

Физика элементарных частиц

Содержание лекции:

- **Элементарные частицы.**
- **Виды взаимодействий**
- **Классификация элементарных частиц**

1. Элементарные частицы

Сегодня в микромире выделяют четыре уровня вещества:

1. молекулярный
2. атомный
3. нуклонный (атомное ядро и составляющие его частицы)
4. кварковый.

Обсуждается возможный **пятый (суперструнный)** уровень.

Каждый вновь открываемый уровень качественно отличается от ранее известных: его характеризуют иные свойства и иные законы поведения соответствующих частиц.

Абсолютной элементарности не существует: частица любого уровня сложна в своей сущности и в своих проявлениях.

Условно под **элементарными частицами** понимаются частицы, у которых сегодня не обнаружена внутренняя структура, а их размеры недоступны измерению.

Их характерная особенность – способность к взаимным превращениям.

Общее число известных элементарных частиц (вместе с античастицами) ~ 400 .

Электрон e^-	+ античастицы	} Стабильные частицы; существуют в природе в свободном или слабосвязанном состоянии.
протон p ,		
фотон γ		
электронное нейтрино		

Квазистабильные: время жизни превышает 10^{-20} с.

Почти все элементарные частицы **нестабильны**, спонтанно превращаясь в стабильные частицы.

Резонансы – нестабильные частицы с временем жизни 10^{-23} с.

Из соотношения неопределенностей Гейзенберга следует, что для выявления деталей структуры порядка Δr нужно иметь зондирующие частицы с импульсом

$$\Delta p \geq \frac{\hbar}{2\Delta r}$$

Связь между импульсом и энергией

$$p = E/c.$$

Современные ускорители позволяют получать частицы с энергией до **1000 ГэВ $\approx 10^{12}$ эВ**. Следовательно,

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

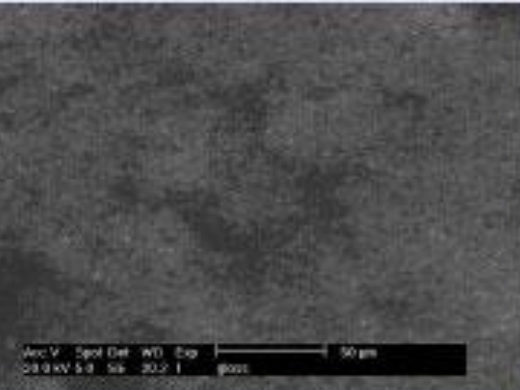
- с помощью современных методов исследования можно проникнуть вглубь структуры вещества **до 10^{-19} м**.

The image shows a microscopic view of a chain of spherical particles, likely a polymer chain, at the top. Below it, there is a larger, more complex structure that appears to be a cross-section or a detailed view of a similar material, showing internal details and a wavy, layered appearance. The overall image has a dark, grainy background, characteristic of a micrograph.

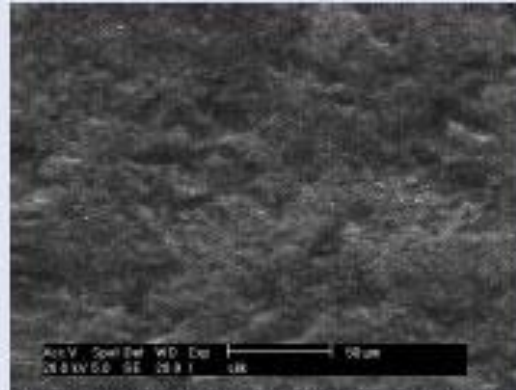
Оптическая микроскопия

Электронный растровый микроскоп

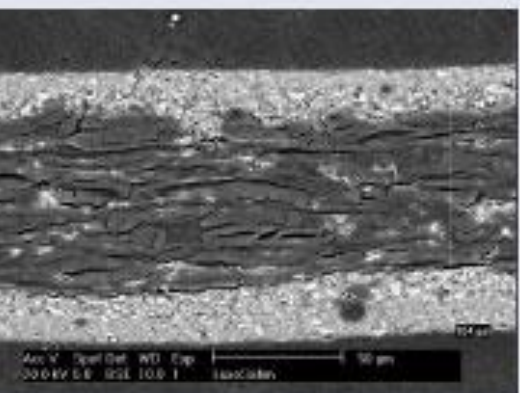




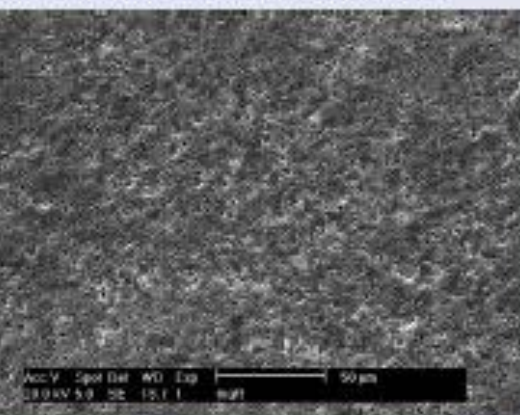
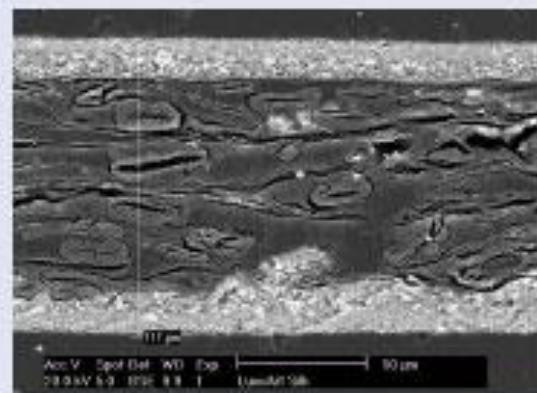
Поверхность глянцевой мелованной бумаги



Поверхность полуматовой мелованной бумаги



Поперечный срез двух видов бумаги (135 г/м²) демонстрирует разницу в толщине и плотности после каландрирования



