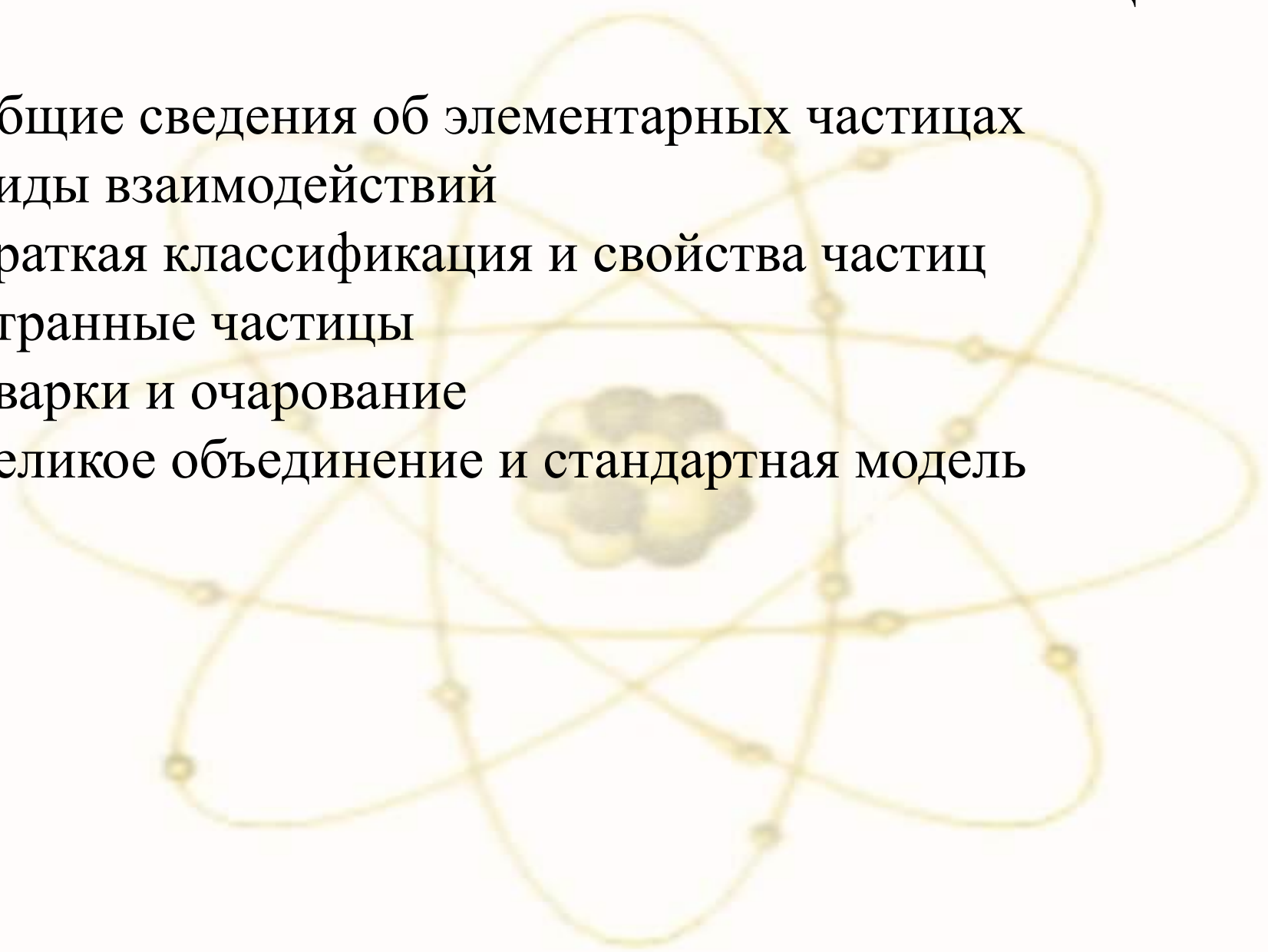


# ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

1. Общие сведения об элементарных частицах
2. Виды взаимодействий
3. Краткая классификация и свойства частиц
4. Странные частицы
5. Кварки и очарование
6. Великое объединение и стандартная модель



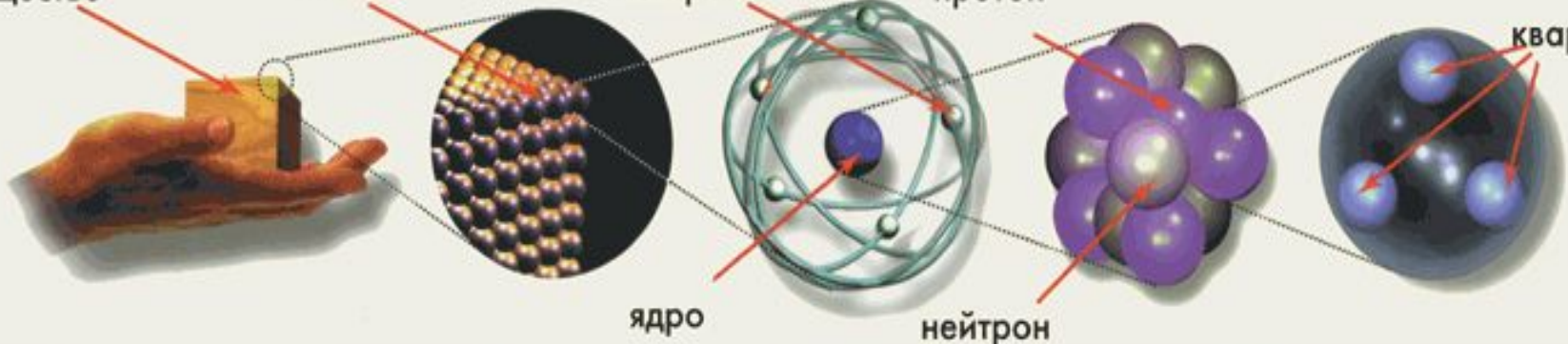
вещество

атом

электрон

протон

кварки



**Фундаментальные фермионы**  
Электрический заряд  
Частицы окружающего мира принадлежат этой группе.

### ЛЕПТОНЫ

	-1	0
<b>Электрон</b> переносит электрический ток $M = 0.511 \text{ МэВ}/c^2$		<b>Электронное нейтрино</b> играет фундаментальную роль при горении солнца, каждую секунду сквозь вас пролетает миллиарды этих частиц
<b>Мюон</b> аналог электрона, время жизни - 2 микросекунды $M = 106 \text{ МэВ}/c^2$		<b>Мюонное нейтрино</b> образуется при рождении и распаде мюона $M < 0.2 \text{ МэВ}/c^2$
<b>Тау</b> аналог электрона, время жизни - $3 \times 10^{-13}$ $M = 1777 \text{ МэВ}/c^2$		<b>Тау нейтрино</b> образуется при рождении и распаде тау лептона, открыто в 1975 г. $M < 20 \text{ МэВ}/c^2$

### КВАРКИ

	+2/3	-1/3
<b>u-кварк</b> входит в состав протонов и нейтронов $M = 3 \text{ МэВ}/c^2$		<b>d-кварк</b> входит в состав протонов и нейтронов $M = 6 \text{ МэВ}/c^2$
<b>s-кварк (очарованный)</b> открыт в 1974 г. $M = 1300 \text{ МэВ}/c^2$		<b>χ-кварк (странный)</b> открыт в 1964 г. $M = 100 \text{ МэВ}/c^2$
<b>t-кварк</b> открыт в 1995 г. $M = 175000 \text{ МэВ}/c^2$		<b>b-кварк (прелестный)</b> открыт в 1977 г. $M = 4300 \text{ МэВ}/c^2$

Кванты фундаментальных полей

<b>Глюоны</b> кванты сильного взаимодействия		<b>Фотоны</b> кванты электромагнитного поля	
Взаимодействуют:	кварки и глюоны	Все заряженные частицы	
Объекты:	протон, нейтрон, атомные ядра, пи-мезон и др. мезоны	атомы, молекулы	
Процессы:	давление и синтез атомных ядер	электричество, магнетизм, распространение света, радиоволны	

Промежуточные векторные бозоны кванты слабого взаимодействия

<b>W, Z бозоны</b>		<b>Гравитоны</b> кванты гравитации	
Взаимодействуют:	кварки, лептоны, промежуточные бозоны	все частицы	
Объекты:		солнечная система, галактики, черные дыры	
Процессы:	бета-распад ядер, распад нейтрона и мюона	притяжение тел	

# 1. Общие сведения об элементарных частицах

**Элементарные частицы** 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**.

**электрон  $e^-$**  (позитрон  $e^+$ ),

**протон  $p$ ,**

**нейтрон  $n$ ,**

**фотон  $\gamma$ ,**

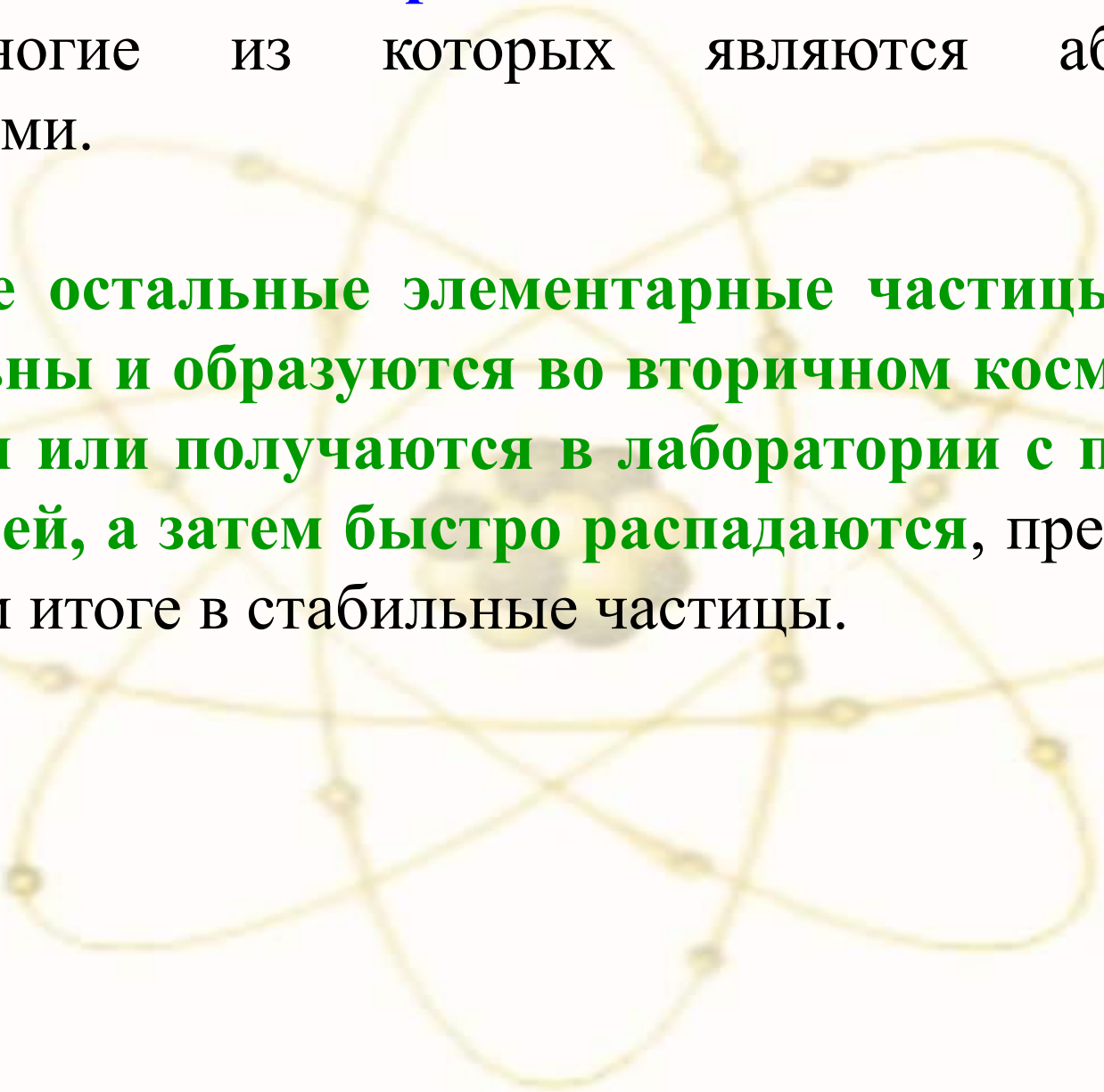
**электронное (анти) нейтрино  $(\nu_e) \tilde{\nu}_e$**

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



**Квазистабильные нейтроны входят в состав атомных ядер, многие из которых являются абсолютно устойчивыми.**

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



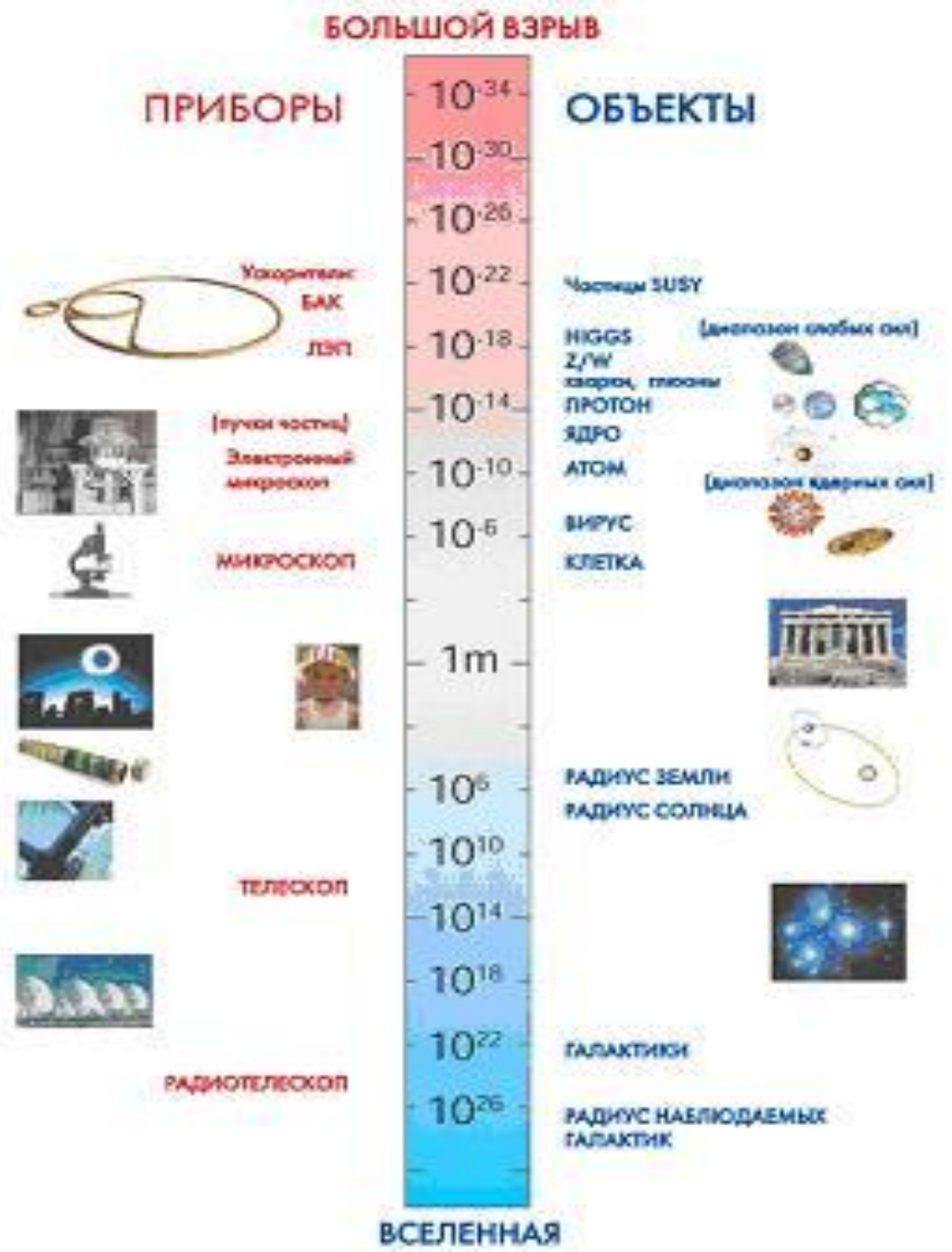
Для описания свойств отдельных элементарных частиц вводится **целый ряд физических величин**, значениями которых они и различаются.

Наиболее известными среди них являются

- **масса,**
- **среднее время жизни,**
- **спин,**
- **электрический заряд,**
- **магнитный момент.**

О других характеристиках частиц, в том числе о зарядах, отличных от электрического, будем говорить по ходу изложения.

