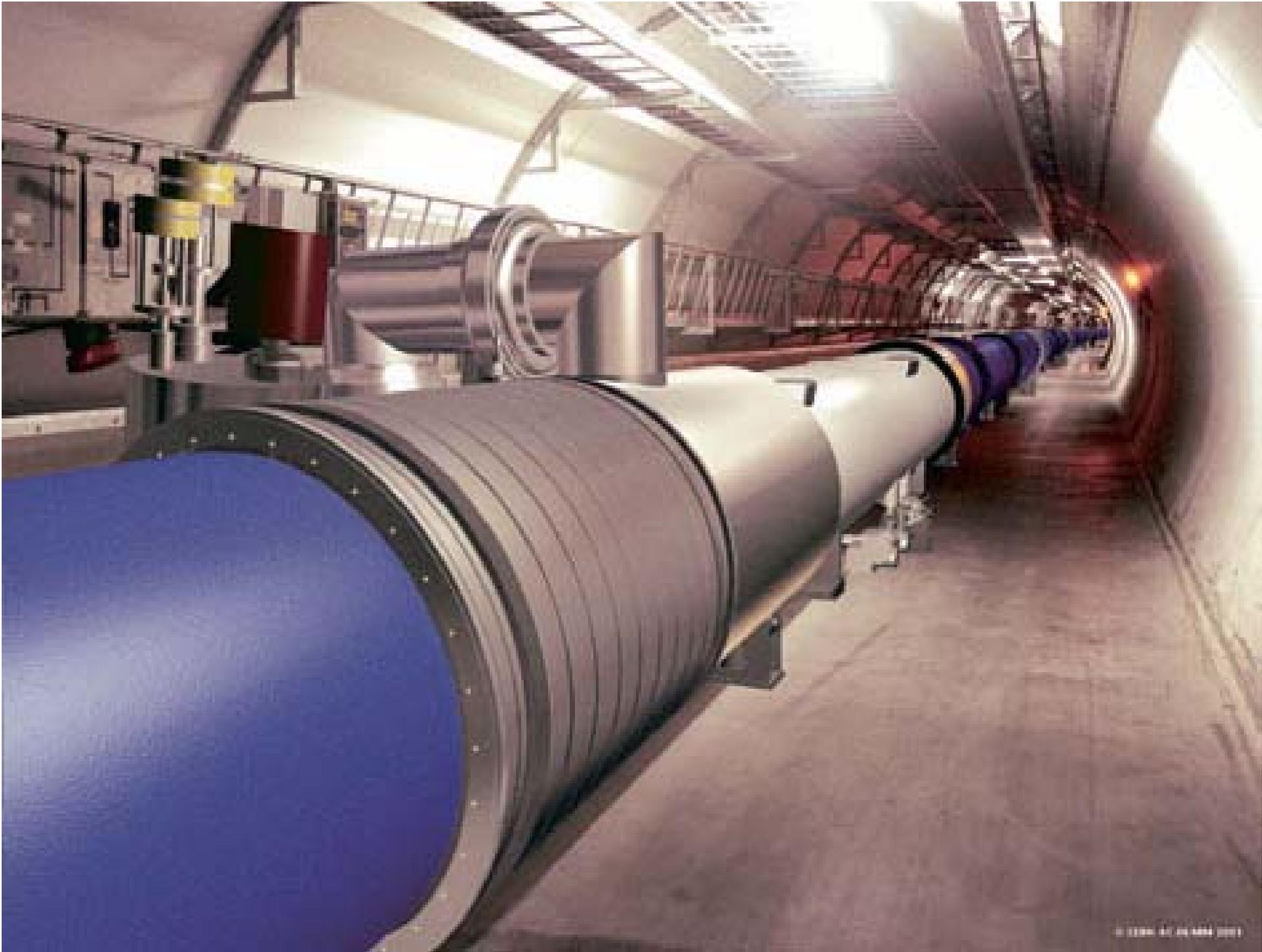
*МЮОН*

Нейтрино уносит часть  
импульса К-мезона









**Фундаментальные фермионы**

Электрический заряд

Частицы окружающего мира принадлежат этой группе

Эти частицы существовали в первый момент после “Большого взрыва”.

Теперь их можно обнаружить в космосе и на ускорителях частиц

## КВАРКИ

+2/3

-1/3

**u-кварк (up - вверх)**

входит в состав протонов и нейтронов

$$M = 3 \text{ МэВ}/c^2$$



**d-кварк (down - вниз)**

входит в состав протонов и нейтронов

$$M = 6 \text{ МэВ}/c^2$$



**c-кварк (charmed - очарованный)**

открыт в 1974 г.

$$M = 1300 \text{ МэВ}/c^2$$



**s-кварк (strange - странный)**

открыт в 1964 г.

$$M = 100 \text{ МэВ}/c^2$$



**t-кварк (top - верхний)**

открыт в 1995 г.

$$M = 175000 \text{ МэВ}/c^2$$



**b-кварк (beauty - прелестный bottom - нижний)**

открыт в 1977 г.

$$M = 4300 \text{ МэВ}/c^2$$



# Характеристики элементарных частиц

# Характеристики элементарных частиц

Каждая частица описывается набором физических величин - квантовых чисел — определяющих её свойства.

