

Ядерная физика в Интернете



Учебные материалы курса

"Физика атомного ядра и частиц"

- ▶ [Физика ядра и частиц. XX век](#)
- ▶ [Частицы и атомные ядра](#)
- ▶ [Шпаргалка для отличника \(Частицы и ядра\)](#)
- ▶ [Программа курса "Физика ядра и частиц"](#)
- ▶ [Лекции профессора Б.С. Ипханова 2015](#)
- ▶ [Лекции профессора И.М. Капитонова 2015](#)
- ▶ [Частицы и атомные ядра \(основные вопросы по курсу\)](#)
- ▶ [Обязательные вопросы для допуска к экзамену](#)
- ▶ [Семинары по физике ядра и частиц](#)
- ▶ [Частицы и атомные ядра. Семинары. Задачи](#)
- ▶ [Задачи и решения](#)
- ▶ [Описания задач общего ядерного практикума физического факультета МГУ](#)
- ▶ [Темы курсовых работ для студентов второго курса](#)

Материалы спецкурсов

- ▶ [Рождение и жизнь атомных ядер](#)
- ▶ [Ядерная физика и человек](#)
- ▶ [Микромир и Вселенная](#)
- ▶ [История атомного ядра](#)
- ▶ [Модели атомных ядер](#)
- ▶ [12 лекций по физике атомного ядра](#)
- ▶ [Ядерные реакции](#)
- ▶ [Ядерные реакции \(задачи\)](#)
- ▶ [Квантовая теория столкновений](#)
- ▶ [Фотоядерные реакции. Современный статус экспериментальных данных](#)
- ▶ [Взаимодействие фотонов и электронов с атомными ядрами](#)
- ▶ [Симметрии фотоядерных реакций](#)
- ▶ [Гигантский дипольный резонанс атомных ядер](#)
- ▶ [Ядерная резонансная флуоресценция](#)
- ▶ [Электромагнитные взаимодействия ядер](#)
- ▶ [Рассеяние электронов на ядрах и нуклонах](#)
- ▶ [Экзотические ядра](#)
- ▶ [Деление ядер](#)

Проект кафедры общей ядерной физики физического факультета МГУ

осуществляется при поддержке [НИИЯФ МГУ](#).

Разное

- ▶ [Поиск по сайту](#)
- ▶ [Материалы научного семинара по ядерной физике НИИЯФ МГУ](#)
- ▶ [Что нового на сайте](#)
- ▶ [100-летие открытия атомного ядра. Резерфорд](#)
- ▶ [Нобелевские лауреаты по физике](#)
- ▶ [Хроника открытий в физике ядра и частиц](#)
- ▶ [Биографии физиков](#)
- ▶ [Фотографии физиков](#)
- ▶ [Ссылки на ресурсы по ядерной физике](#)
- ▶ [Школы, семинары, рабочие совещания, конференции](#)
- ▶ [Физика атомного ядра и частиц в УФН](#)
- ▶ [Рефераты студентов](#)
- ▶ [Интерактивные проекты](#)
- ▶ [Физики шутят](#)
- ▶ [О сайте](#)

Справочные материалы

- ▶ [Частицы и атомные ядра. Основные понятия](#)
- ▶ [Карта атомных ядер](#)
- ▶ [Характеристики нуклида](#)
- ▶ [База данных по ядерным реакциям](#)
- ▶ [База ядерно-спектроскопических данных](#)
- ▶ [Ядерные данные \(CDFE\)](#)
- ▶ [Ядерные данные \(BNL\)](#)
- ▶ [Физика атомного ядра и частиц в Физической энциклопедии](#)
- ▶ [Обзор по физике частиц](#)
- ▶ [Таблицы частиц](#)
- ▶ [Константы и единицы измерений](#)
- ▶ [Греческий алфавит](#)
- ▶ [Таблица Менделеева](#)

Природа материи

2 этапа развития физики

Классическая физика

Механика. Термодинамика. Электричество. Магнетизм

XX век

Современная физика.

