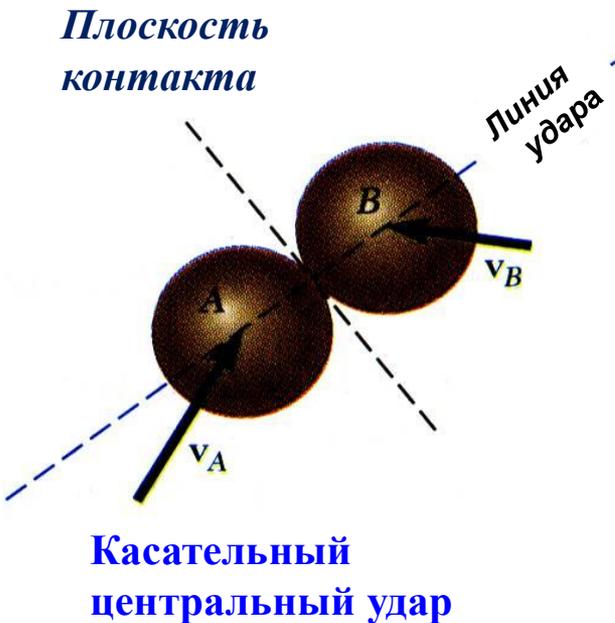
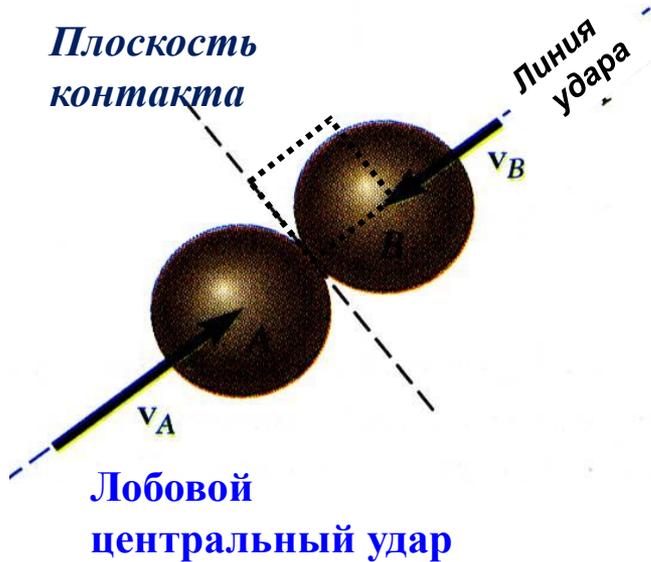


**ЛЕКЦИЯ 7.
Столкновения.
Распады.**

А.И. Валишев, В.Г. Сербо .

14. Столкновения.



- **Удар.**
Столкновение двух тел. В течение короткого времени тела взаимодействуют с очень большой силой.
- **Линия удара:**
Общая нормаль к контактирующим во время удара поверхностям.
- **Центральный удар:**
Удар, при котором центры масс тел лежат на линии удара.
- **Лобовой удар:**
Удар, при котором скорости обоих тел направлены вдоль линии удара.
- **Касательный удар:**
Удар, при котором одно или оба тела движутся вдоль направления, не совпадающего с линией удара.

14.1. Классификация соударений.

Рассматривается лобовое, центральное соударение тела A и тела B .

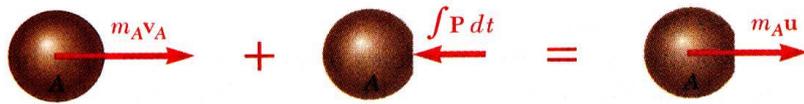
Записывается сохранение импульса в столкновении для первого тела (A):

1. К моменту окончания процесса деформации тела (A).

Начальный импульс тела (A) минус изменение импульса к моменту max деформации равен конечному импульсу (A).

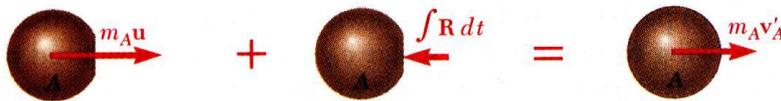
2. К моменту окончания процесса восстановления тела (A).

Импульс к моменту max деформации минус изменения импульса при восстановлении равен конечному импульсу (A).



$$m_A V_A - \int P dt = m_A U$$

В момент max деформации:



$$m_A U - \int R dt = m_A V'_A$$

Во время восстановления:

e - коэффициент восстановления A -

e - отношение импульса сил «восстановления» к импульсу сил «деформации»

$$e = \frac{\int R dt}{\int P dt} = \frac{U - V'_A}{V_A - U}, \quad 0 \leq e \leq 1$$

Аналогично. Коэффициент восстановления тела B .

По III-му закону Ньютона импульсы взаимных сил равны $\int F_{AB} dt = - \int F_{BA} dt$

$$e = \frac{U - V'_B}{V_B - U}$$

Объединение соотношений при $U(A) = U(B)$, при равенстве скоростей контактирующих тел в момент максимальной деформации:

$$\begin{aligned} e \cdot (V_A - U) &= U - V'_A \\ e \cdot (V_B - U) &= U - V'_B, \quad \Rightarrow \\ \Rightarrow & \boxed{V'_B - V'_A = e(V_A - V_B)} \end{aligned}$$

Классификация соударений.

- Абсолютно неупругое соударение $e = 0$.** *Упражнение. Что сохраняется ?*

$$\begin{aligned} e = 0, \quad \Rightarrow \quad V'_B = V'_A = U \\ m_A V_A + m_B V_B = (m_A + m_B) \cdot U \end{aligned}$$

- Абсолютно упругое соударение $e = 1$.** *Упражнение. Что сохраняется ?*

$$e = 1, \quad \Rightarrow \quad V'_B - V'_A = V_A - V_B$$

14.2. Законы сохранения в соударениях.

14.2.1. Преобразование кинетической энергии, импульса при переходе из одной инерциальной системы отсчета S' в другую S .