# Масштабы пространства и способы их исследования.





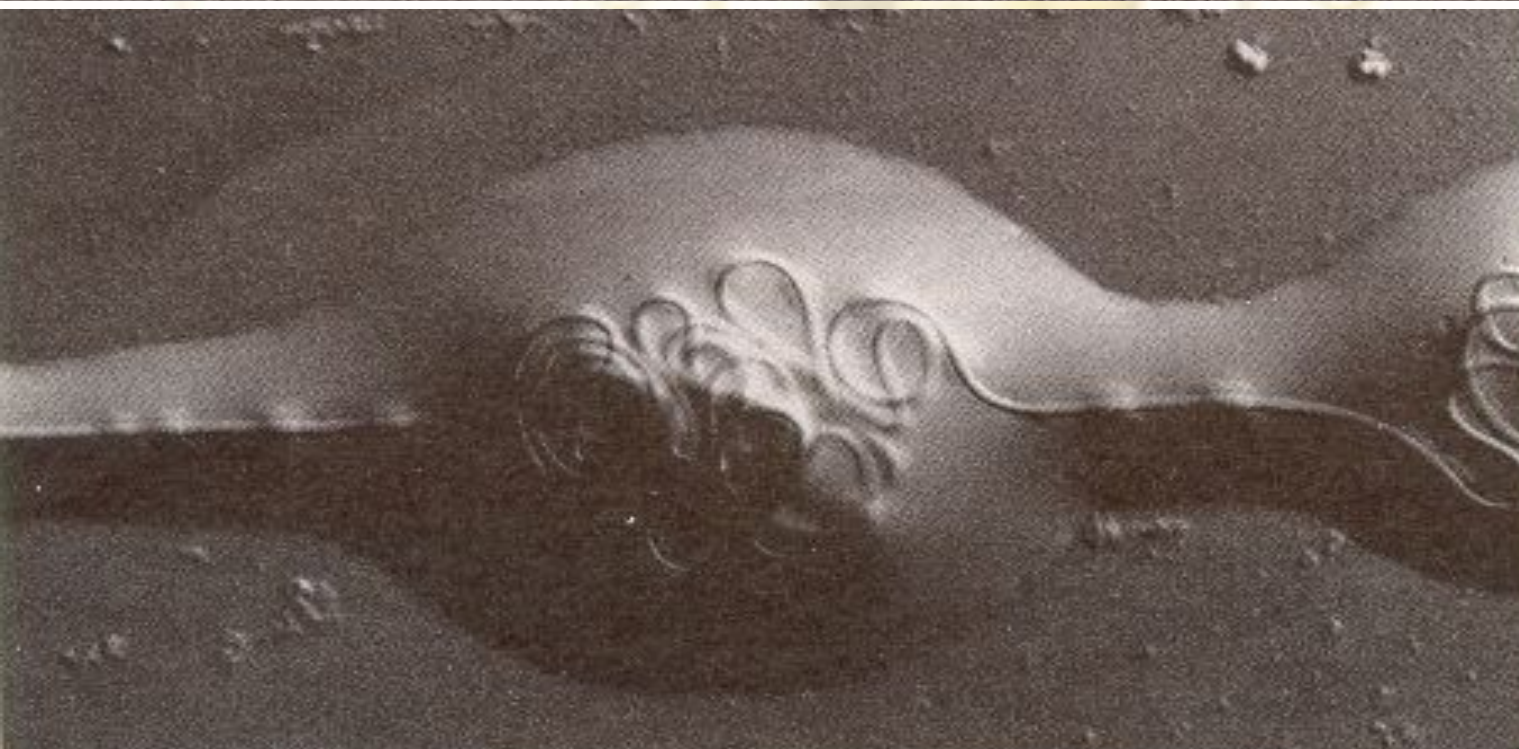
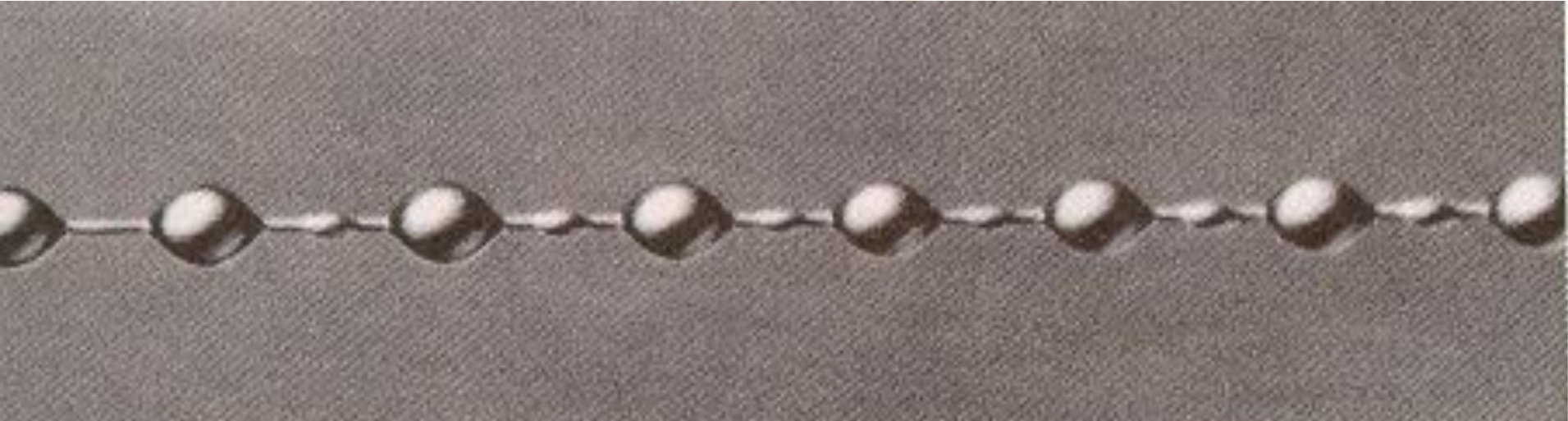
# Типы микроскопов:

**оптические,  
электронные,  
рентгеновские,  
туннельные**





# Оптическая микроскопия

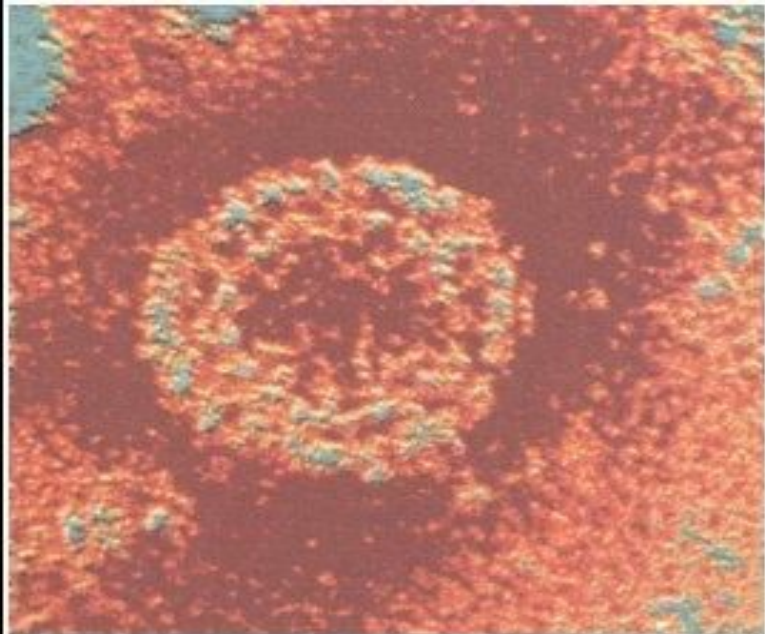




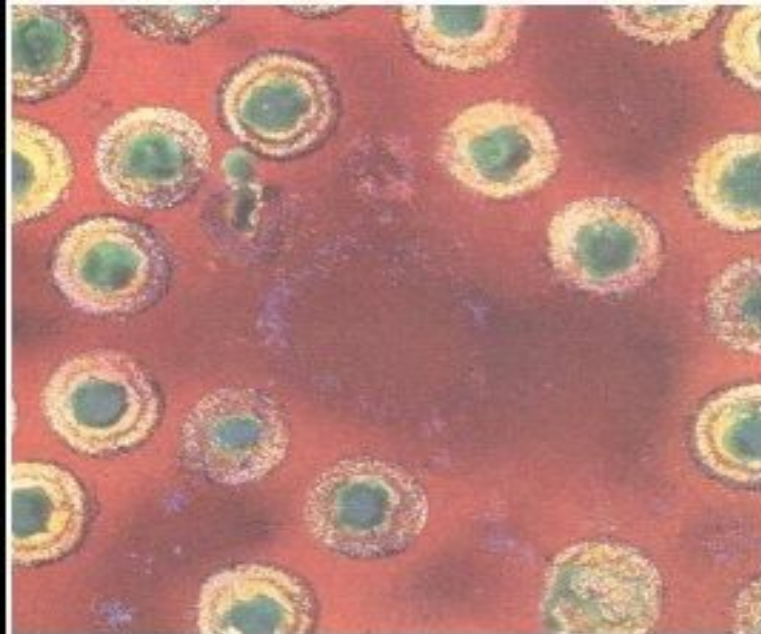
# Электронный растровый микроскоп



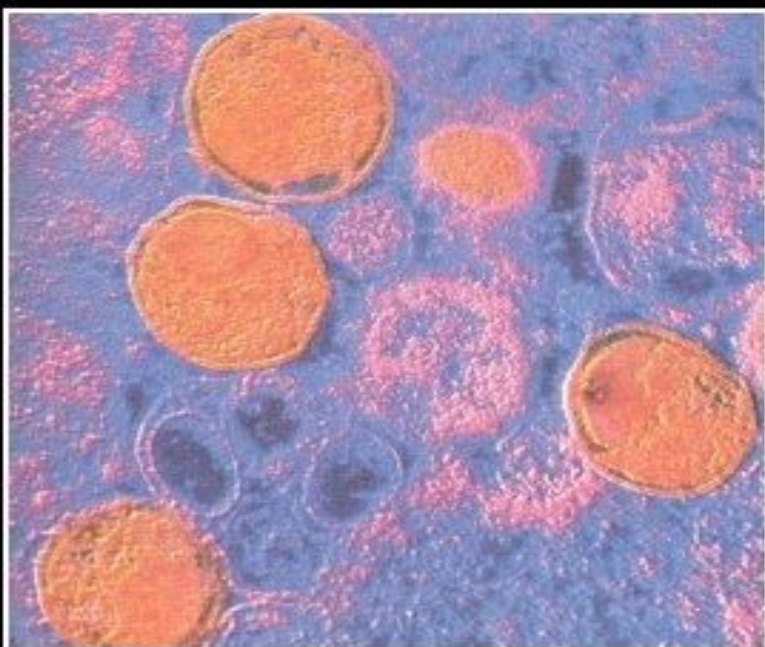




Вирус гепатита В



Вирус герпеса



Внутриклеточные бактерии хламидии



Вирус СПИД

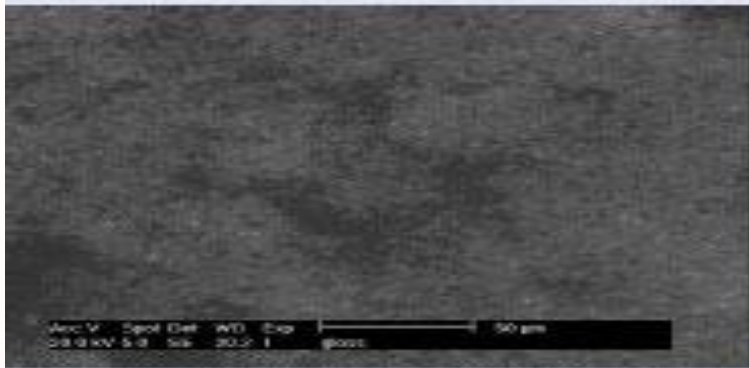


# СКАНИРУЮЩИЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ МИКРОСКОП

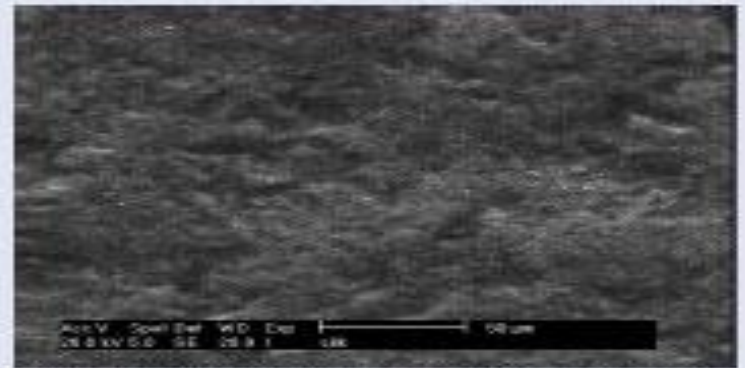




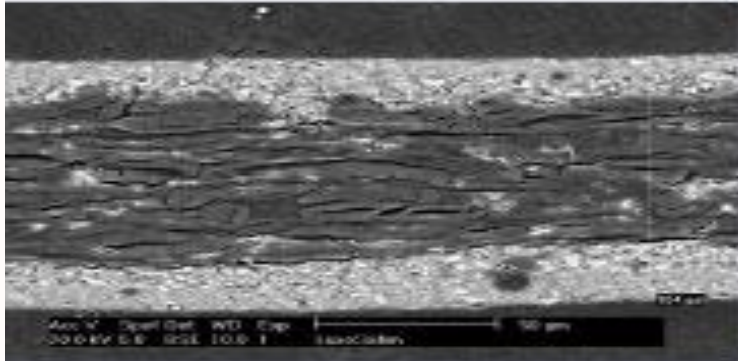
# Поверхность бумаги под электронным растровым микроскопом



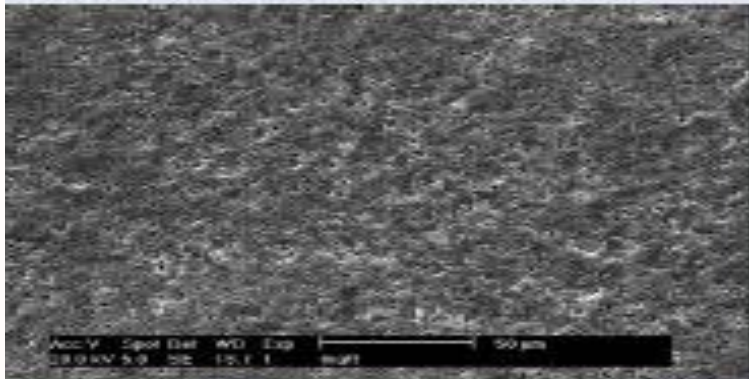
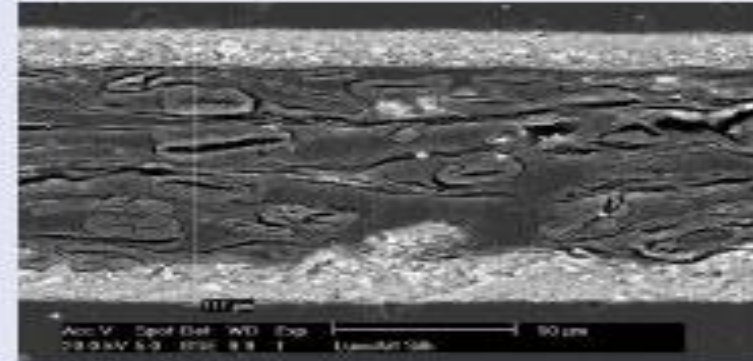
**Поверхность глянцевой мелованной бумаги**



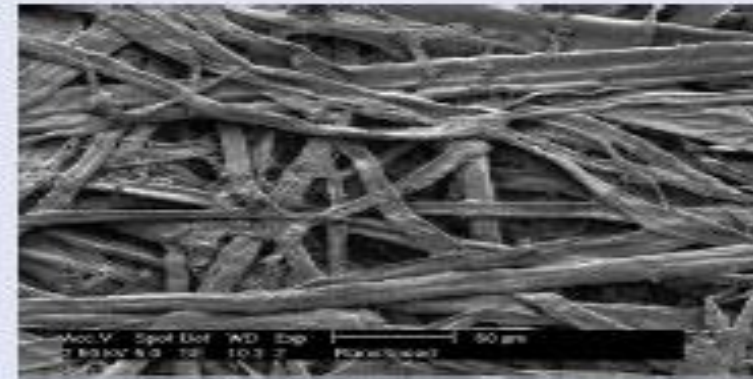
**Поверхность полуматовой мелованной бумаги**



**Поперечный срез двух видов бумаги (135 г/м<sup>2</sup>) демонстрирует разницу в толщине и плотности после каландрирования**



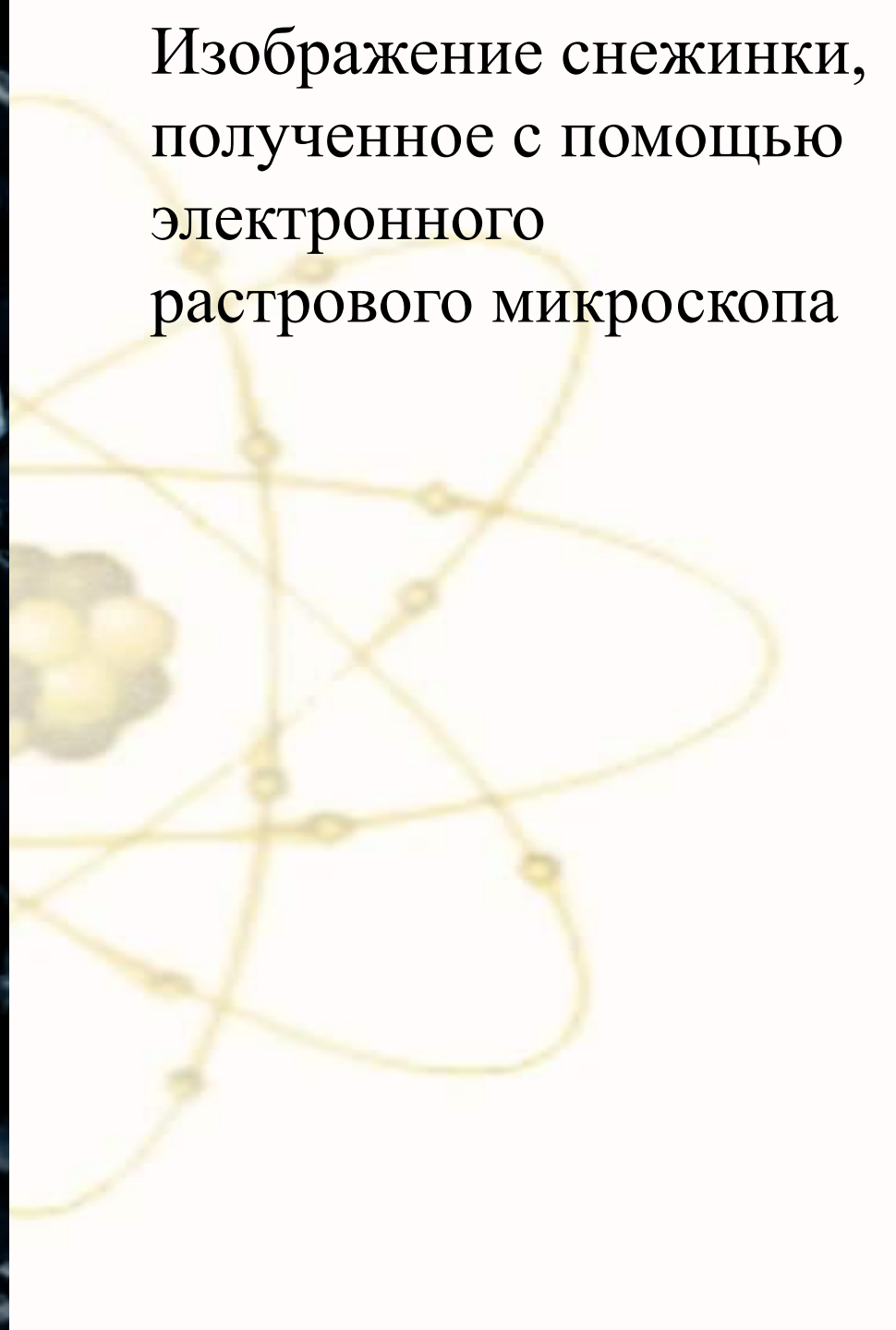
**Поверхность матовой немелованной бумаги**