Поверхность матовой мелованной бумаги



Пористая поверхность немелованной бумаги

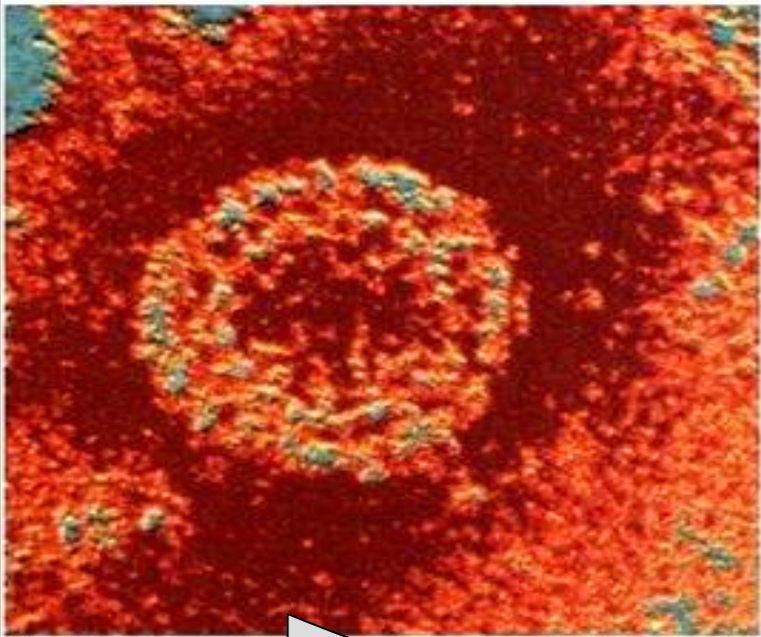
Поверхность бумаги под электронным растровым микроскопом



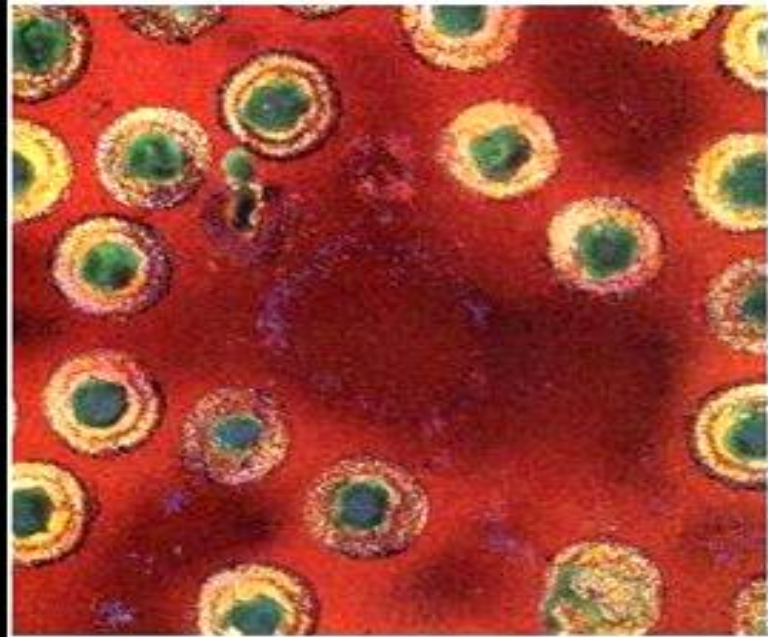
Изображение
СНЕЖИНКИ,
полученное с
помощью
электронного
растрового
микроскопа