Кинетическая энергия системы частиц в системе S :

$$K = \sum_i (m_i v_i^2/2).$$

Применим преобразование Галилея: $v_i = v_i' + V$:

$$\begin{aligned} K &= \sum_i (m_i v_i^2/2) = \sum_i (m_i (v_i' + V)^2/2) = \\ &= K' + (1/2) \cdot MV^2 + (P'V). \end{aligned}$$

Здесь $K' = \sum_i (m_i v_i'^2/2)$, $P' = \sum_i m_i v_i'$, $M = \sum_i m_i$.

Пусть S' является системой центра масс. S' движется относительно S со скоростью $V_{цм}$, тогда полный импульс частиц в системе цм:

$$P' = 0.$$

В этом случае:

$$K = K_{цм}' + (1/2) \cdot MV_{цм}^2.$$

Тело, состоящее из множества частиц, взаимодействующих друг с другом, имеет наименьшую кинетическую энергию, и, следовательно, наименьшую полную энергию в системе центра масс.

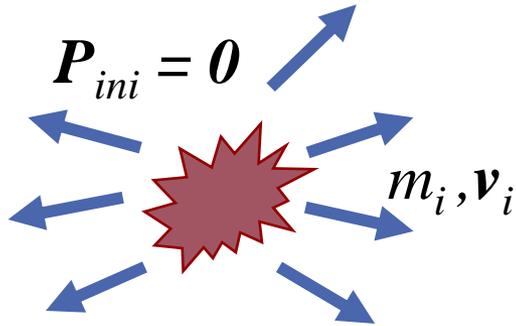
Df. Полная энергия тела в системе центра масс называется внутренней энергией тела.

Nb. Потенциальная энергия тела, зависящая от разностей радиус векторов взаимодействующих частиц, не меняется при переходе из S' в S .

14.3. Законы сохранения при распаде тел.

Рассматривается распад покоящегося тела массы M на некоторое множество тел – продуктов распада с массами m_i .

Начальный импульс тела $P_{ini} = 0$. (index: ini – initial, f – final)



Сохранение энергии, импульса:

$$E_{\text{внутр.}} = \sum_j (E_{j, \text{внутр.}} + (1/2) \cdot m_j v_j^2);$$

$$P_{ini} = 0 = \sum_j m_j v_j;$$

Распад возможен при условии:

$$E_{\text{внутр.}} > \sum_j E_{j, \text{внутр.}}$$

Df. Упругим называется столкновение при котором внутреннее состояние частиц не меняется.

При упругом столкновении внутренняя энергия системы не меняется. Следовательно сохраняется кинетическая энергия системы.

14.4. Упругое столкновение двух частиц.

Рассматривается столкновение в системе центра масс (цм). Полный импульс в системе цм нулевой: $P_{\Sigma \text{цм}} = 0 = \sum_j p_{j, \text{цм}}$.

Сохранение импульса:

$$P_{1, \text{цм}} + P_{2, \text{цм}} = P'_{1, \text{цм}} + P'_{2, \text{цм}};$$

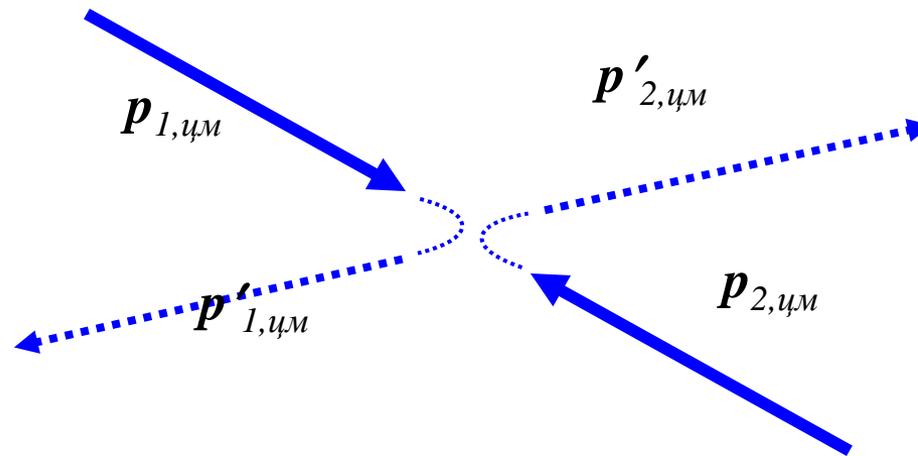
Сохранение кинетической энергии в упругом столкновении:

$$p_{1,цм}^2/(2m_1) + p_{2,цм}^2/(2m_2) = (p'_{1,цм})^2/(2m_1) + (p'_{2,цм})^2/(2m_2);$$

Из законов сохранения импульса и энергии следует:

$$p_{1,цм} = -p_{2,цм}; \quad p'_{1,цм} = -p'_{2,цм};$$
$$|p_{1,цм}| = |p_{2,цм}| = |p'_{1,цм}| = |p'_{2,цм}|.$$

Соударение в системе центра масс (цм) сводится к повороту равных векторов импульса.



Рассмотрение столкновения в лабораторной системе (ЛС).

Для простоты, считаем, что частица 2 в ЛС первоначально покоится:

$$p_2 = 0 .$$

Полный импульс в ЛС сохраняется. После столкновения импульсы частиц в ЛС $p'_1 + p'_2$:

$$p_1 = p'_1 + p'_2 ;$$

Определим скорость центра масс в лабораторной системе.

По определению скорость центра масс есть полный импульс деленный на полную массу :

$$V_{ц} = p_1 / (m_1 + m_2) .$$

Из соотношения импульсов для 1-й частицы в системе цм и ЛС находим:

$$p_{1цм} = p_1 - m_1 V_{ц} ,$$

Отсюда

$$\Rightarrow p_1 = p_{1цм} + m_1 V_{ц} ;$$

Таким образом, для первой и второй частиц после столкновения :

$$p'_1 = p'_{1цм} + m_1 V_{ц} ;$$

$$p'_2 = p'_{2цм} + m_2 V_{ц} .$$

Упражнение.

Определить импульсы и скорости частиц в результате столкновения при

a) одинаковых массах $m_1 = m_2$; b) $m_1 \ll m_2$; c) $m_1 \gg m_2$.

14.5. Абсолютно неупругое столкновение.