**Пористая поверхность немелованной бумаги**



Изображение снежинки,  
полученное с помощью  
электронного  
растрового микроскопа



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:

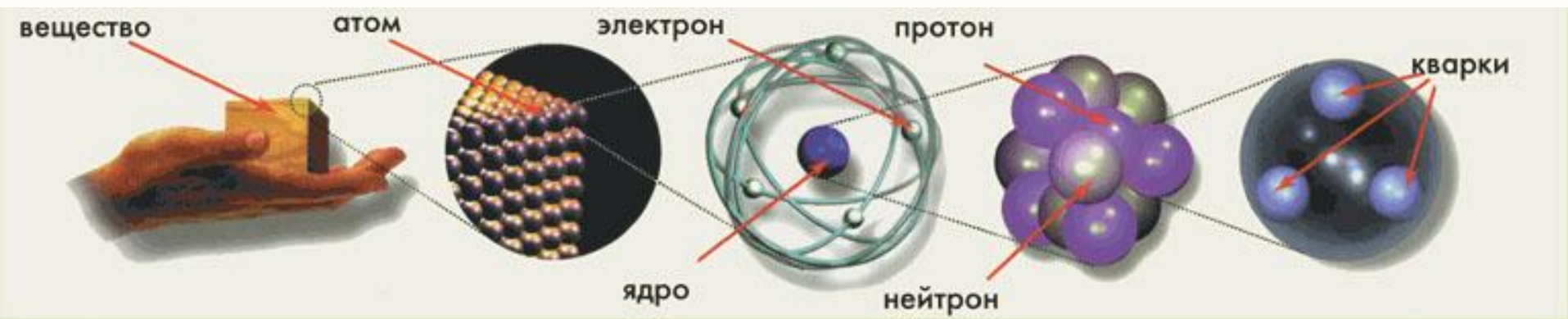
$$\Delta p > h / \Delta r. \text{ Если принять } \Delta p = E/c, \text{ то}$$
$$\Delta r = hc/E.$$

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*

$$E = 1 - 10 \text{ эВ} \quad \Delta r \approx 10^{-8} - 10^{-10} \text{ м}$$

2. *Ядерный*

$$E = 10^6 - 10^8 \text{ эВ} \quad \Delta r \approx 10^{-14} - 10^{-15} \text{ м}$$

3. *Мельчайшие частицы*

$$E < 10^8 \text{ эВ} \quad \Delta r < 10^{-15} \text{ м}$$



Кванты  
фундаментальных  
полей

Глюоны  
сильное  
взаимодействие



Взаимодействуют

кварки и глюоны

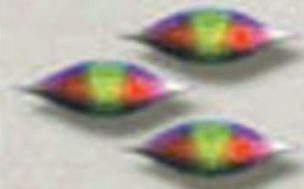
Объекты

протон, нейтрон, атомные  
ядра, мезоны

Процессы

деление и синтез атомных ядер

Фотоны  
электромагнитное  
взаимодействие



все заряженные частицы

атомы, молекулы

электричество, магнетизм,  
распространение света, радиоволны

Кванты  
фундаментальных  
полей

Промежуточные  
векторные бозоны  
слабое  
взаимодействие



Взаимодействуют

кварки, лептоны  
промежуточные бозоны

Объекты

Процессы

бета-распад ядер, распад нейтронов  
и мюонов

Гравитоны  
гравитация



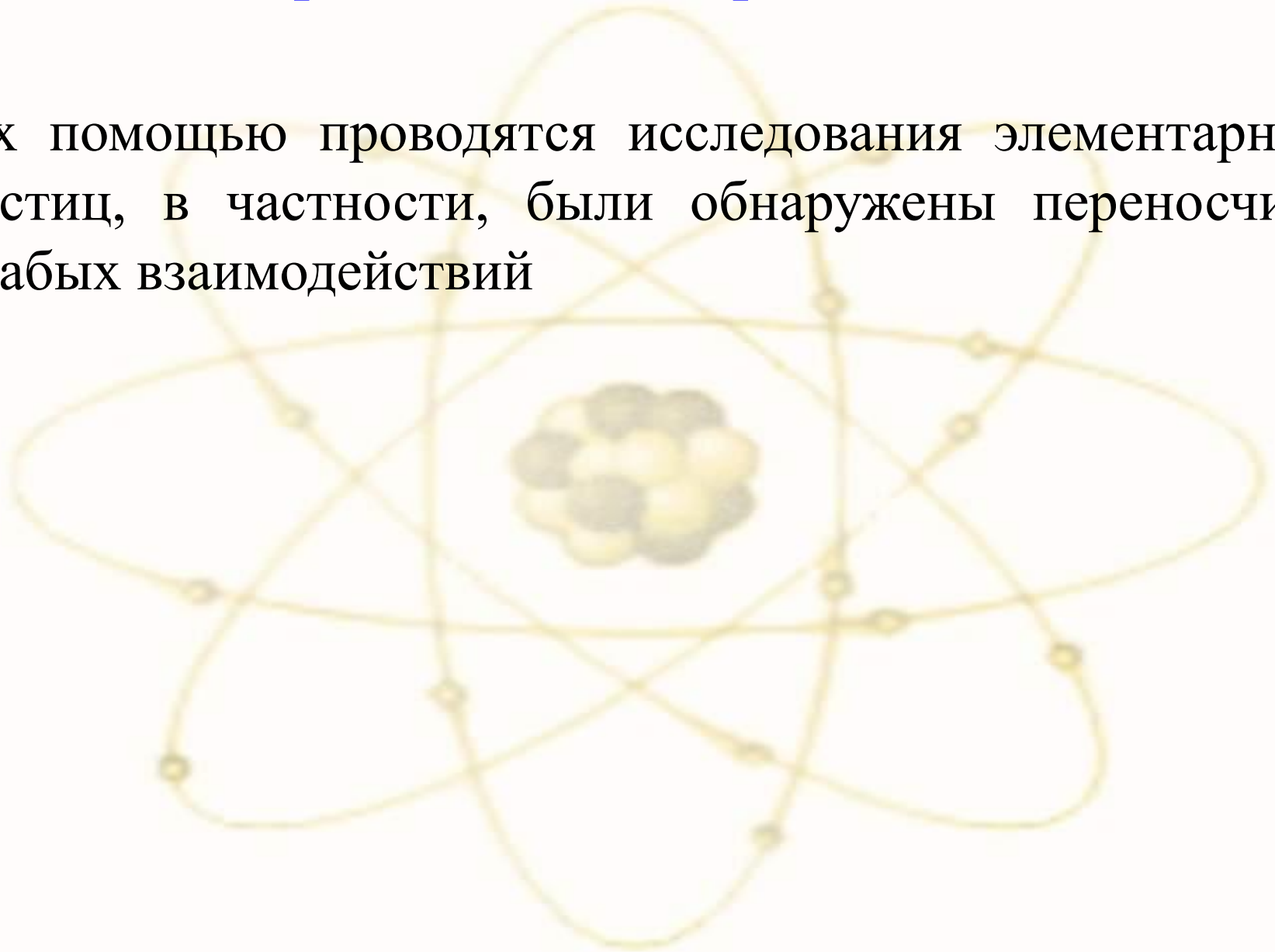
все частицы

Солнечная Система,  
галактики, черные дыры

притяжение тел

# Ускорители элементарных частиц

С их помощью проводятся исследования элементарных частиц, в частности, были обнаружены переносчики слабых взаимодействий





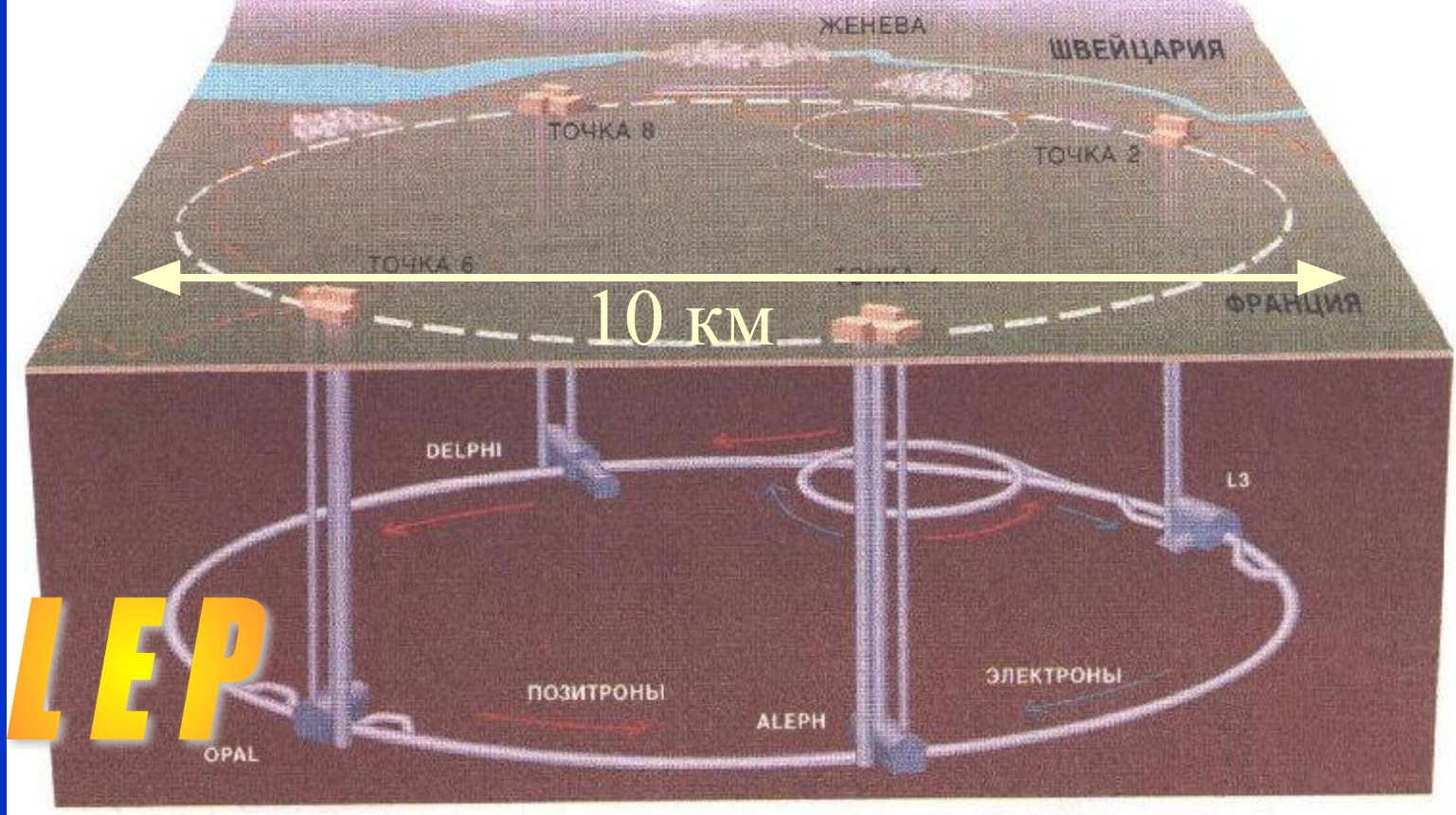
# SLAC



## 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

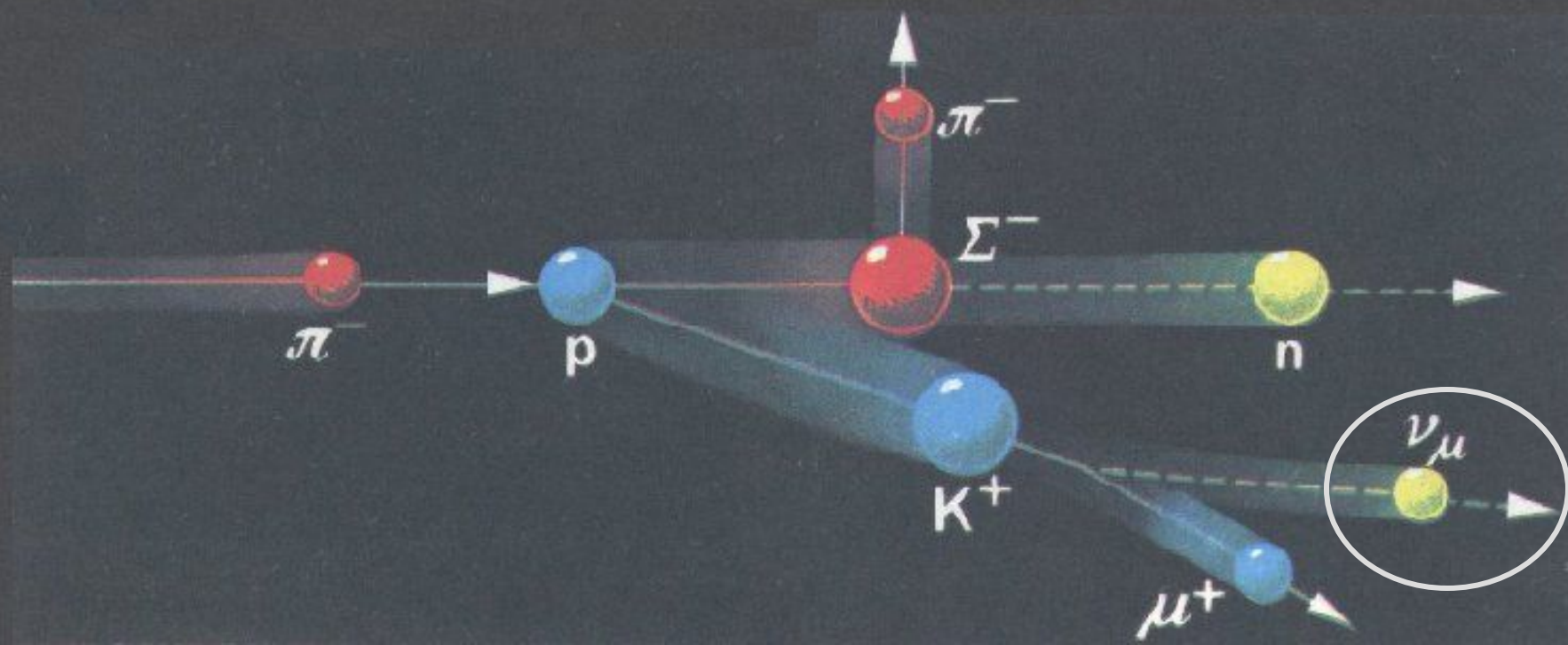
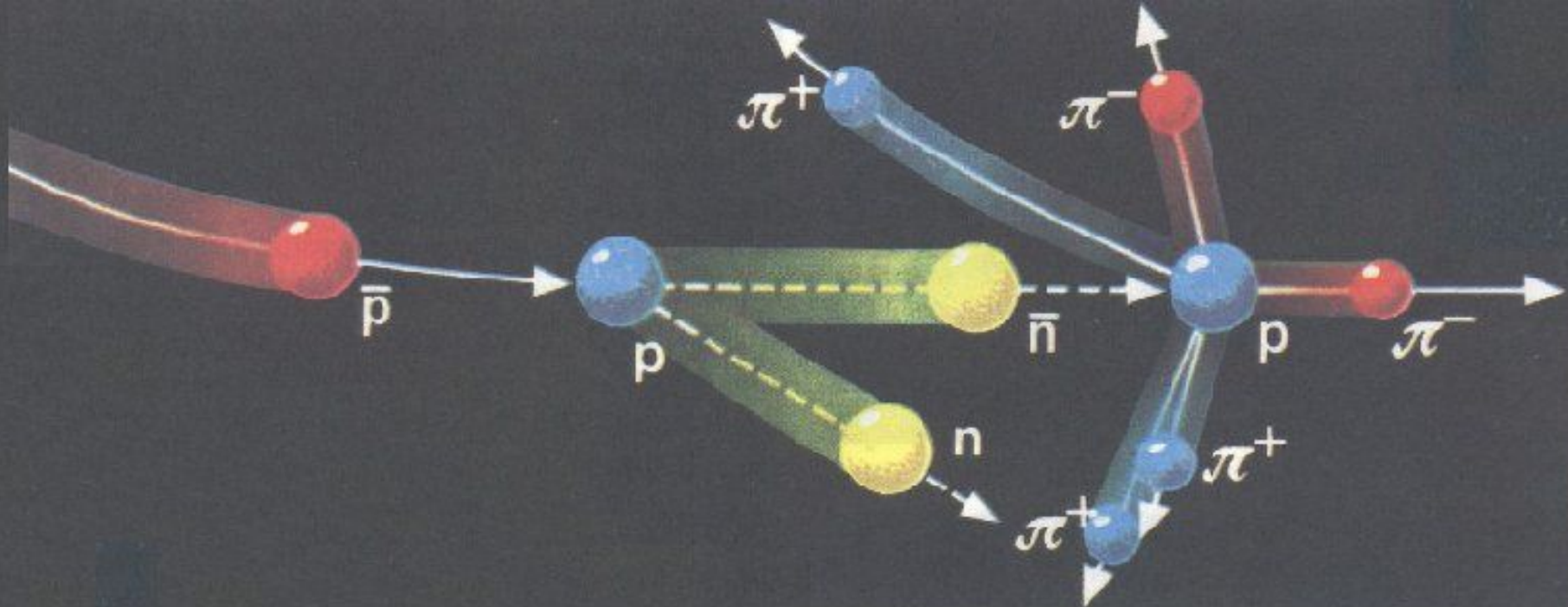
# ЛHC