Электронный сканирующий микроскоп

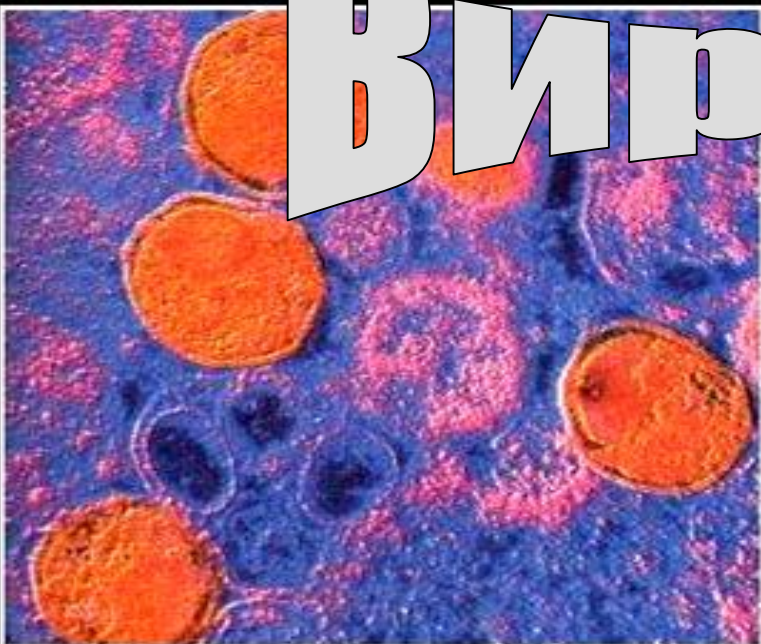




Вирус гепатита В



Вирус герпеса



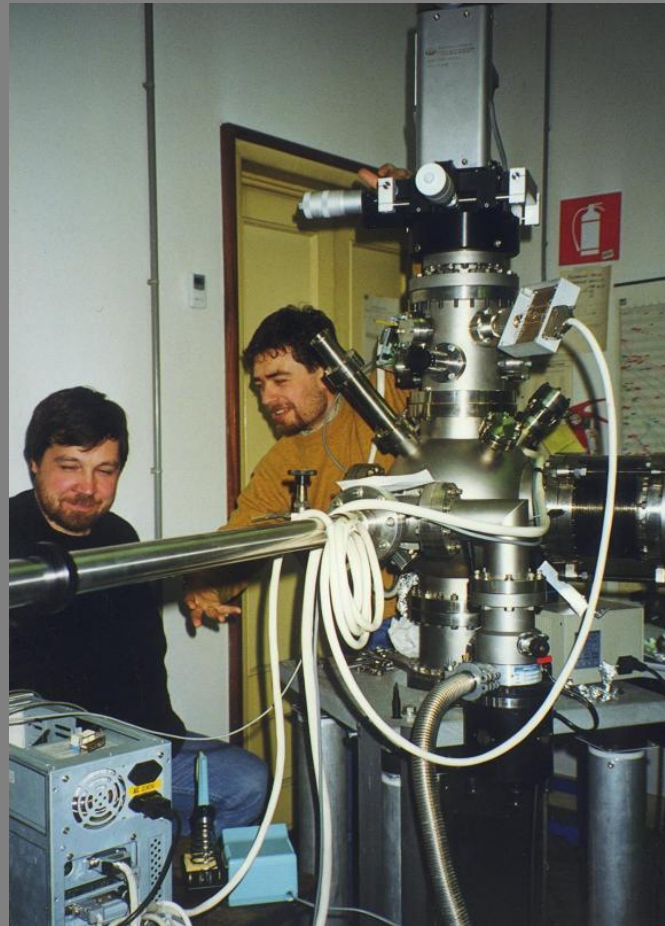
Внутриклеточные бактерии хламидии




Вирус СПИД

Вирусы

ТУННЕЛЬНЫЙ МИКРОСКОП

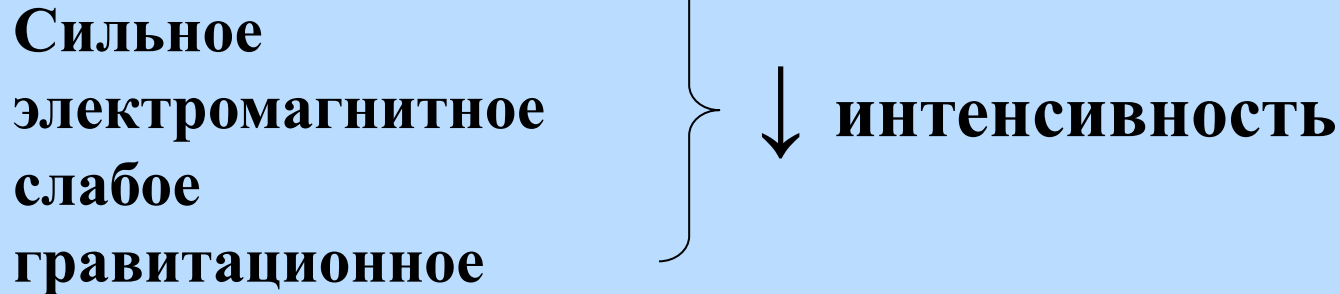




Молекулы
бензола

Туннельный микроскоп

2. Виды взаимодействий



Интенсивность взаимодействия принято характеризовать **константой взаимодействия α** - безразмерным параметром, определяющим вероятность процессов, обусловленных данным видом взаимодействия.

Отношение констант даёт **относительную интенсивность** соответствующих взаимодействий.

Сильное взаимодействие

обеспечивает связь нуклонов в ядре.

Электромагнитное взаимодействие

отвечает за строение электронных оболочек атомов, их взаимодействие.

Слабое взаимодействие

отвечает за распады элементарных частиц.

Гравитационное взаимодействие

универсально, ему подвержены все без исключения частицы, испытывая действие гравитации и являясь источником гравитации.

В процессах микромира гравитационное взаимодействие ощутимой роли не играет.

Тип взаимодействий	Механизм обмена	Интенсивность α	Радиус действия r , м	Характ. время жизни частиц τ , с
Сильное	глюонами	1	$\approx 10^{-15}$	$\approx 10^{-23}$
Электромагнитное	фотонами	10^{-2}	∞	$\approx 10^{-20}$
Слабое	промежут. бозонами	10^{-14}	$\approx 10^{-18}$	$\approx 10^{-9}$
Гравитационное	гравитонами	10^{-38}	∞	---

3. Классификация элементарных частиц

Исходя из значения спина, все элементарные частицы можно разделить на две группы:

- Частицы с полуцелым спином – **фермионы**: подчиняются принципу Паули.
 - поля фермионов всегда остаются квантованными,
 - в классическом пределе они переходят в частицы.
- Частицы с целочисленным спином – **бозоны**: не подчиняются принципу Паули.
 - поля бозонов в пределе переходят в классические поля (фотон – электромагнитным полем: свет, радиоволны).

Античастицы

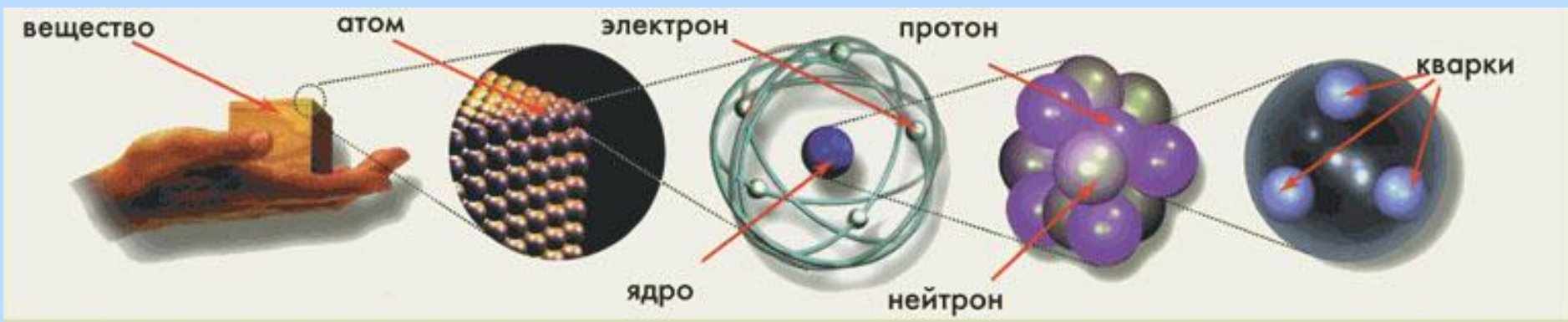
У любой элементарной частицы есть *античастица*, обладающая противоположными по знаку электрическим зарядом и собственным магнитным моментом.

Если частица совпадает с античастицей, ее называют *истинно нейтральной* (фотон и др.)

Обозначение античастицы:

\bar{p}, \tilde{p} (черта, тильда)

Частицы и античастицы способны к взаимной *аннигиляции* — исчезновению с возникновением других частиц.



лептоны ← **Фермионы:** → **кварки**

- содержат 6 частиц и 6 античастиц

- играют важную роль в структуре мира. (Особенно велико значение электрона и нейтрино.)

- не участвуют в образовании нуклонов, и в процессах, называемых сильным взаимодействием.

- содержит 6 частиц и 6 античастиц.

- каждый тип кварков имеет **аромат** (квантовое число, приписываемое частицам данного типа).

- их заряды имеют дробные значения по отношению к заряду электрона: $\pm 1/3$ или $\pm 2/3$.