В абсолютно неупругом столкновении происходит образование составной частицы массы

$$m = m_1 + m_2 .$$

Закон сохранения импульса двух частиц в ЛС, p' импульс после столкновения:

$$p_1 + p_2 = p' .$$

Кинетическая энергия системы не! сохраняется:

$$K = p_{1,цм}^2 / (2m_1) + p_{2,цм}^2 / (2m_2) \neq K' ,$$

K' - кинетическая энергия составной частицы:

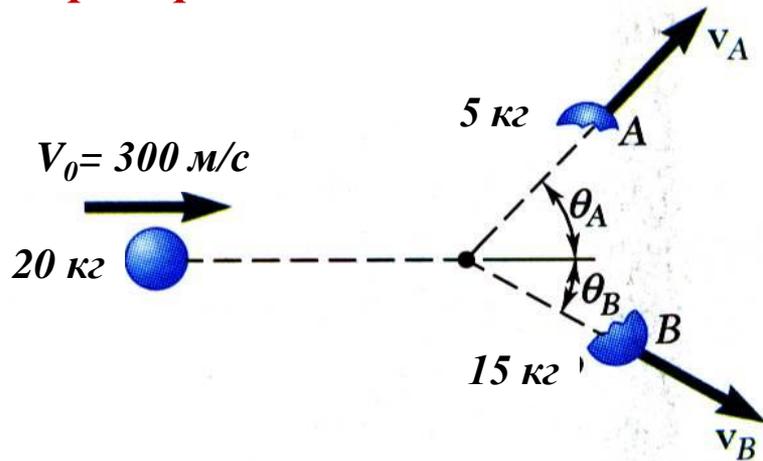
$$K' = (p')^2 / (2(m_1 + m_2)) .$$

Наибольшее изменение кинетической энергии в результате столкновения: $\Delta K = K - K'$

в случае, если $K' = 0$.

В этом случае столкновение происходит в системе неподвижного центра масс.

Пример. Распад тела на два осколка.



При взрыве снаряда массой $m=20$ кг двигавшегося со скоростью $v_0 = 300$ м/с образовалось два осколка массами $m_A = 5$ кг и $m_B = 15$ кг. После взрыва осколки разлетелись под углами $\theta_A = 45^\circ$ и $\theta_B = 30^\circ$ соответственно.

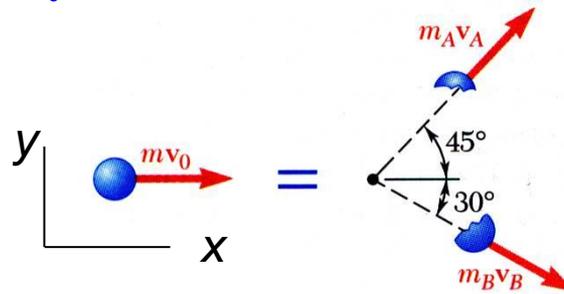
Найти скорость каждого осколка.

Вопрос. Сохраняется ли кинетическая энергия системы?

Да (Нет)

Решение:

Поскольку внешних сил нет, импульс системы сохраняется.



Закон сохранения импульса:

$$m \cdot \vec{v}_0 = m_A \vec{v}_A + m_B \vec{v}_B$$

Импульс вдоль оси x :

$$\begin{aligned} p_{x,ini} &= (m = 20) \cdot (v_0 = 300) = \\ &= (m_A = 5) \cdot v_A \cos 45^\circ + (m_B = 15) \cdot v_B \cos 30^\circ \end{aligned}$$

Импульс вдоль оси y :

$$\begin{aligned} p_{y,ini} &= 0 = \\ &= (m_A = 5) \cdot v_A \sin 45^\circ - (m_B = 15) \cdot v_B \sin 30^\circ \end{aligned}$$

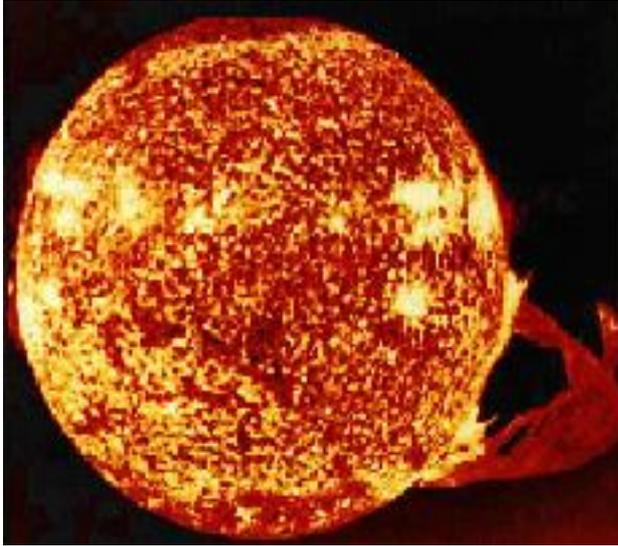
Решение этой системы уравнений:

$$v_A \approx 620 \text{ м/с}, \quad v_B \approx 290 \text{ м/с}$$

15. Фундаментальные взаимодействия.

Слабое

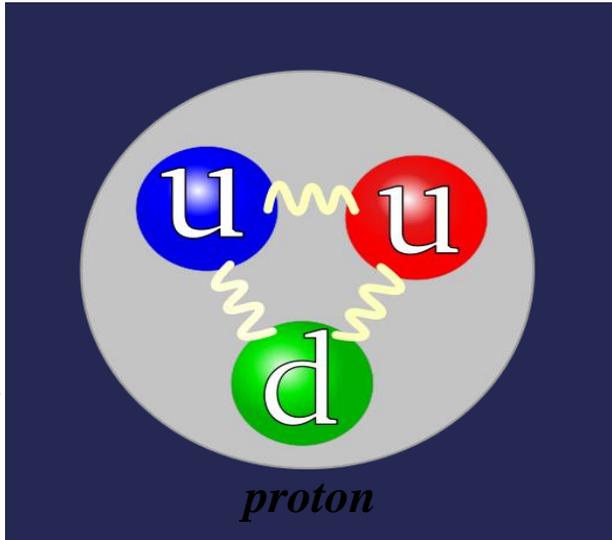
- β -распад



«Слабый»
заряд

Сильное

- ядро
- удержание кварков



«Сильный»
заряд



Электро- магнитное

- Телевидение
- Компьютеры
- Свет
- Химия

Электри-
ческий
заряд



Гравитаци- онное

- Планеты
- Звезды
- Галактики

Масса

15.1. Электромагнитное взаимодействие.