Квантовая физика. Релятивистская физика

Классическая физика	Релятивистская физика $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/сек
Квантовая физика $h = 4,1 \cdot 10^{-15}$ эВ/сек	Релятивистская квантовая физика

Основные понятия классической физики

Классическая механика

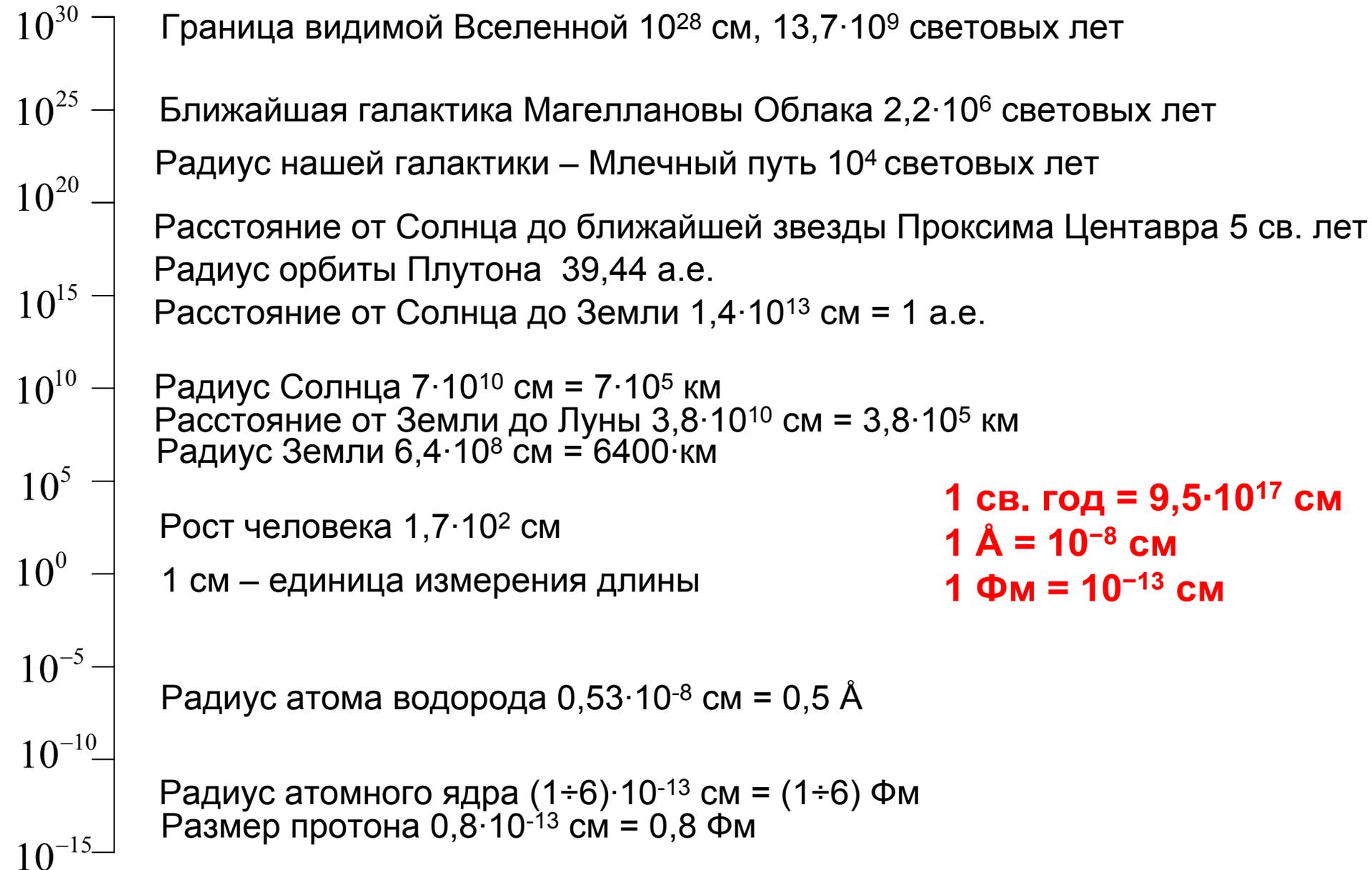
- Длина
- Время
- Масса

Электромагнетизм

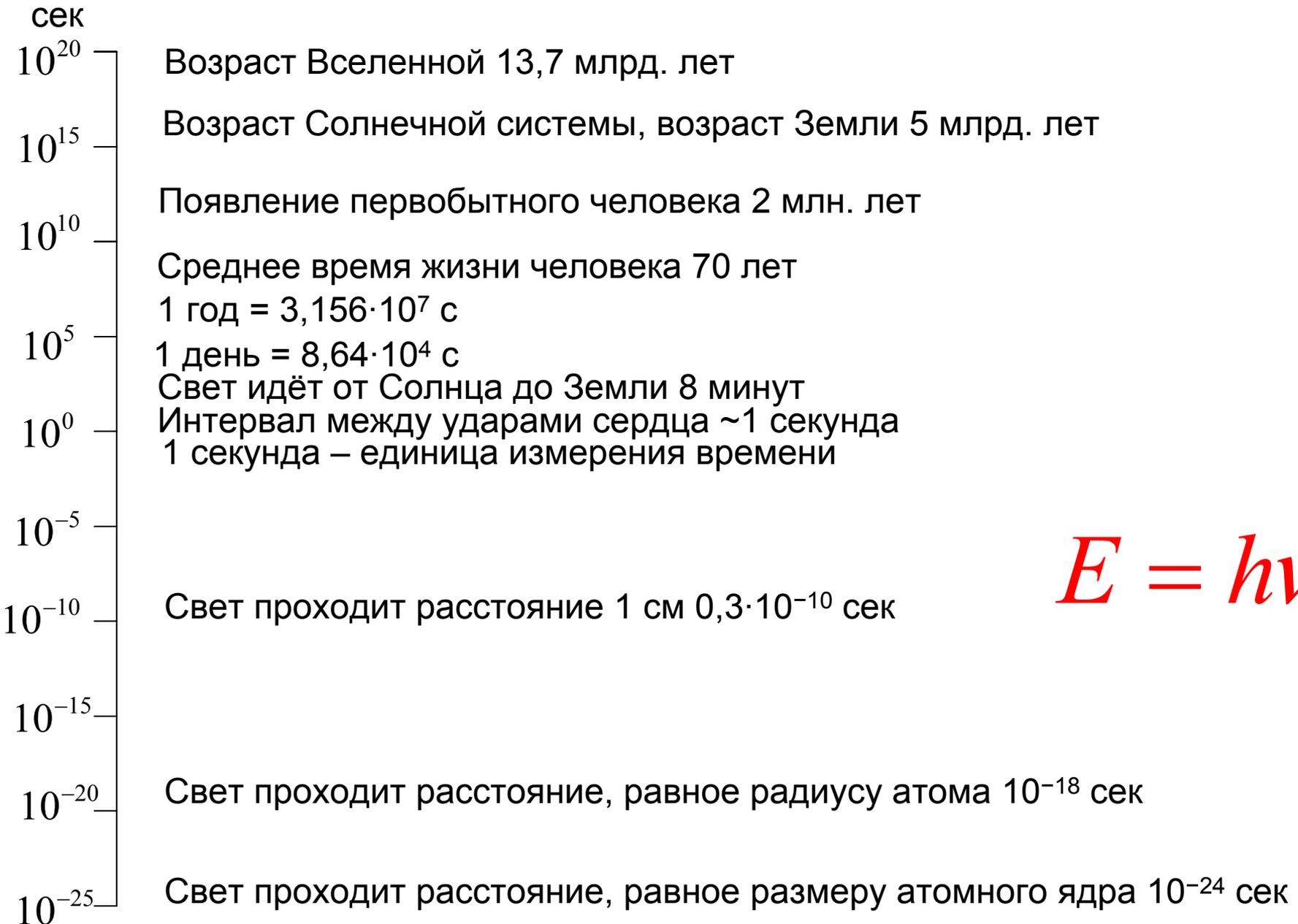
- Электрические заряды
- Электрические поля
- Магнитные поля
- Электромагнитное поле