- экспериментально дробный заряд не обнаружен: такие заряды образуют связанные объединения, в которых суммарный заряд равен 0, ± 1 .

- не удалось обнаружить ни один кварк в свободном состоянии.

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
<p>Электрон переносит электрический ток</p> <p>$M = 0,511 \text{ МэВ}/c^2$</p> 	<p>Электронное нейтрино играет фундаментальную роли при горении Солнца. Каждую секунду сквозь нас пролетают миллиарды этих частиц</p> 
<p>Мюон аналог электрона Время жизни - 2 микросекунды</p> <p>$M = 106 \text{ МэВ}/c^2$</p> 	<p>Мюонное нейтрино образуется при рождении и распаде мюонов</p> <p>$M < 0,2 \text{ МэВ}/c^2$</p> 
<p>Тау аналог электрона Время жизни - доли пикосекунды</p> <p>$M = 1777 \text{ МэВ}/c^2$</p> 	<p>Тау нейтрино образуется при рождении и распаде тау лептонов Открыто в 1975 г.</p> <p>$M < 20 \text{ МэВ}/c^2$</p> 







Фундаментальные фермионы

Электрический заряд

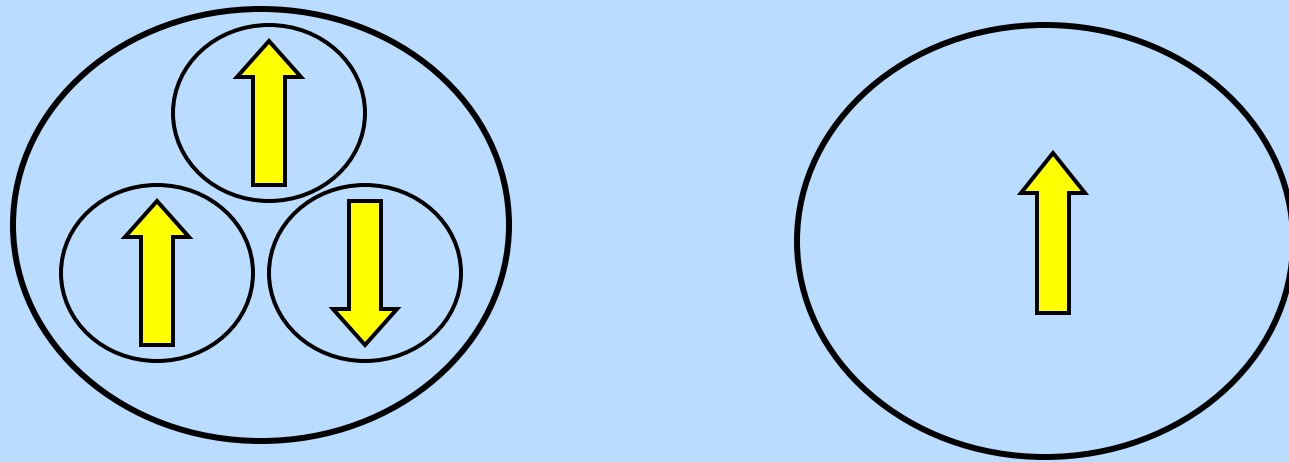
Частицы окружающего мира принадлежат этой группе

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

Теперь их можно обнаружить в космосе и на ускорителях частиц

КВАРКИ	
$+2/3$	$-1/3$
<p>u-кварк (up - вверх) входит в состав протонов и нейтронов</p> <p style="text-align: center;"></p> <p>$M = 3 \text{ МэВ}/c^2$</p>	<p>d-кварк (down - вниз) входит в состав протонов и нейтронов</p> <p style="text-align: center;"></p> <p>$M = 6 \text{ МэВ}/c^2$</p>
<p>c-кварк (charmed - очарованный) открыт в 1974 г.</p> <p style="text-align: center;"></p> <p>$M = 1300 \text{ МэВ}/c^2$</p>	<p>s-кварк (strange - странный) открыт в 1964 г.</p> <p style="text-align: center;"></p> <p>$M = 100 \text{ МэВ}/c^2$</p>
<p>t-кварк (top - верхний) открыт в 1995 г.</p> <p style="text-align: center;"></p> <p>$M = 175000 \text{ МэВ}/c^2$</p>	<p>b-кварк (beauty - прелестный bottom - нижний) открыт в 1977 г.</p> <p style="text-align: center;"></p> <p>$M = 4300 \text{ МэВ}/c^2$</p>

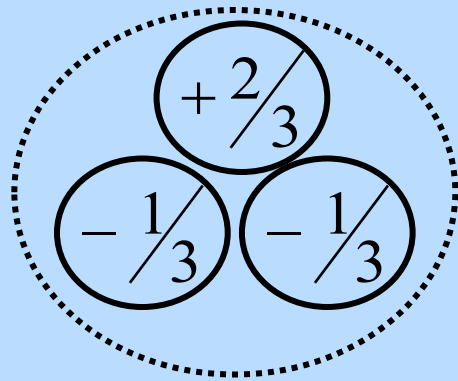
Привычное свойство - спин: векторное сложение



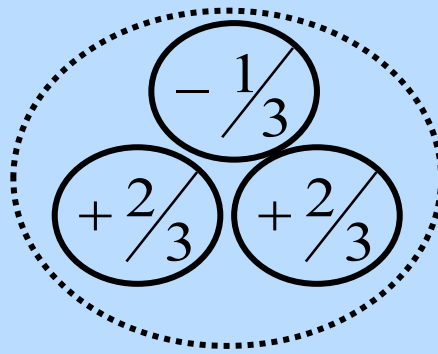
**Спин составной частицы
равен сумме спинов кварков**

Непривычное свойство - дробные заряды

**Заряд составной частицы равен
сумме зарядов кварков**



u
d d



d
u u



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

Антивещество:

3 антикварка

Принцип запрета Паули для кварков: они не могут соединяться вместе, если их состояния одинаковы (но $p - uud$, $n - udd$).

Для устранения противоречия с принципом Паули было введено понятие **цвета** кварка (еще 1 квантовое число):

каждый кварк может существовать в 3 «окрашенных» формах: желтой, синей и красной (их комбинация дает белый цвет).

Антикварки окрашены в *антицвета*, дающие в сумме с исходным цветом нулевой (белый) цвет.