Заряд. Положительный, отрицательный.

Все заряды кратны элементарному заряд.

Элементарный -заряд электрона, протона:

$$q_e = - q_p = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} .$$

15.1.1 Закон Кулона (1784).

Электростатическая сила

$$\mathbf{F}_{12} = k (q_1 \cdot q_2 / r_{12}^2) \mathbf{e}_{12} .$$

Закон Кулона с огромной точностью выполняется для стационарных, неподвижных зарядов $v \ll c$.

$$k = \text{const} \approx 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2 .$$

15.1.2. Потенциальная энергия в Кулоновском поле:

$$U_{12} = k q_1 \cdot q_2 / |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2| .$$

Выполняется закон сохранения заряда:

$$Q_{\Sigma} = \sum_i q_i = \text{const} .$$

Электрон – стабильная частица, время жизни $\tau_e \sim 6,6 \cdot 10^{28}$ лет.

Подтверждена применимость закона Кулона на расстояниях от малых

$$\hbar/mc \sim 10^{-13} \text{ см}$$

до больших – галактических.

На малых расстояниях требуется учитывать квантовые поправки по порядку величины $\sim e^2/(\hbar c) \sim 1/137$.

В релятивистском пределе $v \sim c$ необходим учет запаздывания а также излучения ускоренно движущихся зарядов наряду с квантовыми эффектами.

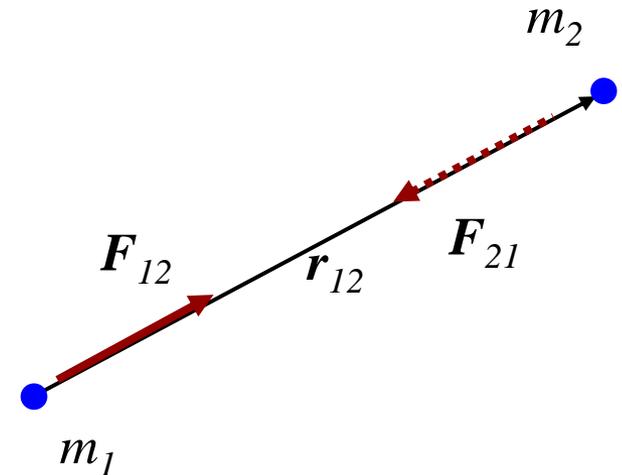
Разработана квантовая электродинамика, которая рассматривает электромагнитное поле как набор квантов поля фотонов, электрон и позитрон как кванты поля заряженных частиц.

Электромагнитное взаимодействие заряженных частиц происходит вследствие обмена квантами фотонов.

15.2. Гравитационное взаимодействие.

15.2.1. Закон всемирного тяготения.

$$\mathbf{F}_{12} = -G \cdot (m_1 \cdot m_2 / r_{12}^2) \mathbf{e}_{12}.$$



15.2.2 Потенциальная энергия в гравитационном поле.

Гравитационное – центральное поле.

$$U_{12}(r) = -G m_1 \cdot m_2 / |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2| ,$$
$$r = |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|.$$

Гравитационные силы \equiv силы притяжения.

Справедлив принцип суперпозиции гравитационных сил.

15.2.3 Опыт Кавендиша (1798).

Опытное измерение константы G .

$$G \cong 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2.$$



Крутильные весы. Реконструкция.

Опыт Кавендиша

$$G = \frac{Fr^2}{Mm} = 6,65 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$$

гравитационное взаимодействие

крутильные весы

H – тонкая нить
 L – двухметровый стержень
 m – свинцовые шары (диаметром 5 см и массой 775 г)
 M – свинцовые шары (диаметром 20 см и массой 49,5 кг)

15.2.3. Измерение средней плотности Земли.

$$m_{\text{З}} = gR_{\text{З}}^2/G, \quad m_{\text{З}} \approx 6 \cdot 10^{24} \text{ кг.}$$

Аналогично масса Солнца:

$$m_{\odot} = a \cdot R_{\odot}^2/G,$$

Здесь a – ускорение орбитального (вокруг Солнца) движения Земли:

$$a = \omega^2 R_{\odot} = (2\pi/T)^2 R_{\odot}, \quad R_{\odot} - \text{радиус орбиты Земли, } R_{\odot} \approx 1,5 \cdot 10^{11} \text{ м.}$$

15.2.4. Первая космическая скорость v_I .

Df. Первая космическая - скорость движения космического объекта на «низкой», околоземной орбите.

$$G \cdot \frac{m m_{\text{З}}}{R_{\text{З}}^2} = m \cdot \frac{v_I^2}{R_{\text{З}}}, \quad mg = G \frac{m m_{\text{З}}}{R_{\text{З}}^2}, \quad v_I = \sqrt{gR_{\text{З}}} \cong 7,9 \text{ км/с.}$$

15.2.5. Вторая космическая скорость v_{II} .

Df. Вторая космическая скорость определяется из условия равенства нулю полной энергии тела, запущенного с поверхности тяготеющего тела. Полная энергия космического объекта на поверхности массивного тела:

$$E_{\Sigma} = K + U(R) = m \frac{v_{II}^2}{2} - Gm \frac{M}{R} = 0,$$

С удалением и остановкой космического объекта на бесконечности:

$K \rightarrow 0, U \rightarrow 0$, тогда $E_{\Sigma} \rightarrow 0$. Отсюда:

$$v_{II} = \sqrt{2gR_{\text{З}}} \cong 11,2 \text{ км/с.}$$

15.2.4 Расширяющаяся Вселенная, «Большой Взрыв».

Теория и экспериментальные наблюдения:

А. Эйнштейн, 1915.

Общая теория относительности

А.Фридман, 1921.