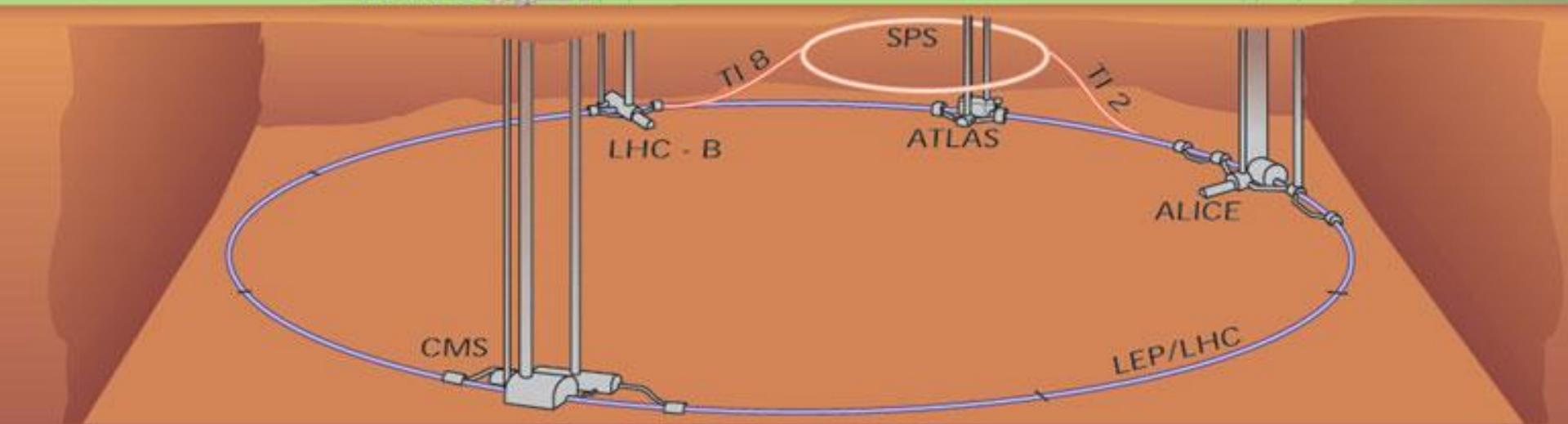
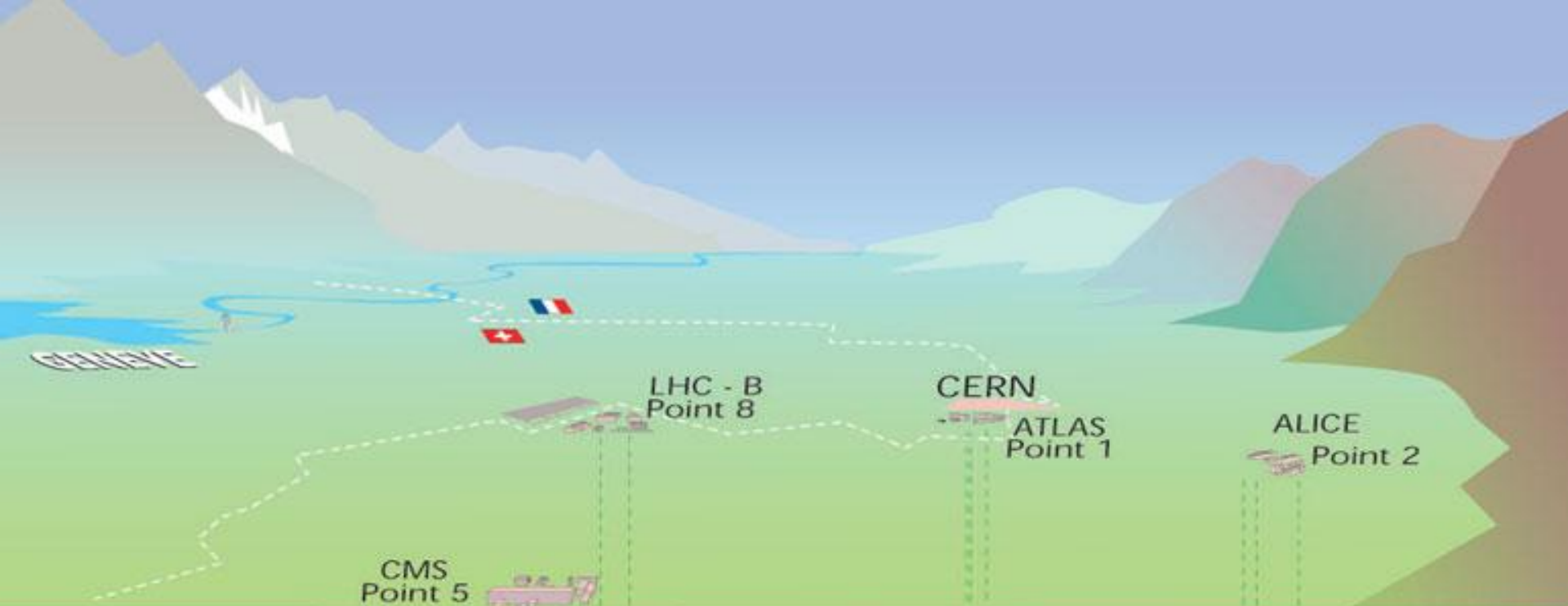
В 90-х гг. LEP был демонтирован и в 2000 г. в старом туннеле начато строительство ЛHC – Large Hadron Collider – Большого адронного коллайдера - нового кольца труб, в котором одновременно разгоняются два пучка протонов. За 1 с происходит более одного миллиарда соударений. В основу работы положен эффект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

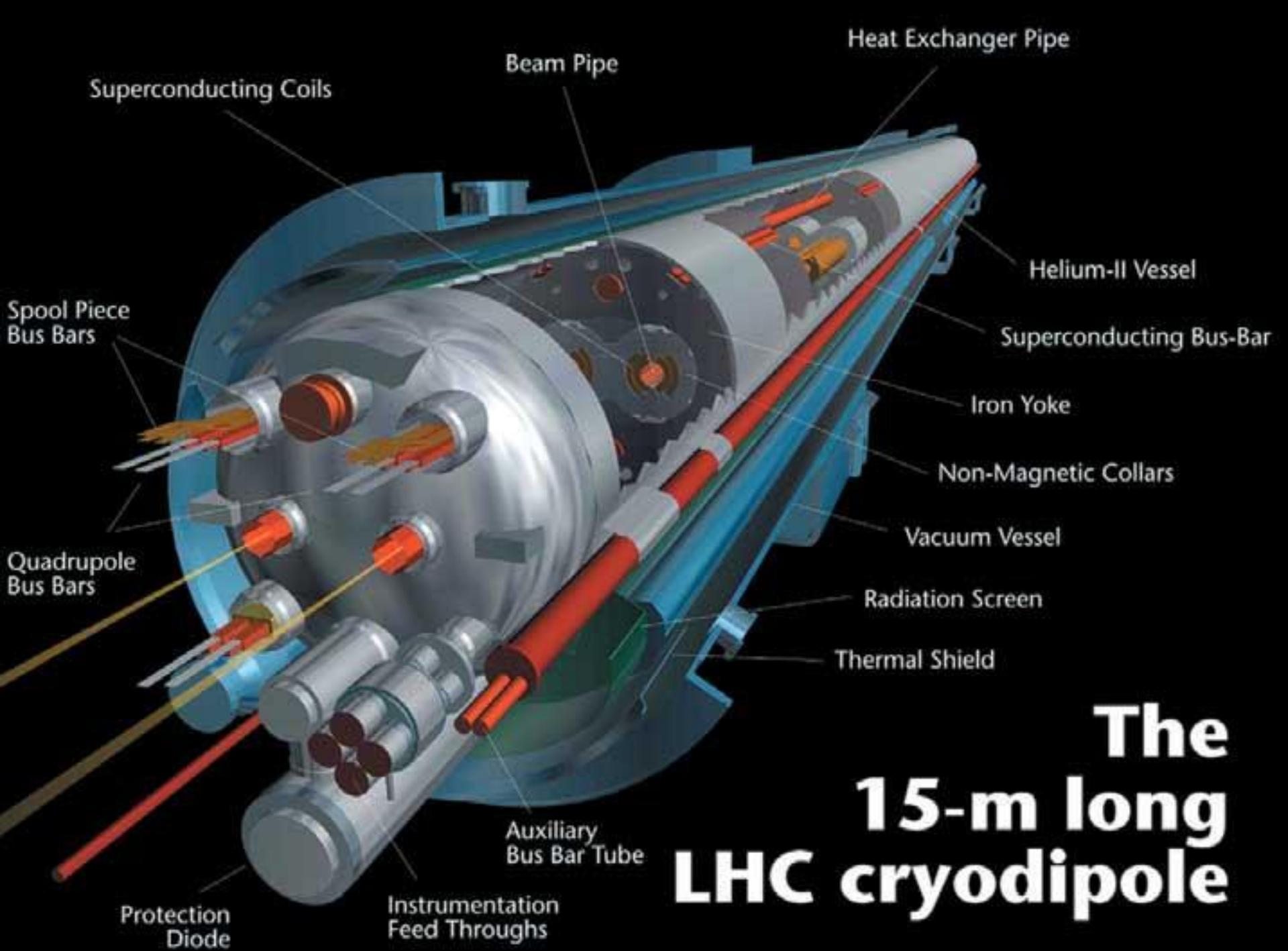
Температура установки  $-271^{\circ}\text{C}$ . Полученные энергии – тераэВ ( $10^{12}$ ).

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







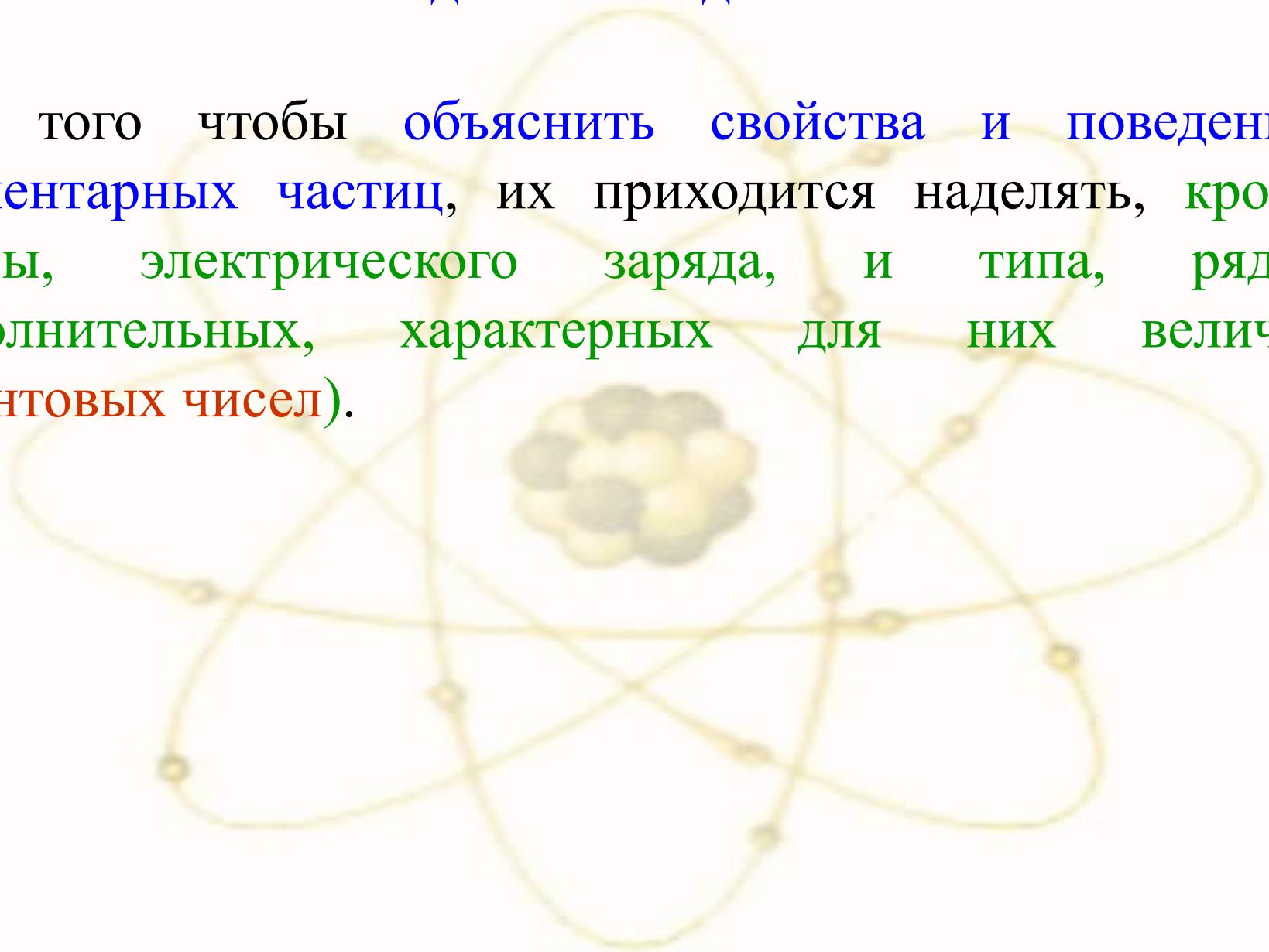


# The 15-m long LHC cryodipole



## 2. 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).



Известны **четыре вида 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. **Отношение констант даёт относительную интенсивность соответствующих взаимодействий.**



Тип взаимодействий	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.

## Электромагнитное взаимодействие.

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



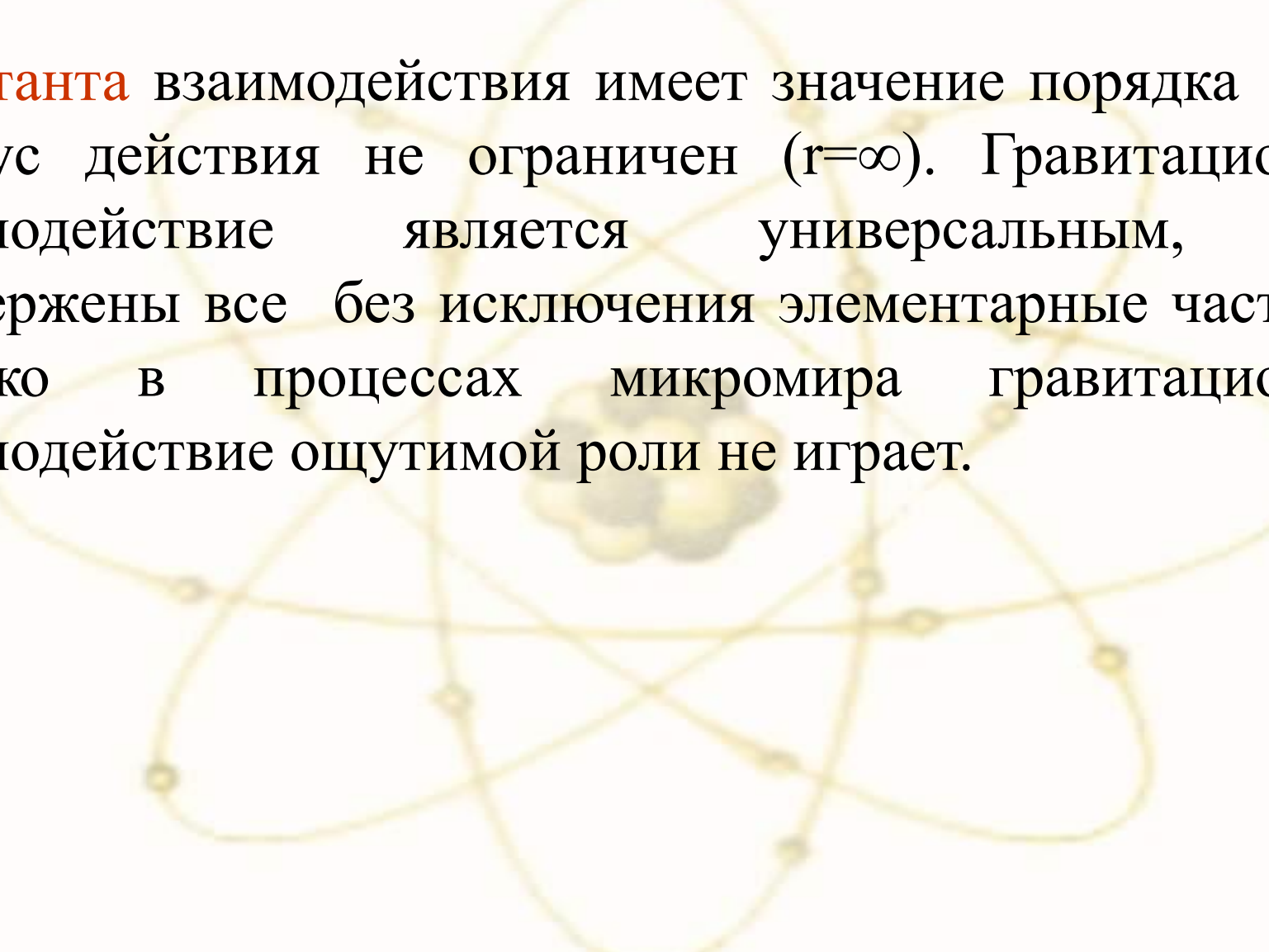
## Слабое взаимодействие.

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 порядка 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.





### 3. Краткая классификация и свойства частиц

Элементарные частицы обычно подразделяются на **четыре класса**.

1 - **фотон**.