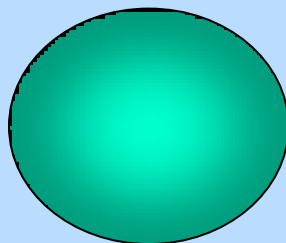
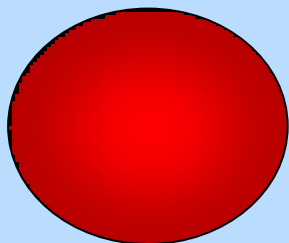
При объединении кварков и антикварков в адроны должны выполняться два условия:

- суммарный электрический заряд кварков в адроне должен быть целочисленным;
- кварки соединяющиеся в адрон, должны полностью компенсировать свои цветовые заряды и удовлетворять признаку бесцветности.

Цвета

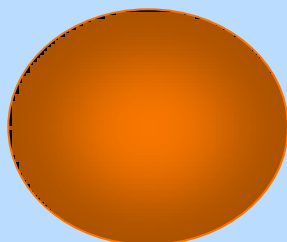
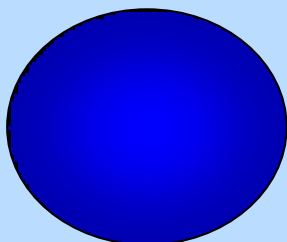
Антицвета

красный



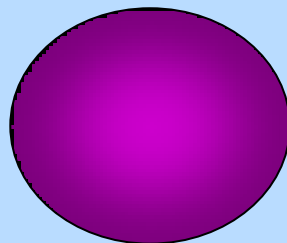
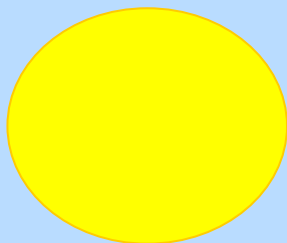
антикрасный

синий



антисиний

желтый



антижелтый



**Сложение цветов дает
бесцветный, белый свет!**

Цвет кварка определяет его участие во взаимодействии с другими кварками.

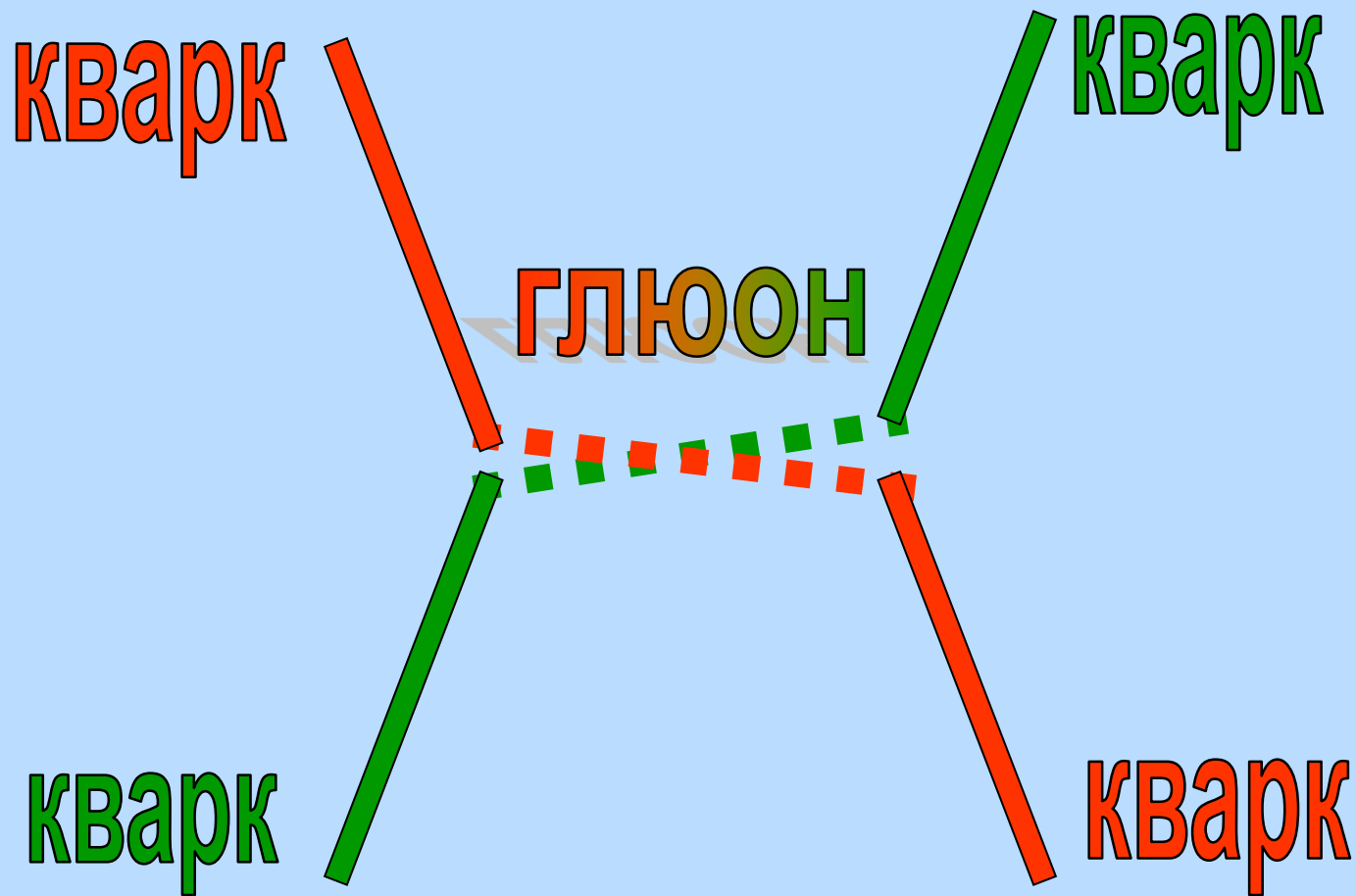
Сильное взаимодействие сводится к взаимодействию между кварками, которое осуществляется с помощью частиц, называемых *ГЛЮОНАМИ* (от англ. glue— клей):

- масса покоя равна 0;
- спин равен 1;
- каждый глюон содержит цвет и антицвет.