Диапазон расстояний во Вселенной

см

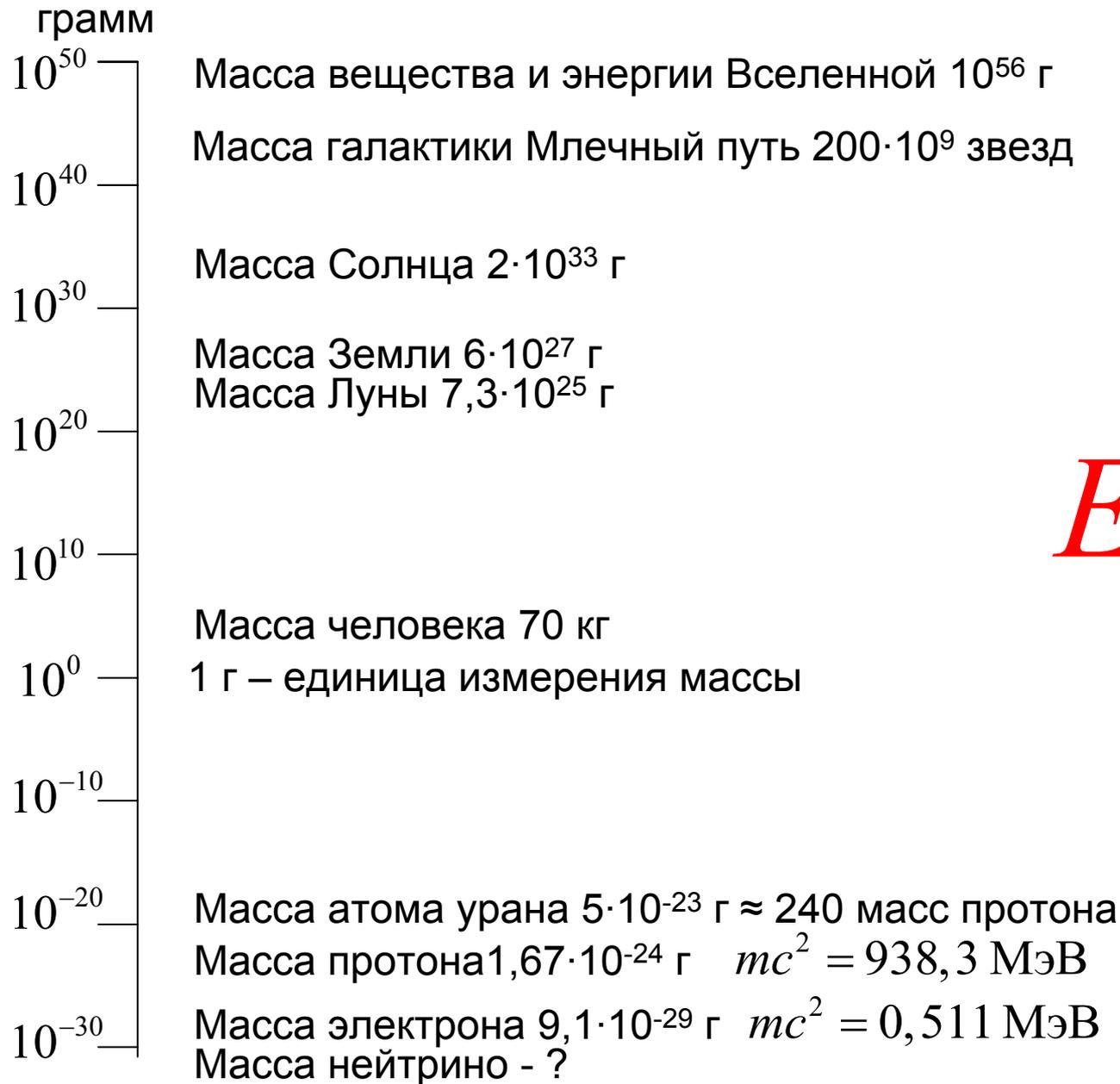


Диапазон временных интервалов во Вселенной



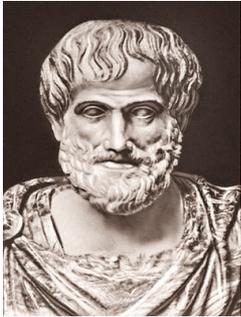
$$E = h\nu$$

Диапазон масс во Вселенной

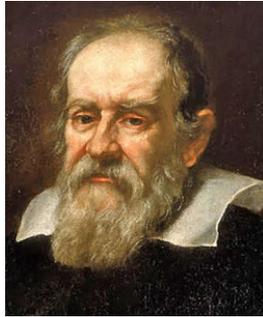


$$E = mc^2$$

Классическая механика. Движение



Аристотель
384–322 до н.э.



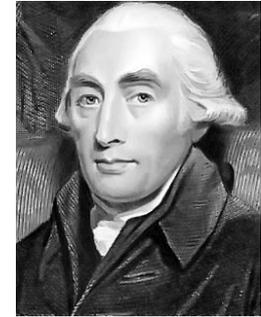
Галилео Галилей
1564 – 1642



Иоганн Кеплер
1571 – 1630



Исаак Ньютон
1642 – 1727



Генри Кавендиш
1731 – 1810

Законы Ньютона

1. Закон инерции

$$F = 0, \quad a = 0, \quad \vec{v} = const$$

2. Ускоренное движение

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

3. Если тело 1 действует на тело 2 с какой-либо силой, то тело 2 действует на тело 1 с равной противоположно направленной силой

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

Закон всемирного тяготения

$$\vec{F} = G \frac{m_1 m_2}{r^3} \vec{r}$$

Электромагнетизм



Шарль Кулон
1736 – 1806



Андре Мари
Ампер
1775 – 1836



Георг Ом
1789 – 1854



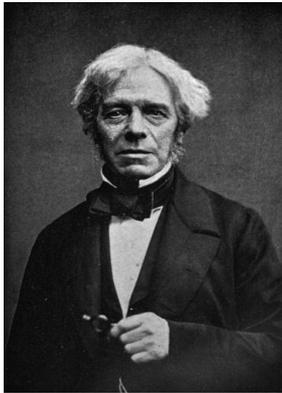