2 - **лептоны**,

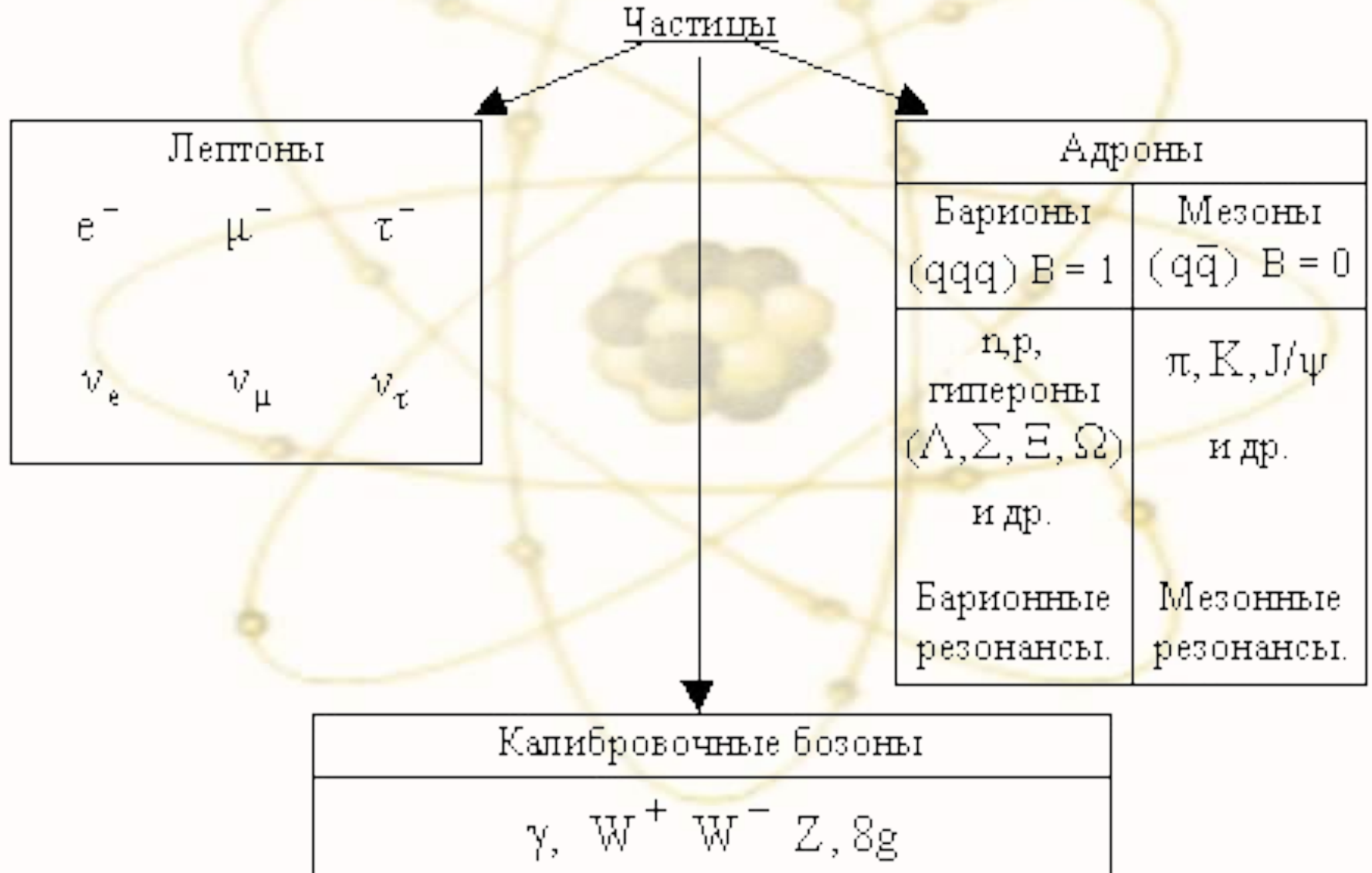
3 - **адроны**,

4 - **калибровочные бозоны**.

Мезоны и барионы часто объединяют в один класс сильно взаимодействующих частиц, называемых **адронами** (греческое слово «адрос» означает крупный, массивный).

Помимо перечисленных классов частиц предполагается существование ещё одного класса частиц — **гравитонов** (квантов гравитац. поля).

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



# 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

# ЛЕПТОНЫ

-1

0

## Электрон

переносит электрический ток

$$M = 0,511 \text{ МэВ}/c^2$$



## Электронное нейтрино

играет фундаментальную роли при горении Солнца. Каждую секунду сквозь нас пролетают миллиарды этих частиц



## Мюон

аналог электрона

Время жизни - 2 микросекунды

$$M = 106 \text{ МэВ}/c^2$$



## Мюонное нейтрино

образуется при рождении и распаде мюонов

$$M < 0,2 \text{ МэВ}/c^2$$



## Тау

аналог электрона

Время жизни - доли пикосекунды

$$M = 1777 \text{ МэВ}/c^2$$



## Тау нейтрино

образуется при рождении и распаде тау лептонов

Открыто в 1975 г.

$$M < 20 \text{ МэВ}/c^2$$





**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.

$$M = 4300 \text{ МэВ}/c^2$$



**1. ЛЕПТОНЫ** (греч.«лептос»–лёгкий). Это легкие частицы, не обладающие сильным взаимодействием:

**электроны** ( $e^-, e^+$ ),

**мюоны** ( $\mu^-, \mu^+$ ),

**таоны** ( $\tau^-, \tau^+$ ),

**электронное нейтрино** ( $\nu_e, \bar{\nu}_e$ ),

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

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

**Все лептоны** имеют **спины**, равные  $1/2$ , 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.

Эти частицы являются шестой компонентой космического излучения.

# Семейства частиц

Семейство 1	
Частица	Масса, МэВ Заряд
Электрон	0,00054 - 1
Электронное 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



Кварки и антикварки группируются либо по 2, либо по 3 частицы, образуя составные частицы, названные **адронами**.

# Адроны

## Барионы

3 кварка

### Нуклоны

$p, n$

### Гипероны

$m > m_{\text{нукл}}$

## Мезоны

кварк + антикварк

Обладают сильным (связь между нуклонами) и слабым взаимодействием

Обладают сильным взаимодействием  
Нестабильны (кроме  $p$ )

## Антивещество:

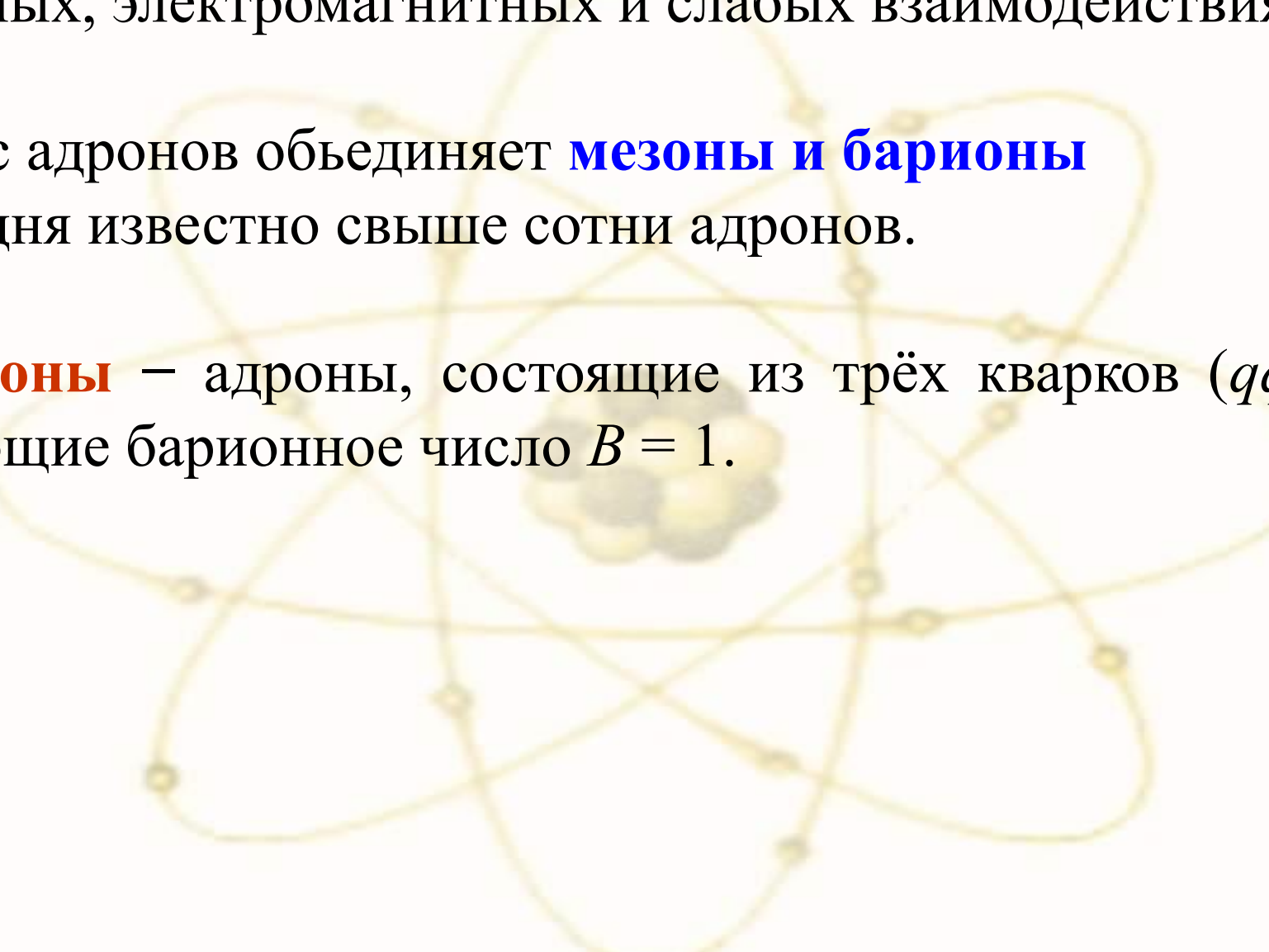
3 антикварка

**2. АДРОНЫ** – тяжелые, крупные частицы участвующие в сильных, электромагнитных и слабых взаимодействиях.

Класс адронов объединяет **мезоны и барионы**

Сегодня известно свыше сотни адронов.

**Барионы** – адроны, состоящие из трёх кварков ( $qqq$ ) и имеющие барионное число  $B = 1$ .



Класс **БАРИОНОВ** объединяет в себе **нуклоны** ( $p$ ,  $n$ ) и нестабильные частицы с массой большей массы нуклонов, получившие название **гипероны**

$$\Lambda, \Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-, \Xi^0, \Xi^-, \Omega^-$$

Все гипероны обладают сильным взаимодействием и, следовательно, активно взаимодействуют с атомными ядрами.

**Спин всех барионов равен  $1/2$** , так что барионы являются фермионами.

За исключением протона все **барионы нестабильны**: **время жизни** составляет всего лишь  $\sim 10^{-23} - 10^{-22}$  с.



**Мезоны** – адроны, состоящие из кварка и антикварка  $q\bar{q}$  и имеющие барионное число  $B=0$ .

**Мезоны** – сильно взаимодействующие нестабильные частицы, не несущие т. н. барионного заряда:

- **$\pi$  - мезоны** или пионы ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$ ),
- **$K$  - мезоны** или каоны ( $K^+$ ,  $K^-$ ,  $K^0$ ,  $\bar{K}^0$ )
- **$\eta$  – (эта) мезон**

Массы  $\pi^+$  и  $\pi^-$  мезонов одинакова и равна  $273,1m_e$ ,

$$m_{\pi^0} \approx 264,1 m_e$$

время жизни соответственно  $2,6 \cdot 10^{-8}$  и  $0,8 \cdot 10^{-16}$  с.

Масса  **$K$  – мезонов** составляет  $970m_e$ .

Время жизни  **$K$  – мезонов**  $10^{-8}$  с.

Масса **эта – мезонов**  $1074 m_e$ ,

Время жизни порядка  $10^{-19}$  с.

В отличие от лептонов, **мезоны** обладают не только **слабым** (и, если они заряжены, **электромагнитным**), но также и **сильным взаимодействием**, проявляющимся при взаимодействии их между собой, а также при взаимодействии между мезонами и барионами.

**Спин всех мезонов равен нулю**, так что они являются **бозонами**.

**3. Калибровочные бозоны** — **частицы переносящие взаимодействие между кварками и лептонами.**

## 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.

Массы адронов зависят от типов входящих в их состав кварков, а также от их спиновых состояний.



## 2. **Время жизни, $\tau$ .**

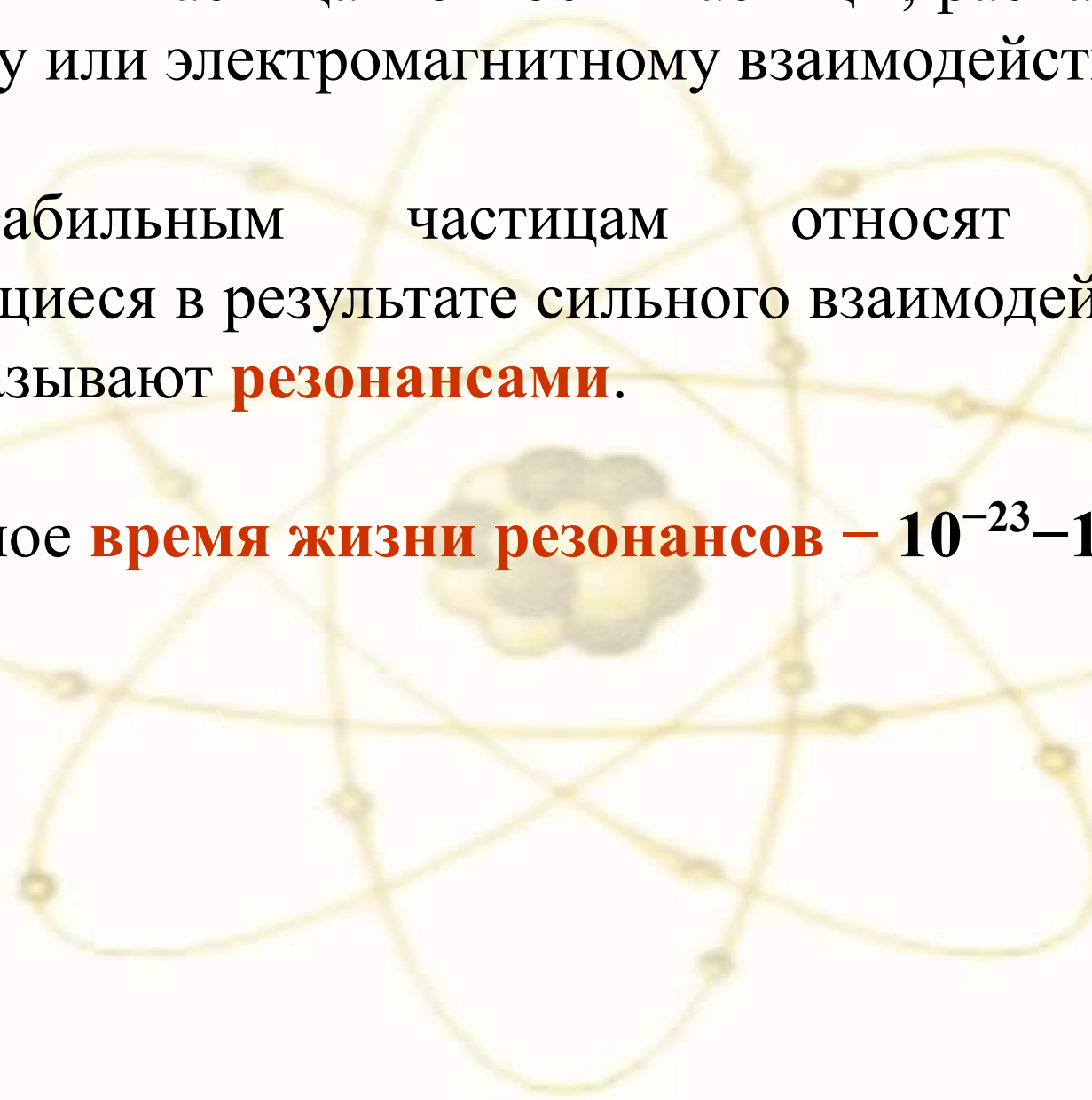
В зависимости от времени жизни частицы делятся на **стабильные частицы**, имеющие относительно большое время жизни, и **нестабильные**.

Деление частиц на стабильные и нестабильные условно: к **стабильным частицам** принадлежат 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 J.

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  $I = 0$ ,

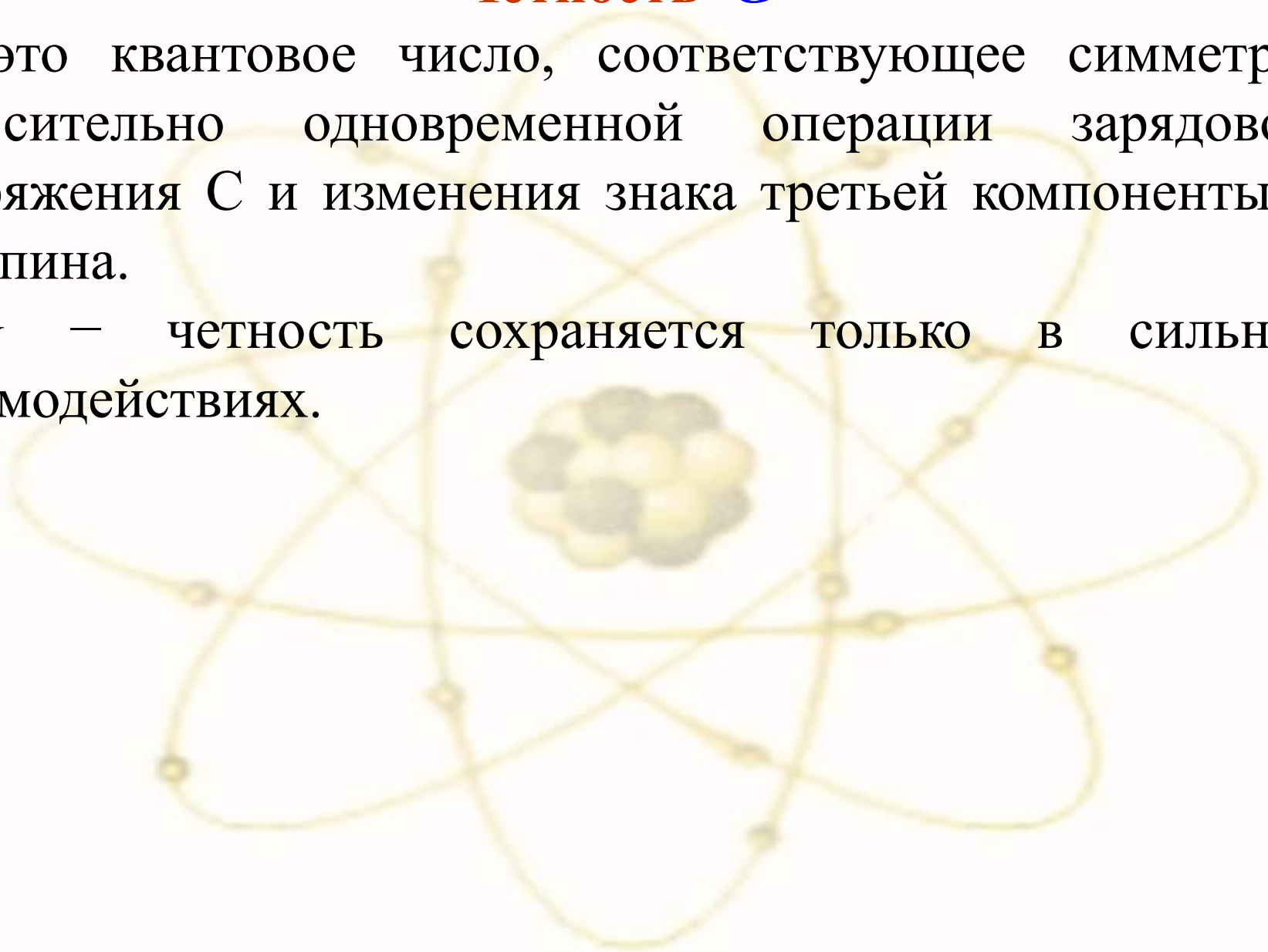
Число частиц, входящих в один изотопический мультиплет,  $2I+1$ .