Обмен глюонами между кварками **меняет их цвет**, но оставляет неизменными все остальные квантовые числа, т.е. **сохраняет аромат кварка, удерживая кварки вместе.**

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

ОБМЕН ГЛЮОНАМИ

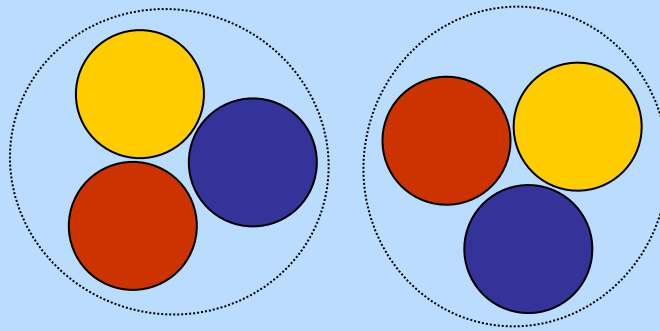


Как уже указывалось, кварки не могут существовать в свободном состоянии – **конфайнмент** (от англ. «тюремное заключение»).

Причина – особенность сил взаимодействия между кварками:

- На малых расстояниях силы взаимодействия малы, кварки практически свободны – **асимптотическая свобода**;
- С увеличением расстояния силы взаимодействия очень быстро растут, не позволяя кваркам вылететь из адрона.

Бесцветные нуклоны притягиваются друг к другу ядерными силами



Ядерные силы, действующие между нуклонами, малы по сравнению с цветовыми

**Энергии
связей**

1 эВ

**внутри
молекул**

10^4 эВ

внутри атома

10^8 эВ

внутри ядер

10^{23} эВ

межкварковые

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



Взаимодействуют

все заряженные частицы

Объекты

атомы, молекулы

Процессы

электричество, магнетизм,
распространение света, радиоволны

Кванты
фундаментальных
полей

Промежуточные
векторные бозоны
слабое
взаимодействие



Взаимодействуют

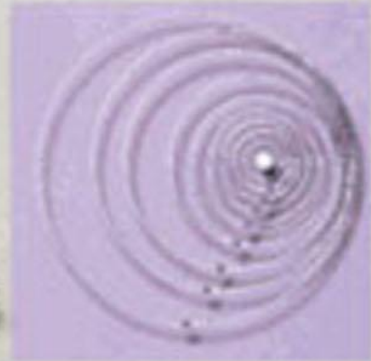
кварки, лептоны
промежуточные бозоны

Объекты

Процессы

бета-распад ядер, распад нейтронов
и мюонов

Гравитоны
гравитация



Взаимодействуют

все частицы

Объекты

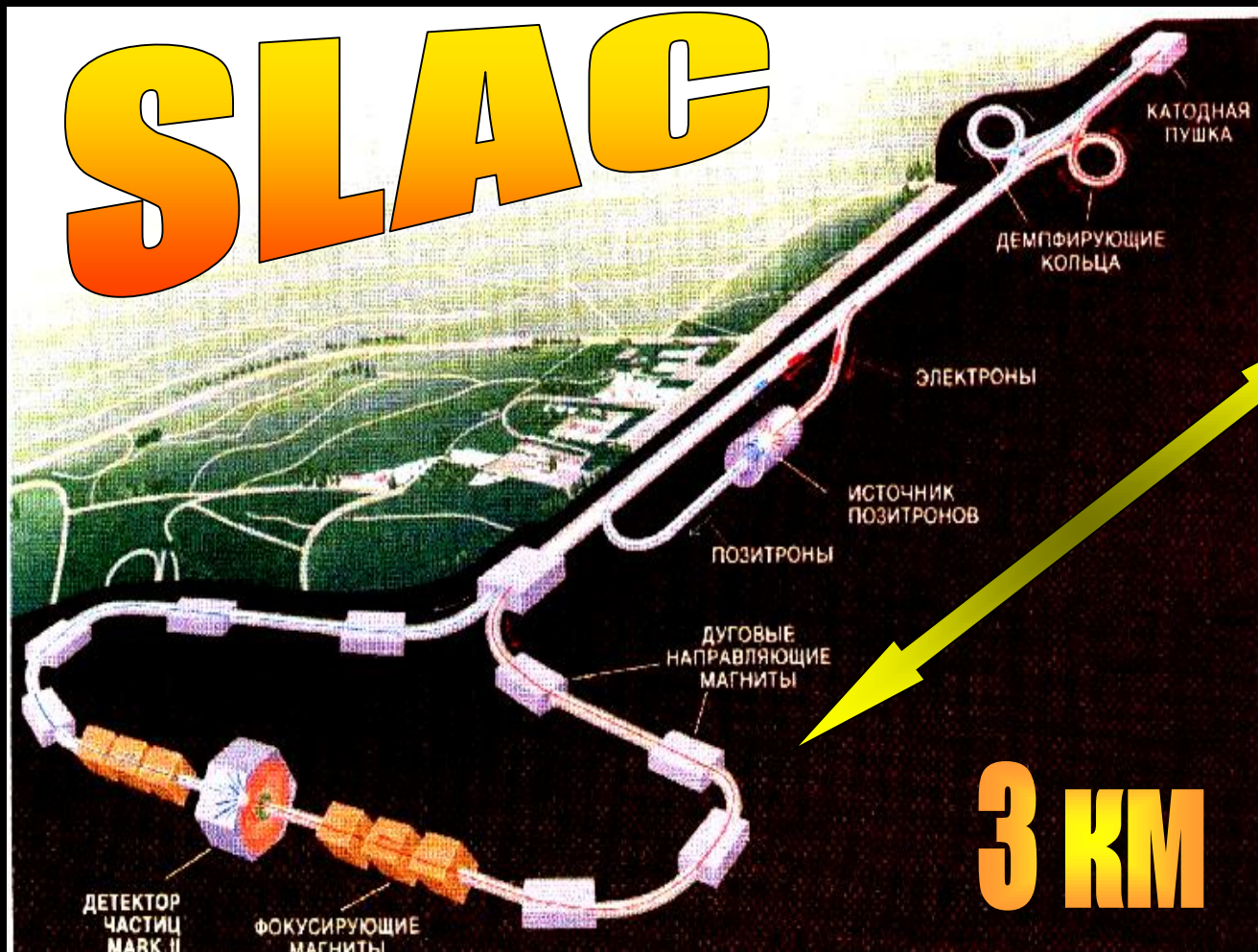
Солнечная Система,
галактики, черные дыры