Алессандро
Вольта
1745 – 1827



Ханс Кристиан
Эрстед
1777 – 1851



Гендрик Лоренц
1853 – 1928



Майкл Фарадей
1791 – 1867



Генрих Герц
1857 – 1894



Джеймс Максвелл
1831 – 1879

Уравнения Максвелла

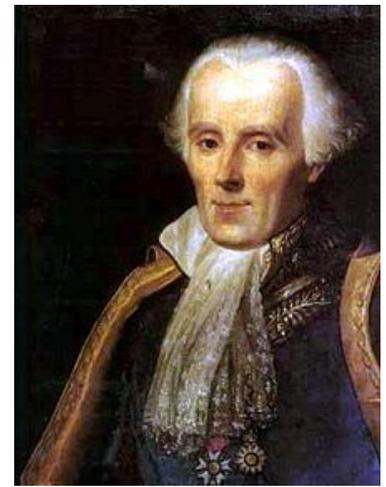
$$\operatorname{div} E = 4\pi\rho$$

$$\operatorname{div} B = 0$$

$$\operatorname{rot} E = -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} B = \frac{4\pi}{c} j + \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t}$$

Детерминизм



Пьер Лаплас
1749 - 1827

«Мы можем рассматривать настоящее состояние Вселенной как следствие его прошлого и причину его будущего. Разум, которому в каждый определённый момент времени были бы известны все силы, приводящие природу в движение, и положение всех тел, из которых она состоит, будь он также достаточно обширен, чтобы подвергнуть эти данные анализу, смог бы объять единым законом движение величайших тел Вселенной и мельчайшего атома; для такого разума ничего не было бы неясного и будущее существовало бы в его глазах точно так же, как прошлое».