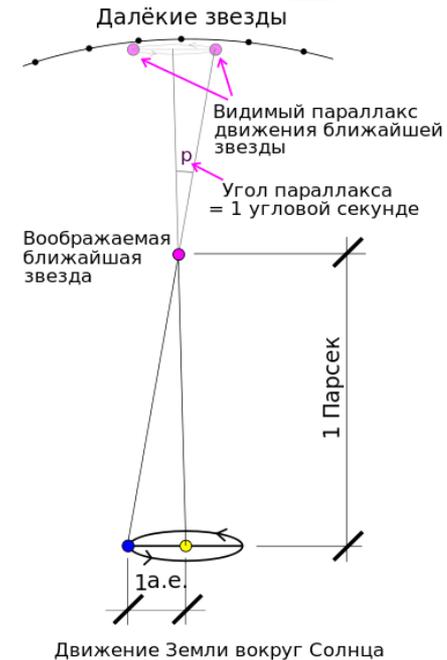
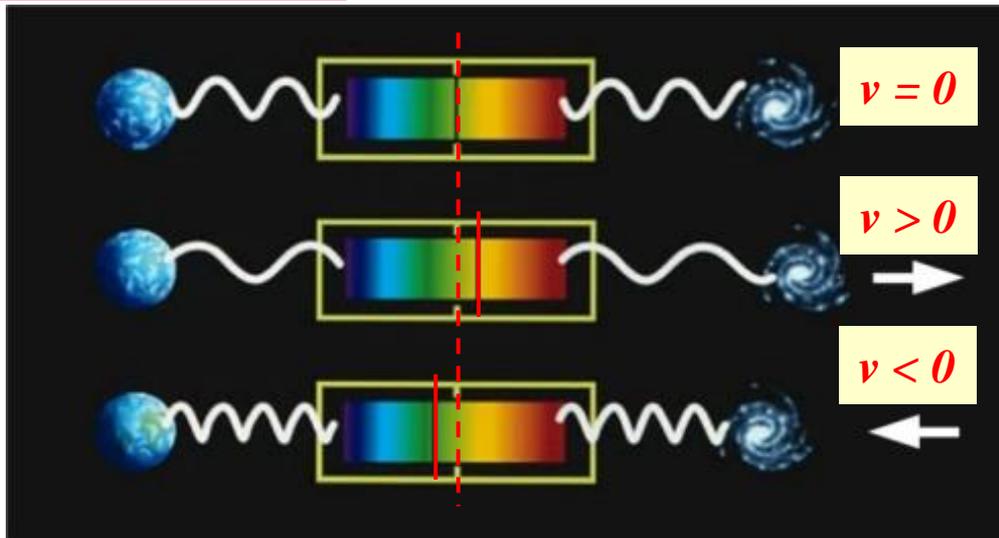
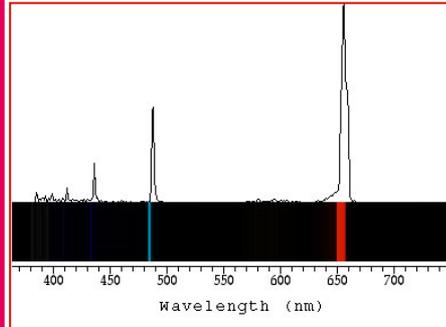
Решение УЭ Фридмана

Э. Хаббл, 1929.

Красное смещение



Спектр водорода



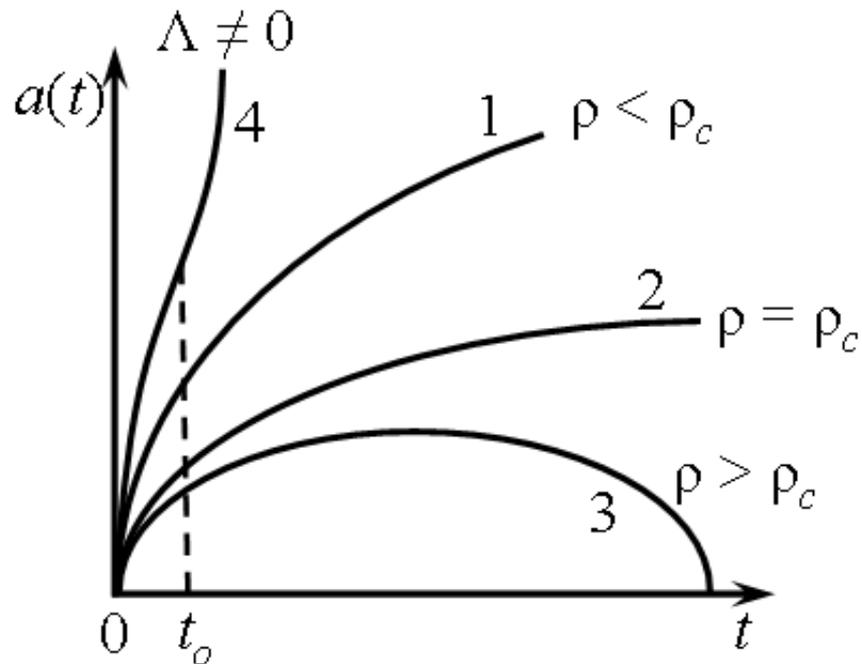
15.2.4 Расширяющаяся Вселенная, «Большой Взрыв»