Процессы

притяжение тел

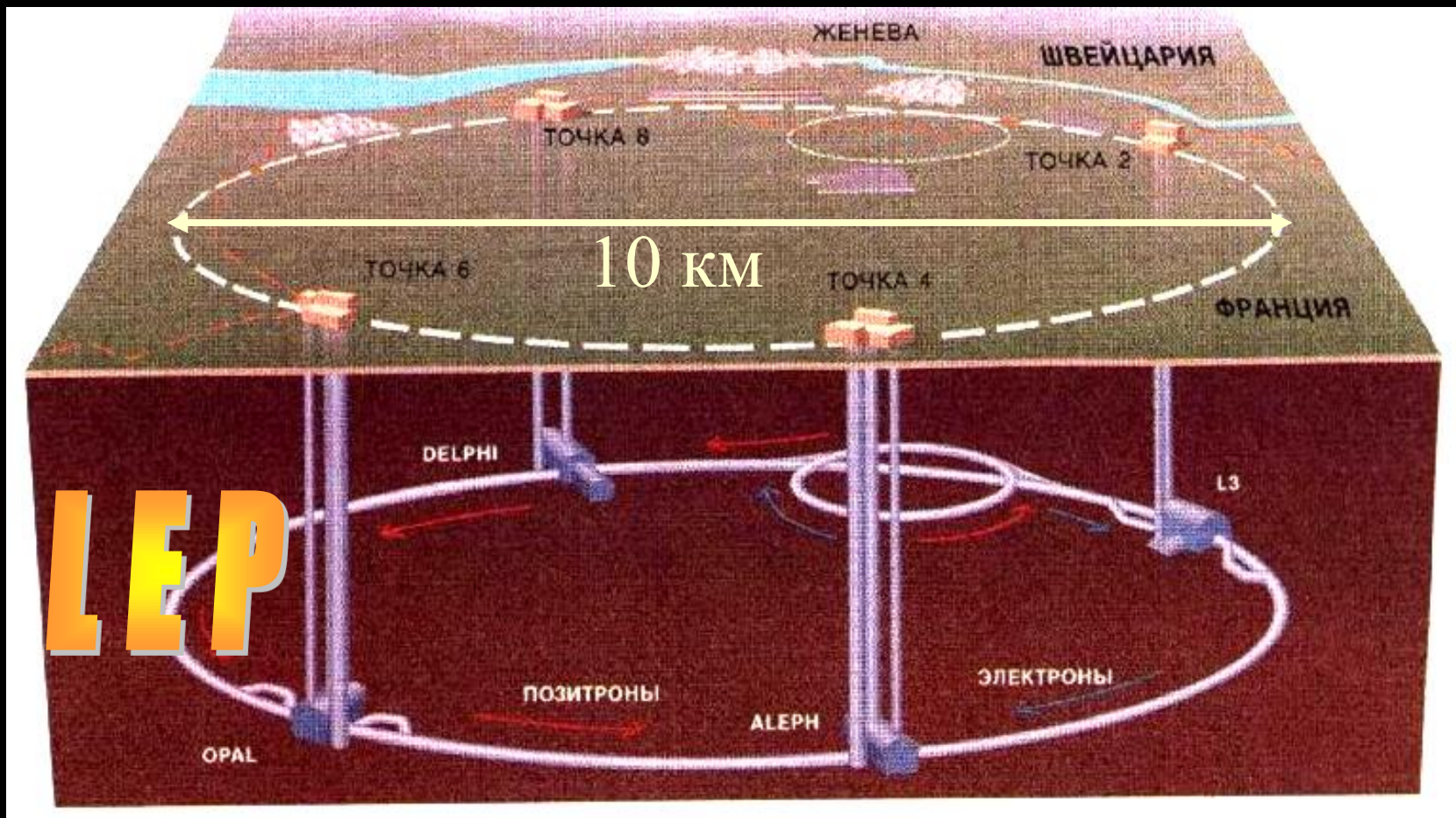
Ускорители элементарных частиц

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



Стенфордский центр линейного ускорителя (англ. *Stanford Linear Accelerator Center, SLAC*) — нац. лаборатория при Министерстве энергетики 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 - кольцевой туннель длиной 27 км.

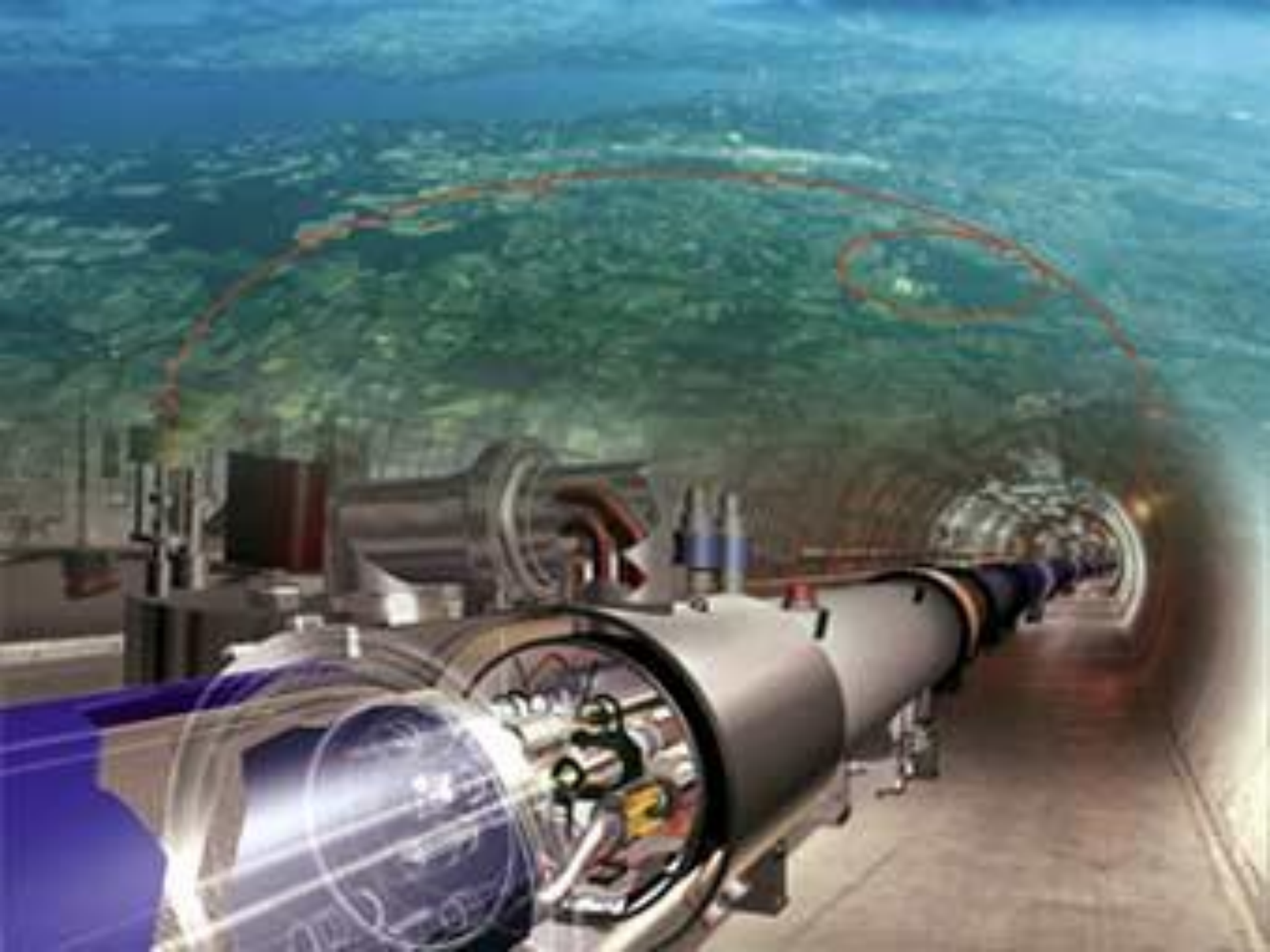
Получены энергии до **210 ГэВ**: была учтена зависимость энергии от положения Луны по отношению к Земле, от уровня воды в Женевском озере, от прибытия поездов на железнодорожный вокзал Женевы и т.д. (влияние на форму кольца ускорителя, ухудшающие фокусировку пучков. **Время эксплуатации – 11 лет.**