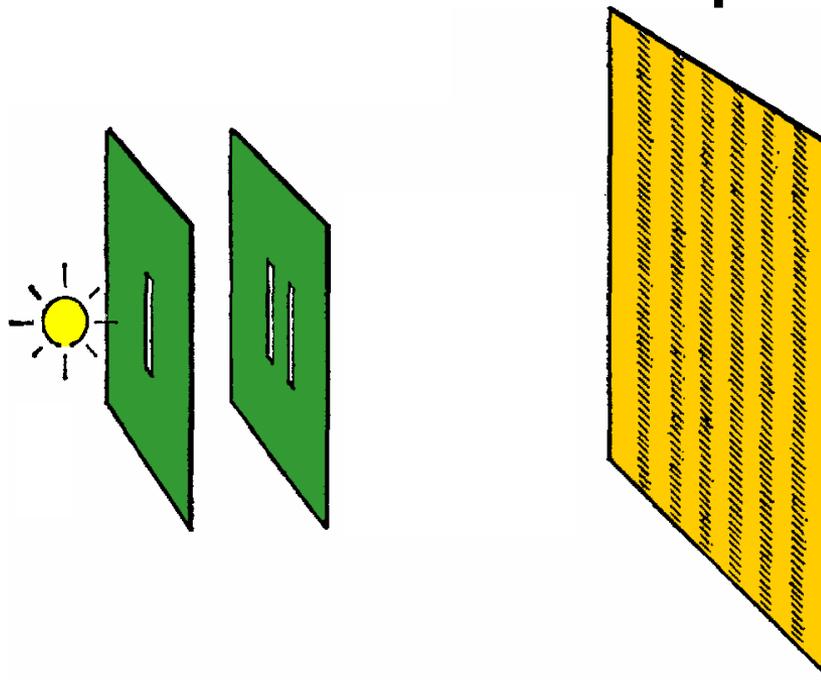
Квантовый мир

- 1895 г. В. Рентген. Рентгеновские лучи
- 1896 г. А. Беккерель. Радиоактивность
- 1897 г. Дж. Томсон. Электрон
- 1911 г. Э. Резерфорд. Атомное ядро
- 1924 г. Луи Де Бройль. Волновые свойства частиц

$$E = h\nu \quad p = h / \lambda$$

Свет. Волна? Частица?