Наиболее часто употребляемые характеристики частиц:

## 1. *Масса частицы, $m$ .*

Массы частиц меняются в широких пределах *от 0 (фотон) до 90 ГэВ (Z-бозон).*

Z-бозон — наиболее тяжелая из известных частиц. Однако могут существовать и более тяжелые частицы.

## 2. *Время жизни, $\tau$ .*

В зависимости от времени жизни частицы делятся на *стабильные частицы*, имеющие относительно большое время жизни, и *нестабильные*.

Деление частиц на стабильные и нестабильные условно: к *стабильным частицам* относят такие частицы как *электрон, протон*, для которых в настоящее время *распады не обнаружены*, так и  $\pi^0$ -мезон, имеющий время жизни  $\tau = 0.8 \cdot 10^{-16}$  с.

К стабильным частицам относят частицы, распадающиеся по слабому или электромагнитному взаимодействию.

К нестабильным частицам относят частицы, распадающиеся в результате сильного взаимодействия. Их обычно называют *резонансами*.

Характерное *время жизни резонансов* —  $10^{-23}$ – $10^{-24}$  с.

### 3. Спин $I$ .

Величина спина измеряется в единицах  $\hbar$  и может принимать 0, полуцелые и целые значения.

Например, спин  $\pi$ ,  $K$ -мезонов равен 0.

Спин электрона, мюона равен  $1/2$ .

Спин фотона равен 1.

Существуют частицы и с большим значением спина.

Частицы с полуцелым спином подчиняются статистике Ферми–Дирака, с целым спином – Бозе-Эйнштейна.

#### 4. *Электрический заряд $q$ .*

Электрический заряд является целой кратной величиной от  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кулон, называемой *элементарным электрическим зарядом*.

Частицы могут иметь заряды  $0, \pm 1, \pm 2$ .

#### 5. *Внутренняя четность $P$ .*

Квантовое число  $P$  характеризует свойство симметрии волновой функции относительно пространственных отражений.

Квантовое число  $P$  имеет значение  $+1, -1$ .

Наряду с общими для всех частиц характеристиками, используют также **квантовые числа, которые приписывают только отдельным группам частиц.**

**Квантовые числа:**

лептонное число  $L$

барионное число  $B$ ,

странность  $s$ ,

очарование (*charm*)  $c$ ,

красота (*bottomness* или *beauty*)  $b$ ,

верхний (*topness*)  $t$ ,

**изотопический спин  $I$  приписывают только сильно взаимодействующим частицам – адронам.**

**Лептонные числа**  $L_e, L_\mu, L_\tau$ .

Лептонные числа приписывают частицам, образующим группу лептонов.

Лептоны  $e, \mu$  и  $\tau$  участвуют только в электромагнитных и слабых взаимодействиях.

Лептоны  $\nu_e, \nu_\mu$  и  $\nu_\tau$  участвуют только в слабых взаимодействиях.

Лептонные числа имеют значения

$$L_e, L_\mu, L_\tau = 0, +1, -1.$$

Например,  $e^-$  имеет  $L_e = +1$ ;  $e^+, \nu_e$  имеют

$$L_e = -1.$$

Все адроны имеют  $L_e, L_\mu, L_\tau = 0$ .

## ***Барионное число $B$ .***

Барионное число имеет значение

$$B = 0, +1, -1.$$

Барионы, например,  $n$ ,  $p$ ,  $\Lambda$ ,  $\Sigma$ , нуклонные резонансы имеют барионное число  $B = +1$ .

Мезоны, мезонные резонансы –  $B = 0$ .

Антибарионы  $B = -1$ .

## ***Странность $s$ .***

Квантовое число  $s$  может принимать значения  $-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$  и определяется кварковым составом адронов.

Например, гипероны  $\Lambda, \Sigma$  имеют  $s = -1$ ;

$K^+, K^-$ -мезоны имеют  $s = +1$ .

### *Charm c.*

Квантовое число  $c$  может принимать значения  $-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$ .

В настоящее время обнаружены частицы, имеющие  $c = 0, +1$  и  $-1$ . Например, барион  $\Lambda^+$  имеет  $c = +1$ .

### *Bottomness b.*

Квантовое число  $b$  может принимать значения  $-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$ . В настоящее время обнаружены частицы, имеющие  $b = 0, +1, -1$ . Например,  $B^+$ -мезон имеет  $b = +1$ .

### *Topness t.*

Квантовое число  $t$  может принимать значения  $-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$ .

## *Изоспин $I$ .*

Сильно взаимодействующие частицы можно разбить на группы частиц, обладающих схожими свойствами (одинаковое значение спина, чётности, барионного числа, странности и др. квантовых чисел, сохраняющихся в сильных взаимодействиях) – изотопические мультиплеты.

Величина изоспина  $I$  определяет число частиц, входящих в один изотопический мультиплет:

$n$  и  $p$  составляют изотопический дуплет  $I = 1/2$ ;

$\Sigma^+$ ,  $\Sigma^-$ ,  $\Sigma^0$  изотопический триплет  $I = 1$ ,

$\Lambda$  – изотопический синглет  $I = 0$ ,

Число частиц, входящих в один изотопический мультиплет,  $2I+1$ .

## *Четность $G$*

– это квантовое число, соответствующее симметрии относительно одновременной операции зарядового сопряжения  $C$  и изменения знака третьей компоненты  $I_z$  изоспина.

$G$  – четность сохраняется только в сильных взаимодействиях.