## Четность $G$

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

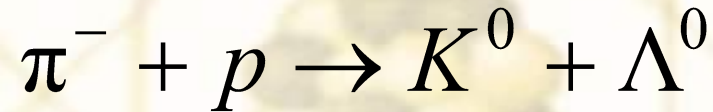
$G$  — четность сохраняется только в сильных взаимодействиях.



## Странные частицы

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

Во-первых, они всегда рождаются парами. Например, реакция



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 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).

Так вот 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 и 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.

Частица	Анти-частица	$m$ , МэВ	$\tau$ , с	Схема распада
$\gamma$		0	стабилен	
<b>ЛЕПТОНЫ</b>				
$e^-$	$e^+$	0,511	стабилен	$e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ $e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau; \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau;$ $\pi^- + \nu_\tau$
$\nu_e$	$\bar{\nu}_e$	0(?)	стабильно	
$\mu^-$	$\mu^+$	106	$2,2 \cdot 10^{-6}$	
$\nu_\mu$	$\bar{\nu}_\mu$	0(?)	стабильно	
$\tau^-$	$\tau^+$	1782	$3,4 \cdot 10^{-13}$	
$\nu_\tau$	$\bar{\nu}_\tau$	?	?	
<b>МЕЗОНЫ</b>				
$\pi^+$	$\pi^-$	140	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu_\mu$ $\gamma + \gamma; e^+ + e^- + \gamma$
	$\pi^0$	135	$0,8 \cdot 10^{-16}$	
$K^+$	$K^-$	494	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu_\mu; \pi^+ + \pi^0$ $\pi^+ + \pi^+ + \pi^-$
$K^0$	$\bar{K}^0$	498	$0,9 \cdot 10^{-10}$ $5 \cdot 10^{-8}$	$\pi^+ + \pi^-; \pi^0 + \pi^0;$ $\pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e;$ $\pi^- + e^+ + \nu_e$
$\eta$		549	$7 \cdot 10^{-19}$	$\gamma + \gamma; \pi^+ + \pi^- + \pi^0;$ $\pi^0 + \pi^0 + \pi^0$
<b>БАРИОНЫ</b>				
$p$	$\bar{p}$	938,3	стабилен (?)	$p + e^- + \bar{\nu}_e$ $p + \pi^-; n + \pi^0$ $p + \pi^0; n + \pi^+$ $\Lambda + \gamma$ $n + \pi^-$ $\Lambda + \pi^0$ $\Lambda + \pi^-$ $\Xi^0 + \pi^-; \Xi^- + \pi^0; \Lambda + K^-$
$n$	$\bar{n}$	939,6	918	
$\Lambda$	$\bar{\Lambda}$	1116	$2,6 \cdot 10^{-10}$	
$\Sigma^+$	$\bar{\Sigma}^+$	1189	$0,8 \cdot 10^{-10}$	
$\Sigma^0$	$\bar{\Sigma}^0$	1192	$5,8 \cdot 10^{-10}$	
$\Sigma^-$	$\bar{\Sigma}^-$	1197	$1,5 \cdot 10^{-10}$	
$\Xi^0$	$\bar{\Xi}^0$	1315	$2,9 \cdot 10^{-10}$	
$\Xi^-$	$\bar{\Xi}^-$	1321	$1,6 \cdot 10^{-10}$	
$\Omega^-$	$\bar{\Omega}^-$	1672	$0,8 \cdot 10^{-10}$	

Название частиц:  $e^-$  — электрон,  $\nu_e$  — электронное нейтрино,  $\mu^-$  — мюон,  $\nu_\mu$  — мюонное нейтрино,  $\tau^-$  — тяжелый лептон,  $\nu_\tau$  — тау-нейтрино,  $\pi^+$  — пи-плюс-мезон,  $\pi^0$  — пи-нуль-мезон,  $K^+$  — ка-плюс-мезон,  $K^0$  — ка-нуль-мезон,  $\eta$  — эта-мезон,  $p$  — протон,  $n$  — нейтрон,  $\Lambda$  — лямбда-гиперон,  $\Sigma^+$  — сигма-плюс-гиперон,  $\Sigma^0$  — сигма-нуль-гиперон,  $\Sigma^-$  — сигма-минус-гиперон,  $\Xi^0$  — кси-нуль-гиперон,  $\Xi^-$  — кси-минус-гиперон,  $\Omega^-$  — омега-минус-гиперон.

## 5. Кварки и очарование

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

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



**Американский физик Марри Гелл-Ман, работы которого определили развитие современной физики элементарных частиц**

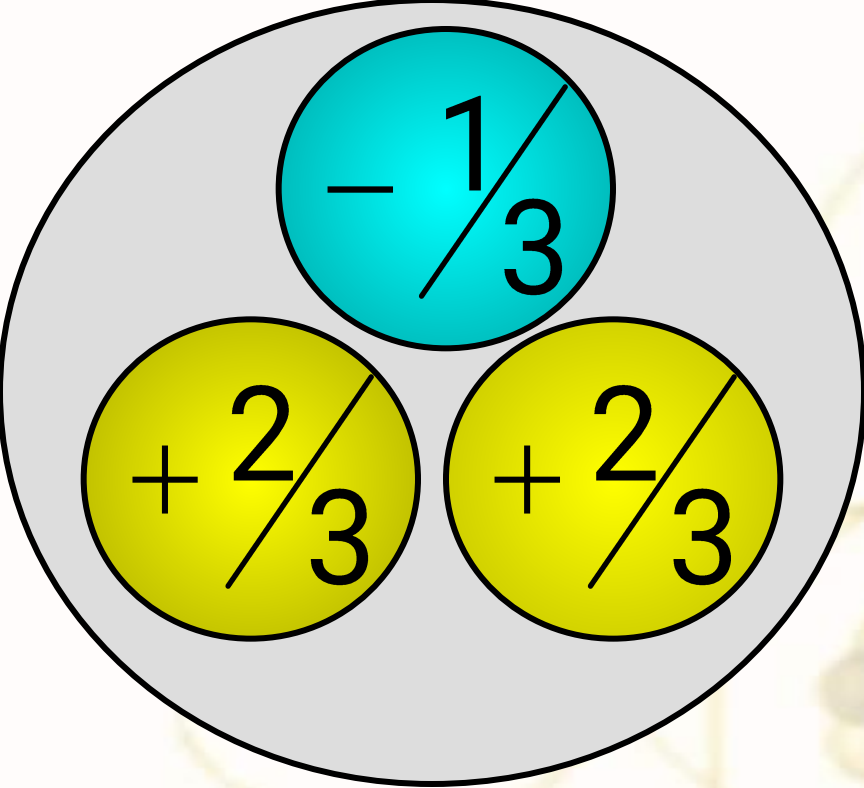


**Американский физик Джордж Цвейг, который независимо от Гелл-Мана ввел в физику понятие кварков**

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.**



**Барионы** состоят из трёх кварков:

Нейтрон  $n = \mathbf{ddu}$ ,

Антипротон  $\tilde{p} = \mathbf{uud}$

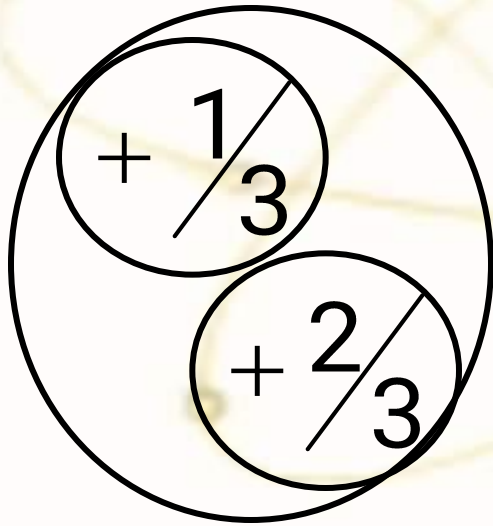


**Мезоны** состоят из сочетания кварк-антикварк.

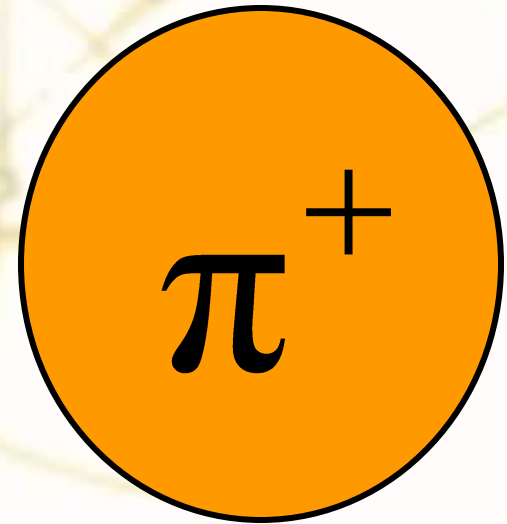
Например,

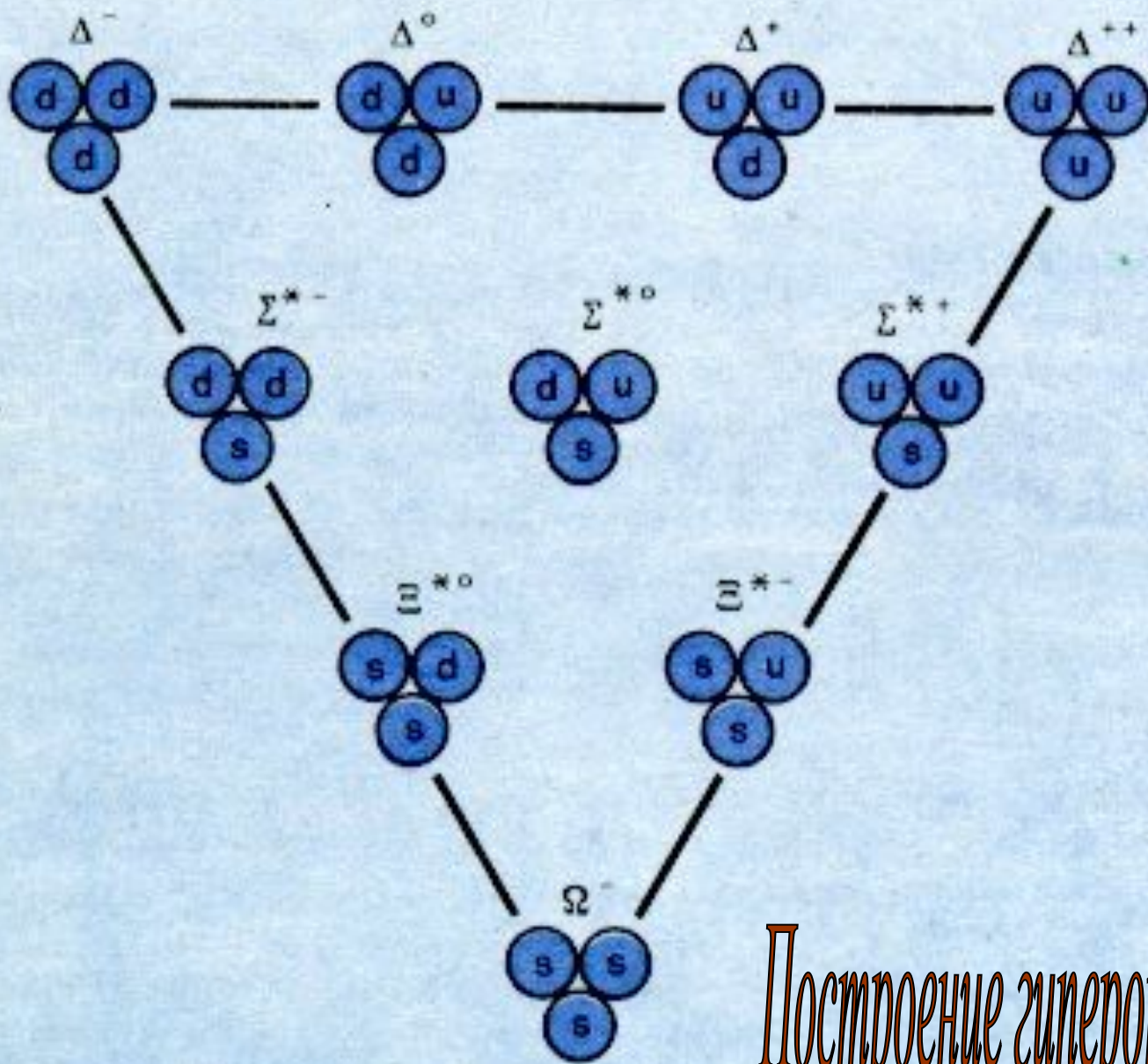
$\pi^+$ -мезон представляет собой пару

$u \bar{d}$



$u \bar{d}$





Построение гиперонов из трех кварков

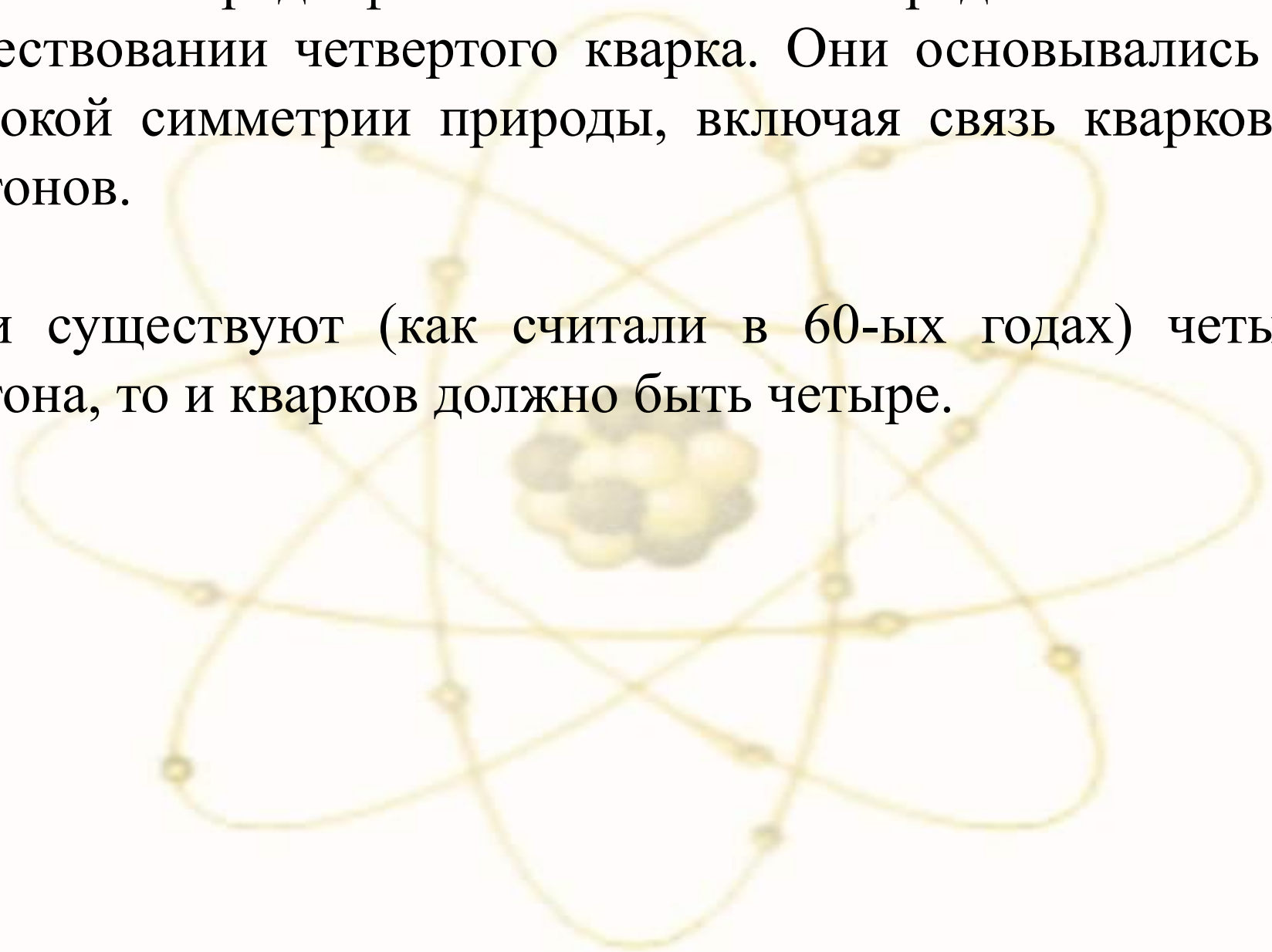
Вскоре после появления гипотезы кварков физики занялись поиском этих частиц с дробным знаком.

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

Было высказано предположение, что кварки очень сильно связаны и не существуют в свободном состоянии (заключены в адронах).

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.





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.