А. Эйнштейн, 1915

Общая теория относительности

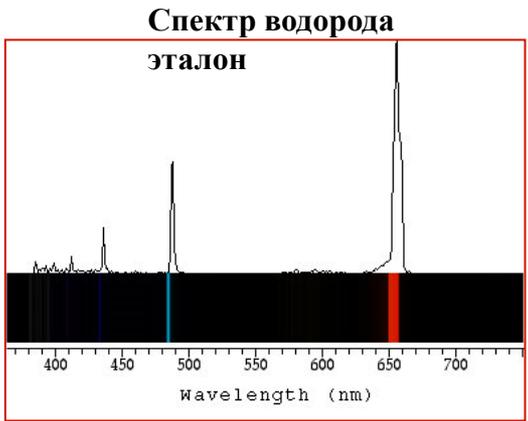
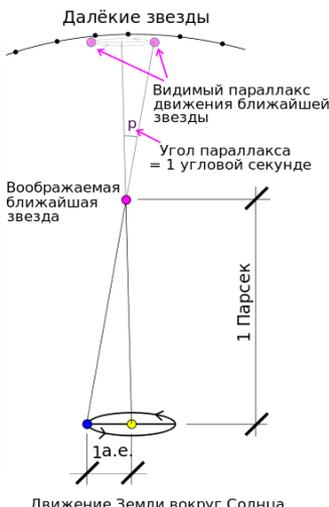
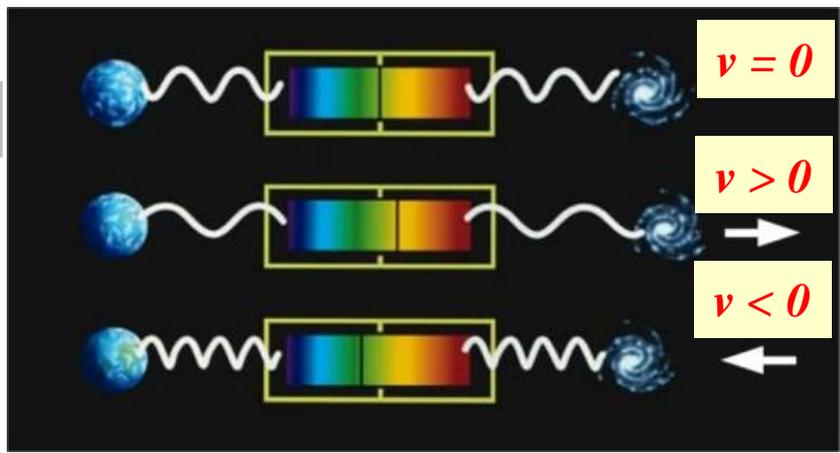
А. Фридман, 1921

Решение Фридмана



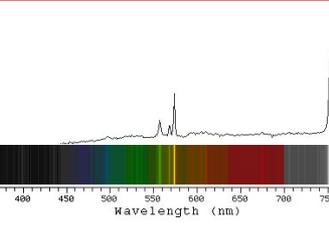
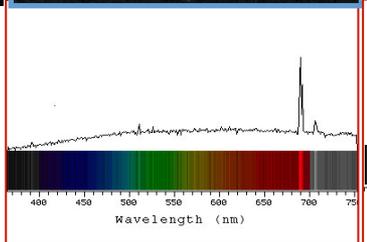
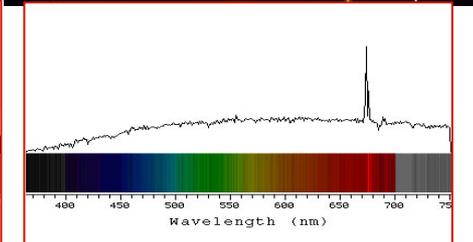
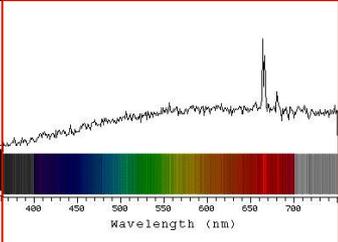
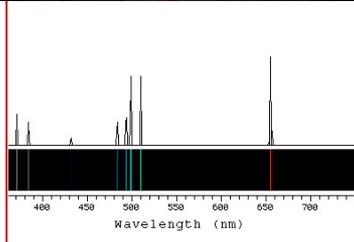
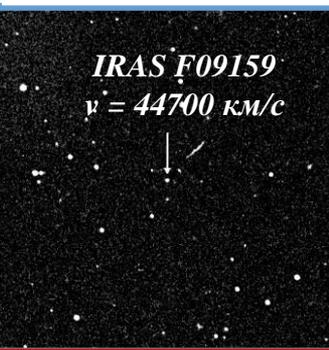
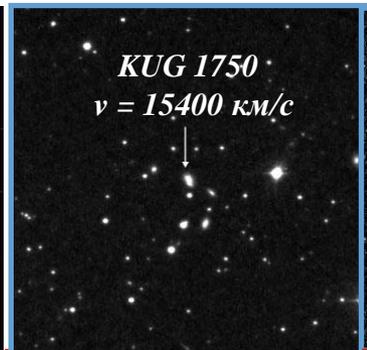
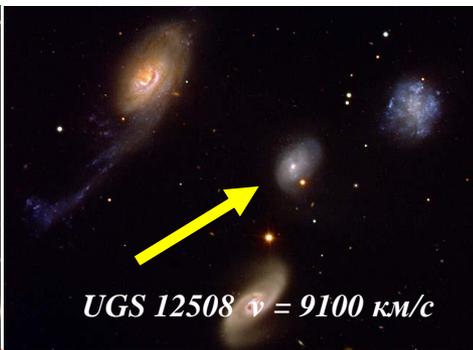
15.2.4. Расширяющаяся Вселенная, «Большой Взрыв»