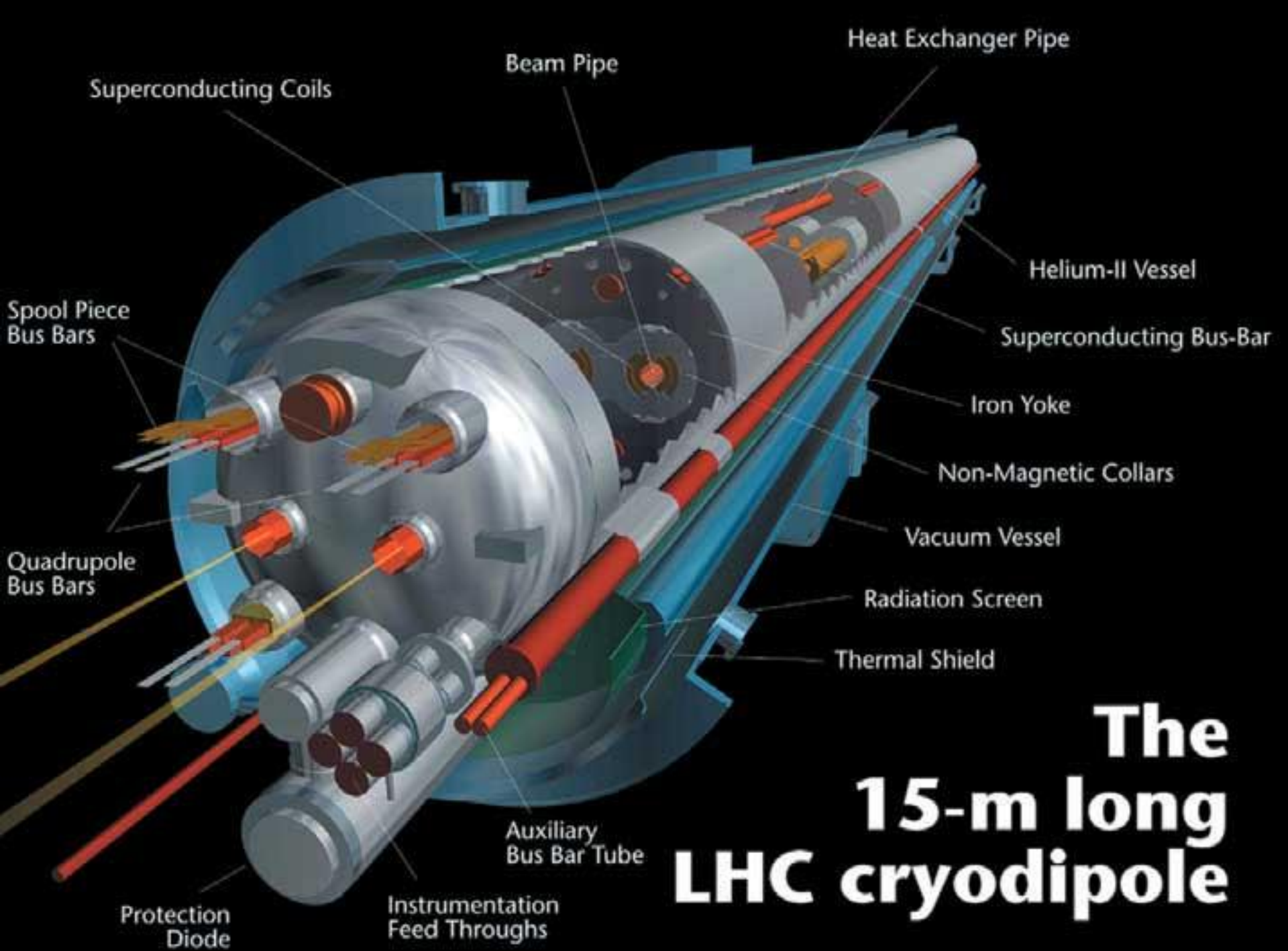


В 90-х гг. LEP был демонтирован и в 2000 г. в старом туннеле начато строительство **LHC** – **Large Hadron Collider** – **Большого адронного коллайдера** - нового кольца труб, в котором одновременно разгоняются два пучка протонов. За 1 с происходит более одного миллиарда соударений. В основу работы положен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

Температура установки -271°C . Полученные энергии – **тераэВ** (10^{12}).

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





The 15-m long LHC cryodipole