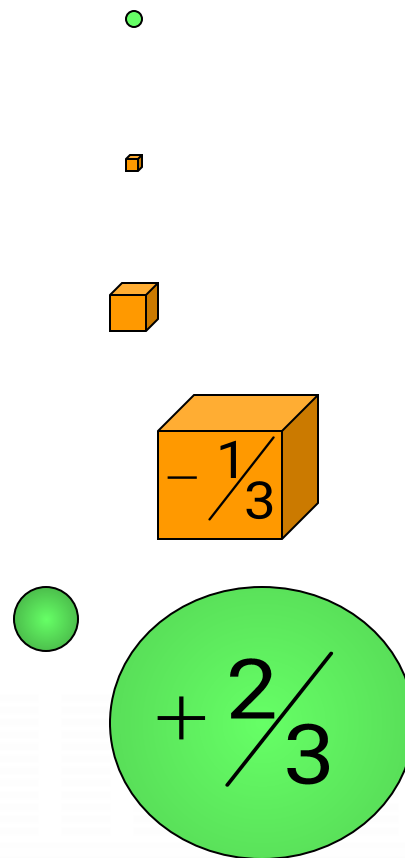
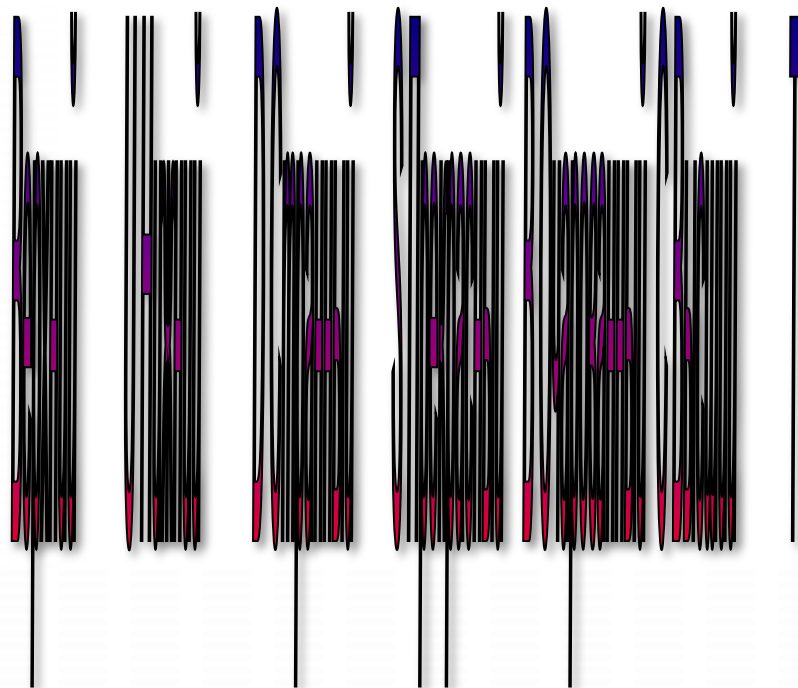
После открытия (экспериментального)  $\tau$ -лептона с массой  $178 \text{ МэВ}/c$  и соответствующего  $V_\tau$ , семейство лептонов стало насчитывать шесть частиц (и шесть античастиц).

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**.

# ***СЕМЕЙСТВО КВАРКОВ:***





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	0,007	0,005	0,15	1,3	4,1–4,4	174

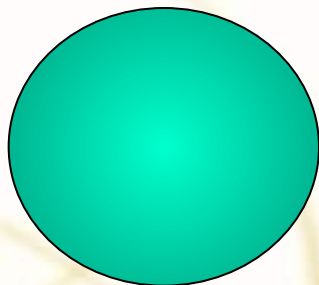
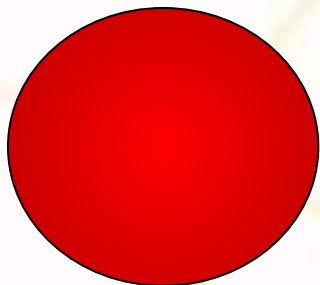
Вскоре после возникновения модели кварков было выдвинуто предположение, что **кварки обладают ещё одним свойством** (или качеством), которое получило название **цвет**.

Различия 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**.

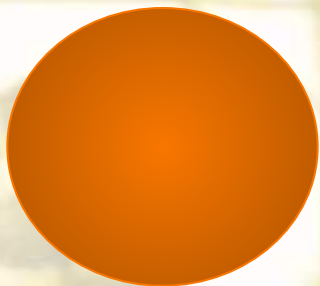
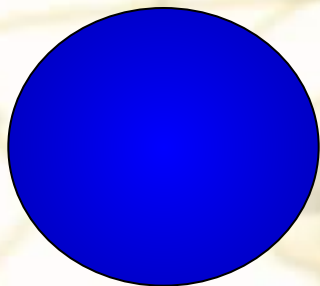
**Цвета антикварков** называются соответственно **антикрасный, антизелёный и антисиний**.

*красный*



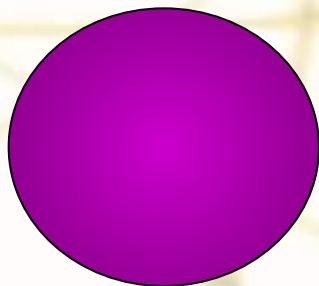
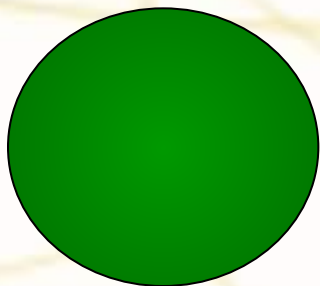
*антикрасный*

*синий*



*антисиний*

*зеленый*



*антизеленый*

**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*



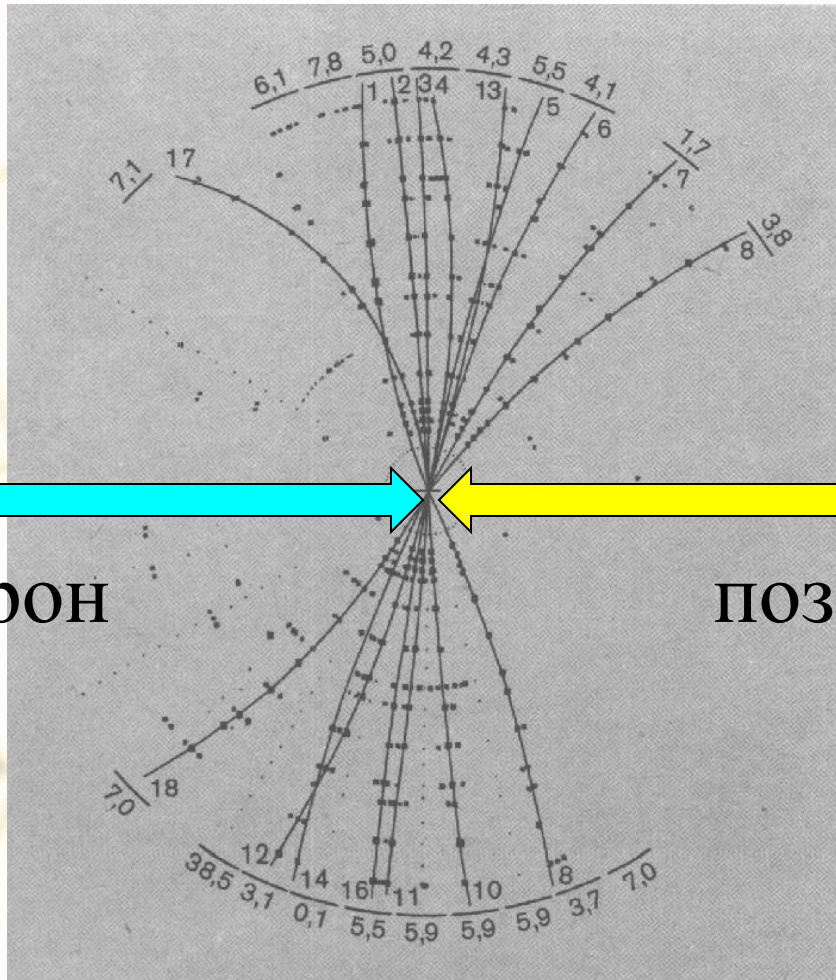
Первоначально цвета кварков были введены для того, чтобы удовлетворить принципу Паули для частиц со спинами  $1/2$  (или любым полуцелым спином, например,  $3/2$ ,  $5/2$  и т. д.) – таким, как электрон или нуклон.

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.

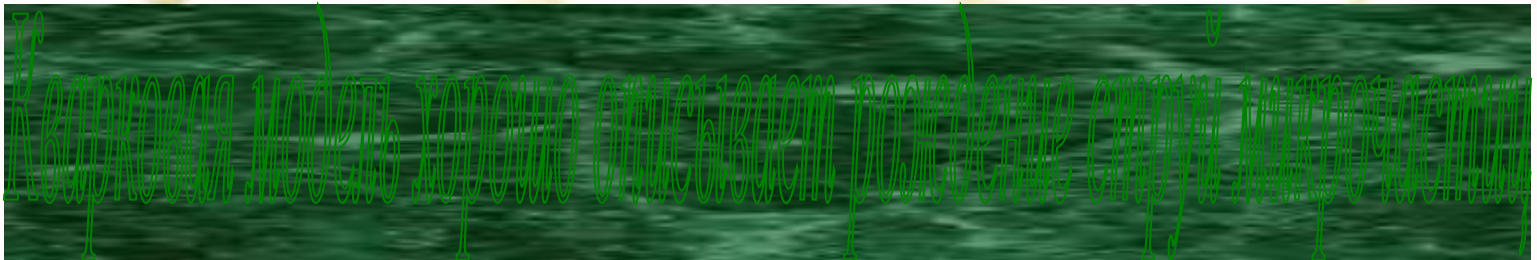
Хотя цвет кварков и связанное с ним (троекратное) увеличение числа кварков было введено искусственно, это позволило улучшить согласие теории с экспериментом и, в частности, предсказать правильное время жизни  $\pi^0$ -мезона.

Кроме того, представление в цвете вскоре стало центральным моментом теории, поскольку именно с цветом стали связывать взаимодействие, удерживающее кварки в адроне.



электрон

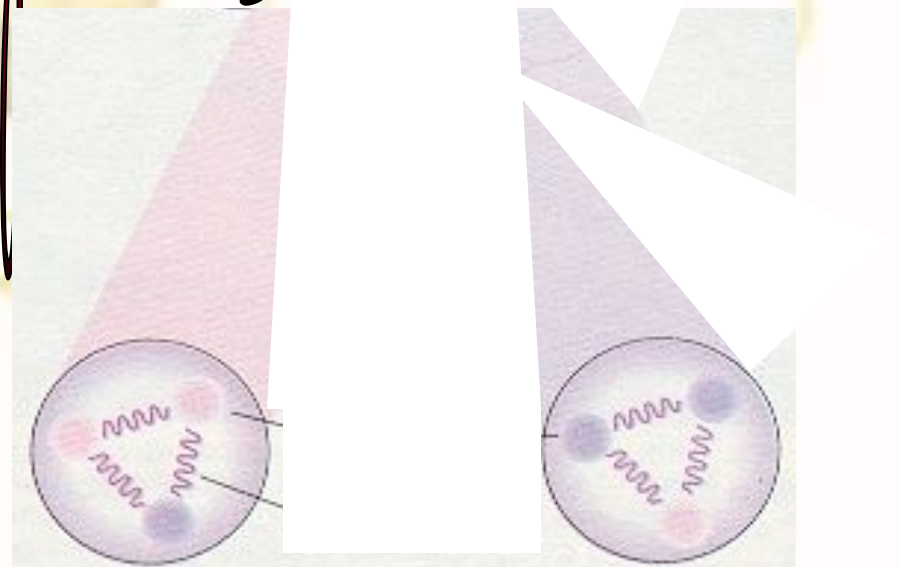
позитрон



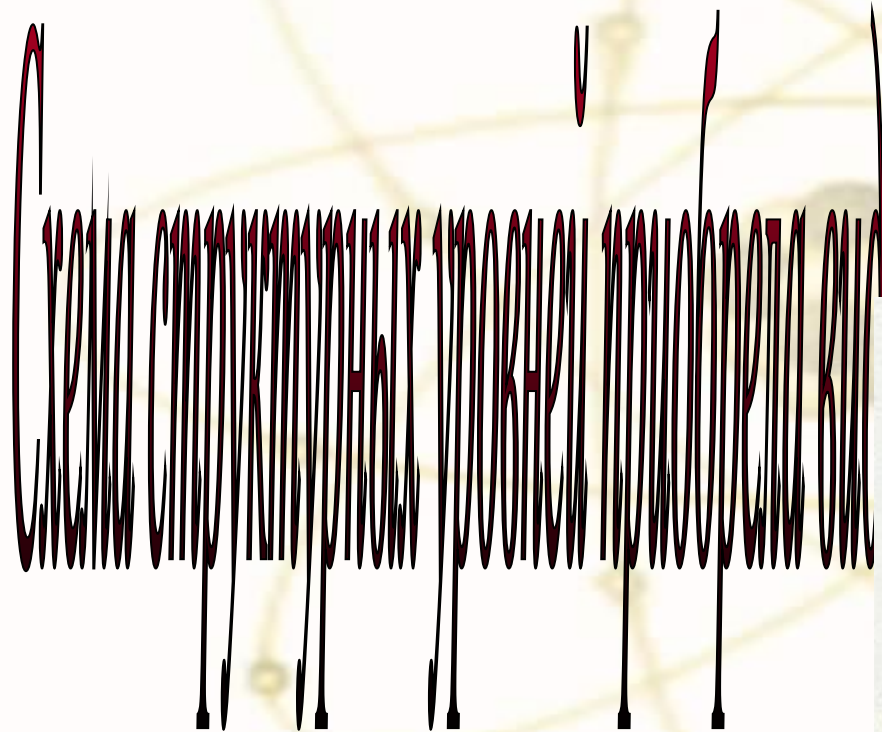
*Ядро*



*Нуклоны*



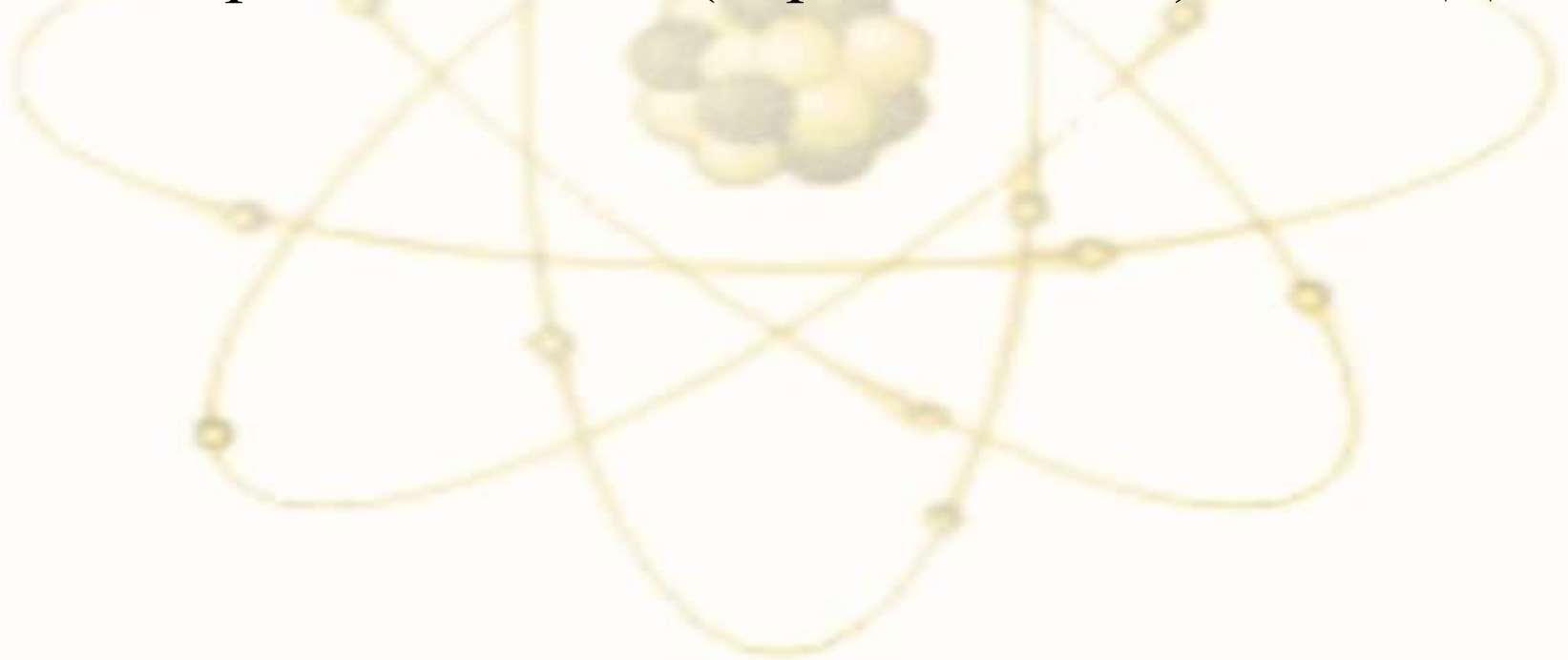
*Кварки*





Каждому кварку приписывается **ЦВЕТОВОЙ ЗАРЯД**, аналогичный электрическому заряду и сильное взаимодействие 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.