Э. Хаббл, 1929
Красное смещение

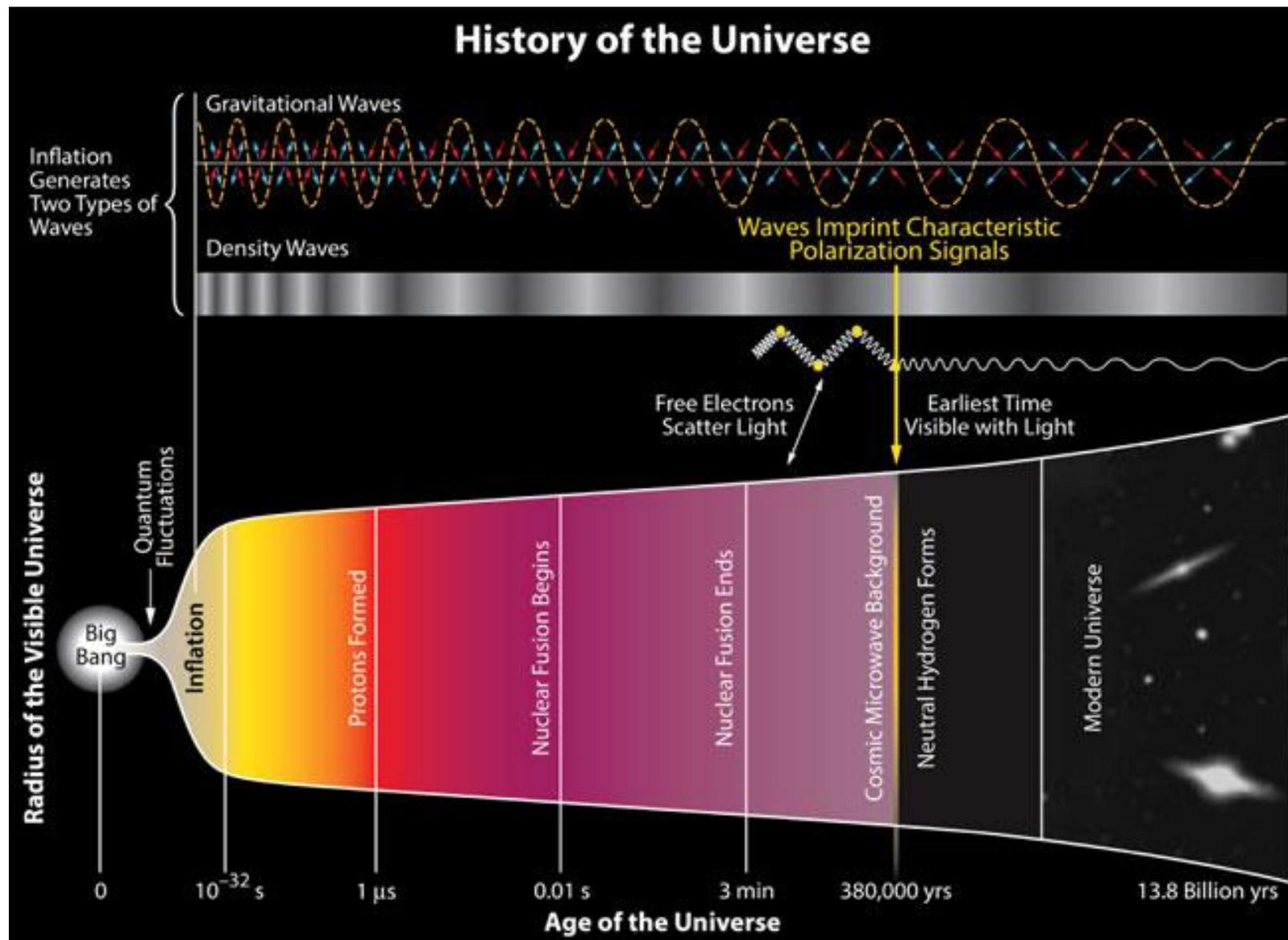


$$V = H_0 \cdot D$$

$H_0 = 73.8 \pm 2.4$ км/с/Мпк
 D – расстояние до объекта
 1 Мпк = $3.08 \cdot 10^{19}$ км =
 $3.26 \cdot 10^6$ св. лет



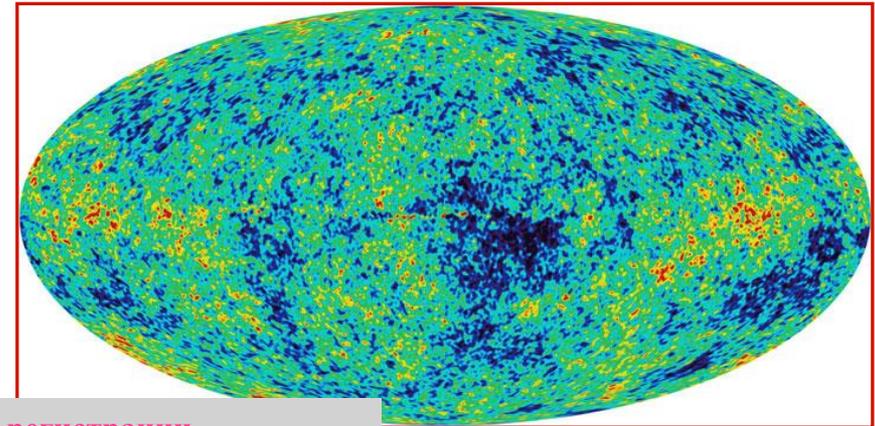
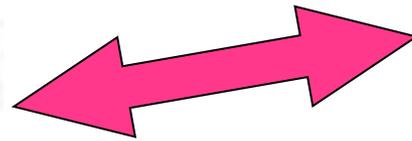
15.2.4. Расширяющаяся Вселенная, «Большой Взрыв»



15.2.4. Проверка модели Большого Взрыва.

Предсказания: мы должны видеть остатки взрыва;

Наблюдения: Реликтовое излучение.
(Пензиас и Вильсон, 1965, NPW 1978)



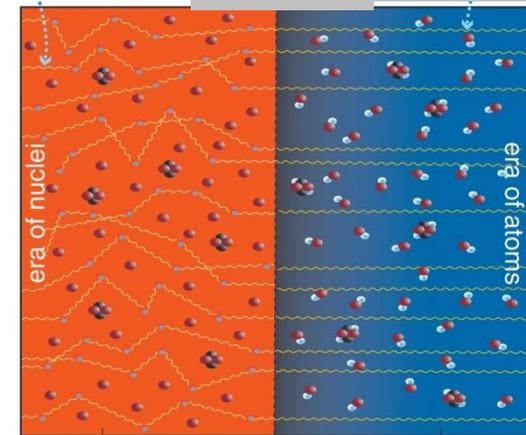
Эта антенна предназначалась для регистрации радиоволн, отраженных от сферических спутников – попытка создания дальней радиосвязи...

В раннее время, пока температура достаточно велика, фотоны находятся «в плену» у свободных электронов и протонов...

... после того, как образовались нейтральные связанные атомы, фотоны свободно движутся через пространство

время →
380 000 лет

Фотоны, возникшие при Большом Взрыве, «отделились от вещества» и начали свободно перемещаться в пространстве после того, как при температуре около $3000\text{ }^{\circ}\text{K}$ сформировались нейтральные атомы водорода и гелия. Это произошло через 300 – 400 тысяч лет после возникновения Вселенной.



6000 K 3000 K 1500 K

← температура

15.3. Сильное и слабое взаимодействие.

15.3.1. Характеристики взаимодействия.

Потенциал взаимодействия потенциал Юкавы (качественно):

$$U(r) = (Q^2/r) \cdot e^{-r/R} ;$$

R – эффективный радиус действия сил,

$R \rightarrow \infty$ дальнедействующие силы, поля.

$\alpha_{Interaction} = Q^2/(\hbar c)$ – безразмерная константа, характеристика интенсивности взаимодействия.

	Электро- магнитное	Гравитационное	Сильное	Слабое
	$\alpha_{el} =$ $= ke^2/(\hbar c)$	$\alpha_{grav} =$ $= G(m_p)^2 /(\hbar c)$	$\alpha_{Strong} \approx$ $\approx 10^2 \alpha_{el}$	
α	$\alpha_{el} =$ $= 1/137$	$\alpha_{grav} \approx 10^{-38}$	$\alpha_{Strong} \approx 1$	$\alpha_{weak} \approx 10^{-6}$
R	$R_{el} = \infty$	$R_{grav} = \infty$	$R_{Strong} \approx 10^{-15} M$	$R_{weak} \approx 10^{-18}$ CM

15.3.2. Сильное взаимодействие.

Приводит к образованию ядер из протонов и нейтронов.

Сильно взаимодействующие частицы – адроны.

Адроны являются связанными состояниями из нескольких кварков.

Известно 6 кварков, которые имеют определенные квантовые числа, например спин, барионное число и др.

Заряды кварков дробные.

Переносчиками сильного взаимодействия являются глюоны (glue – клей).

15.3.3. Слабое взаимодействие (СВ).

СВ - короткодействующее фундаментальное взаимодействие между элементарными частицами, ответственное за бета-распад атомных ядер и медленные распады частиц.

Пример. Бета распад нейтрона: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$.

СВ значительно слабее сильного и электромагнитного, но гораздо сильнее гравитационного.

Кварки - участвуют в сильном, слабом и электромагнитном взаимодействиях.

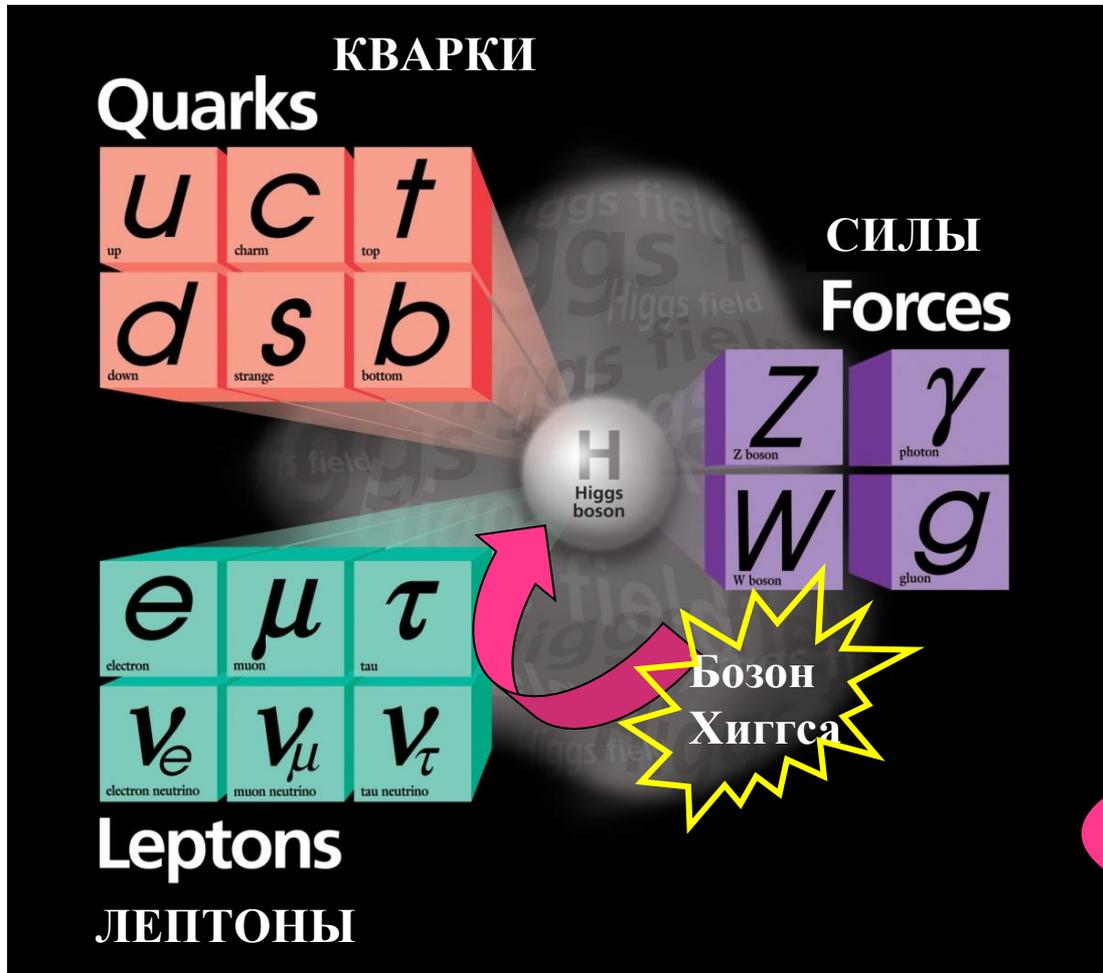
Электроны, мюоны, тау – лептоны участвуют в электромагнитном и слабом взаимодействиях.

Единственные частицы, которые участвуют только в слабом взаимодействии это три типа нейтрино ν_e, ν_μ, ν_τ и антинейтрино.

В процессе СВ частицы обмениваются переносчиками СВ - промежуточными (фундаментальными) бозонами: заряженным W^\pm и нейтральным Z . Бозоны W^\pm, Z , в отличие от переносчиков остальных фундаментальных сил безмассовых глюона, фотона и гравитона, имеют огромные массы.

Объединенная теория электрослабого взаимодействия разработана С. Вайнбергом, А. Саламом и Ш. Глэшоу. NPW 1979.

15.3.4. Стандартная модель.



Вещество

- 6 кварков
 - 6 лептонов
- Сгруппированы в 3 поколения

Взаимодействия

- Электрослабое
 - g (фотон)
 - Z^0, W^\pm (бозоны)
- Сильное
 - g (глюон)

Квантовой теории гравитации
пока нет...

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

<http://phys.nsu.ru/fit>

<http://el.nsu.ru>