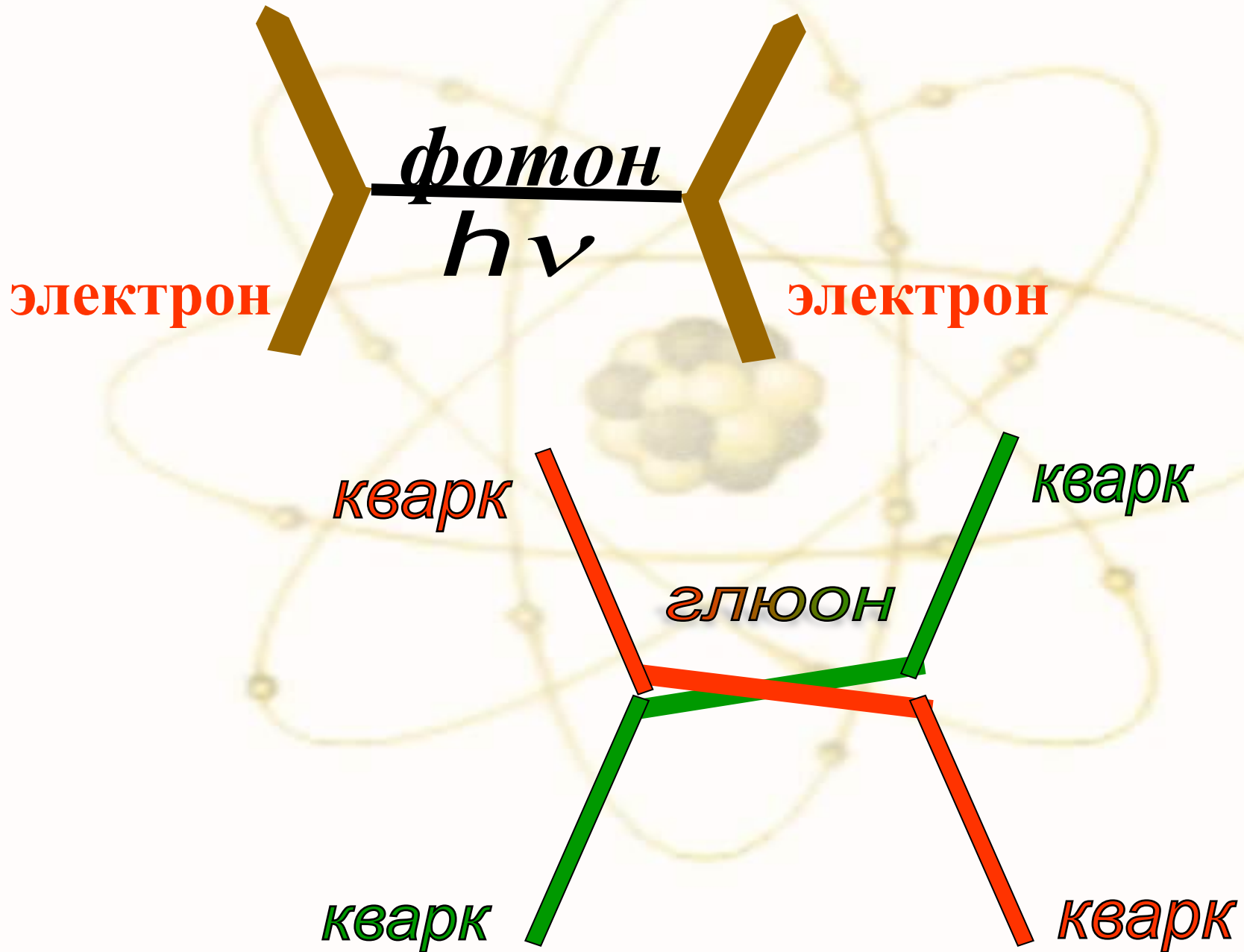
Частицы, переносящие взаимодействие, называются **ГЛЮОНАМИ** (от англ. glue— клей). Согласно теории существует восемь глюонов все с нулевой массой покоя, часть из них имеют цветовой заряд.

**Переносчиками слабого взаимодействия являются**

$W^{\pm}$  и  $Z^0$  — частицы.

Это взаимодействие обусловлено слабым зарядом, которым обладает каждая частица.

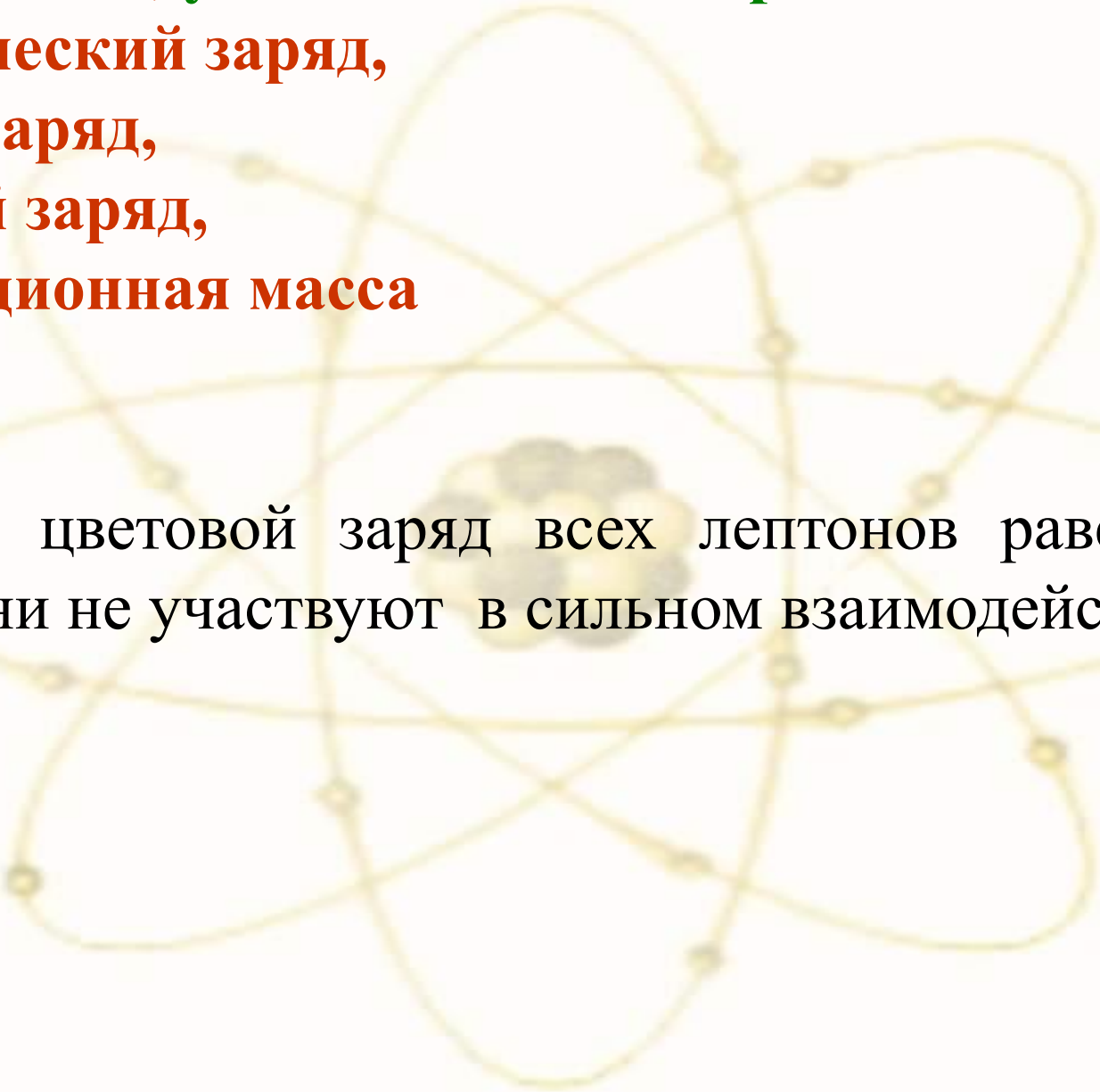
# Диаграммы Фейнмана



**Таким образом, у каждой элементарной частицы есть:**

- электрический заряд,
- слабый заряд,
- цветовой заряд,
- гравитационная масса

Например, цветовой заряд всех лептонов равен нулю, поэтому они не участвуют в сильном взаимодействии.





В современных теориях **истинно элементарными частицами являются фотон, лептоны, кварки, глюоны,  $W^\pm$  и  $Z^0$  – частицы.**

До сих пор наблюдались только комбинации кварков (барионы, мезоны). Весьма вероятно, что кварки не существуют в свободном состоянии.

Некоторые физики считают, что лептоны и кварки не являются фундаментальными частицами, а состоят из ещё более фундаментальных частиц.

## 6. Великое объединение

**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.

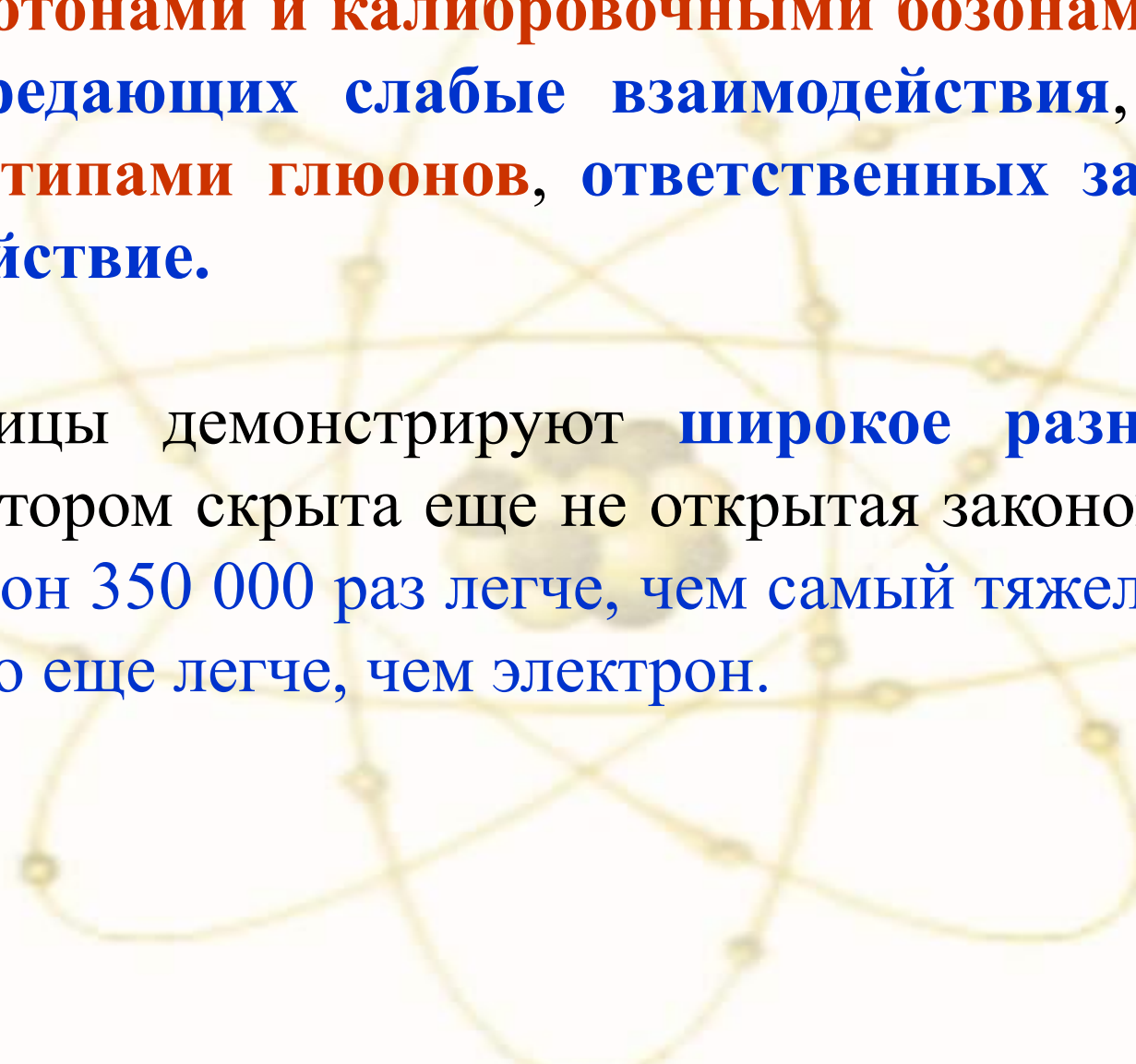
В частности, квант электромагнитного поля – частица, известная как **фотон**.

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

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 ( $\nu$ ).**

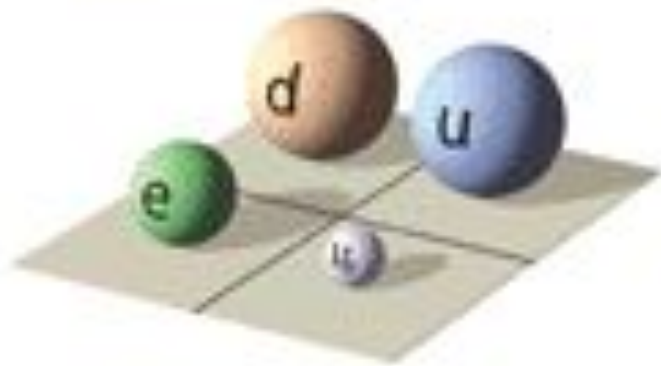
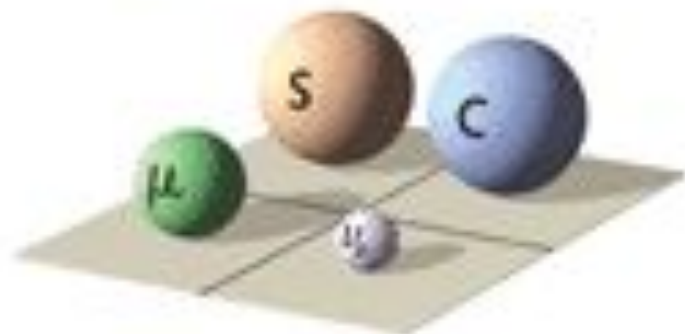
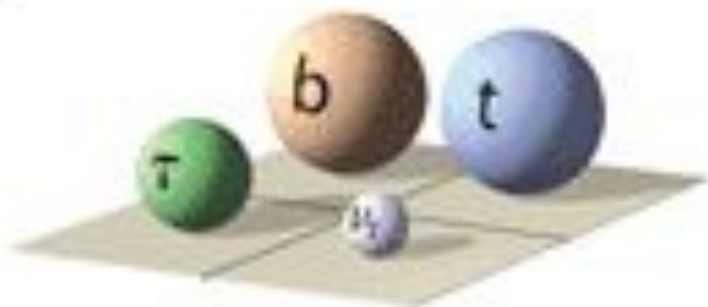
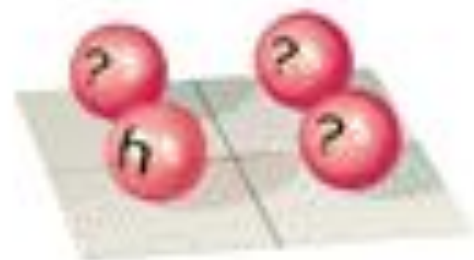
Имеются также **поля для кварков** различных типов, некоторые из которых связаны вместе внутри протонов и нейтронов, составляющих ядра обычных атомов.



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.



**a****b****c**

**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 родственным 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		

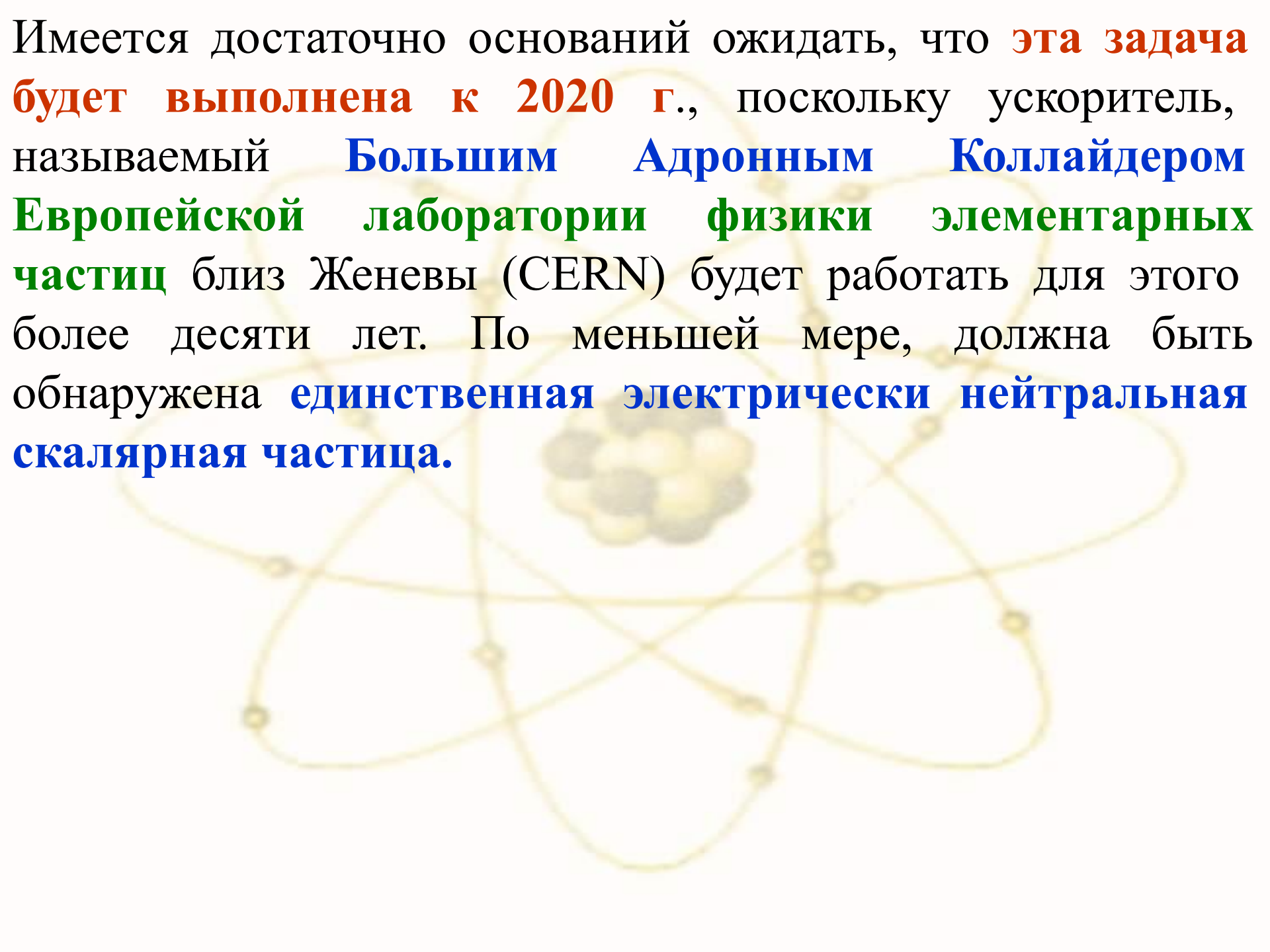
?



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 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**