1801 г. Т. Юнг. Волновая теория света

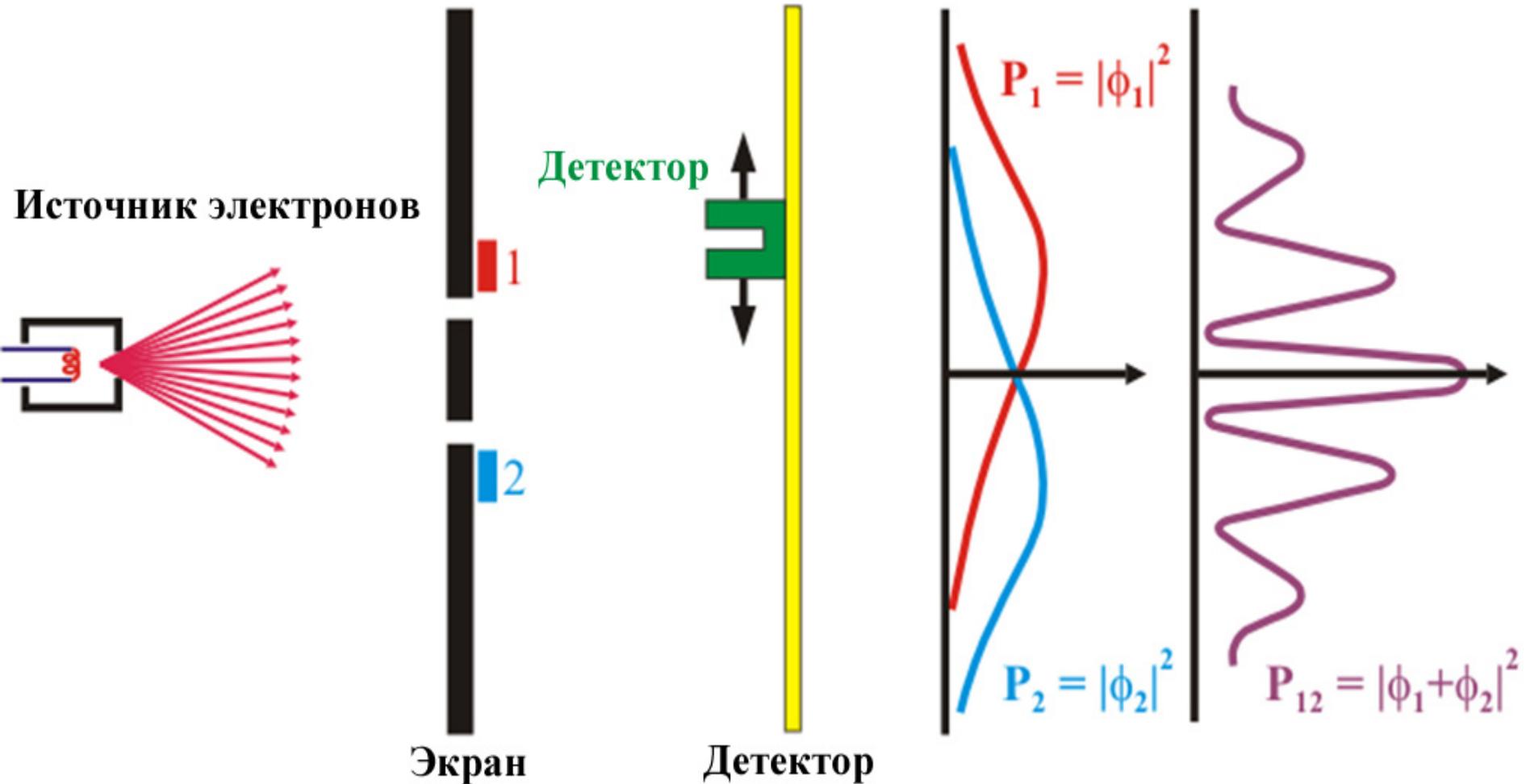


В опыте Юнга свет от источника падал на непрозрачный экран с двумя близко расположенными щелями. Оказалось, что изображение на экране состоит из нескольких интерференционных полос, что наглядно демонстрируют волновую природу света. Интерференционная картина явно зависит от двух щелей порождающих две волны, которые накладываются друг на друга. Если закрыть одну из щелей интерференционная картина исчезнет.

В то же время, если заменить экран детектором, способным к регистрации отдельных частиц (например, фотопластинкой), то обнаружится, что свет, вызывающий почернение фотоэмульсии в определённом месте, состоит из отдельных частиц – фотонов.

В этом проявилась волновая и корпускулярная природа света.

Интерференция электронов на двух щелях



1927 г.

К. Дэвиссон и Л. Джермер и независимо от них Дж. П. Томсон показали, что для пучка электронов, как и для светового пучка, наблюдается явление интерференции.

Корпускулярные и волновые свойства частиц.

Принцип неопределенности

Экспериментальное подтверждение идеи корпускулярно-волнового дуализма привело к пересмотру привычных представлений о движении частиц и способе описания частиц. Для классических материальных точек характерно движение по определенным траекториям, так, что их координаты и импульсы в любой момент времени точно известны. Для квантовых частиц это утверждение неприемлемо, так как для квантовой частицы импульс частицы связан с ее длиной волны, а говорить о длине волны в данной точке пространства бессмысленно. Поэтому для квантовой частицы нельзя одновременно точно определить значения ее координат и импульса. Неопределенность в значении координаты частицы Δx и неопределенность в значении компоненты импульса частицы Δp_x связаны соотношением неопределенности, установленным В. Гейзенбергом в 1927 году.

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \approx \hbar$$

Если время жизни некоторого состояния равно Δt , то неопределенность величины энергии этого состояния ΔE не может быть меньше $\Delta E / \hbar$.

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar$$

Нобелевская премия по физике

1932 г. - В. Гейзенберг.

За создание квантовой механики



В. Гейзенберг
1901 – 1976

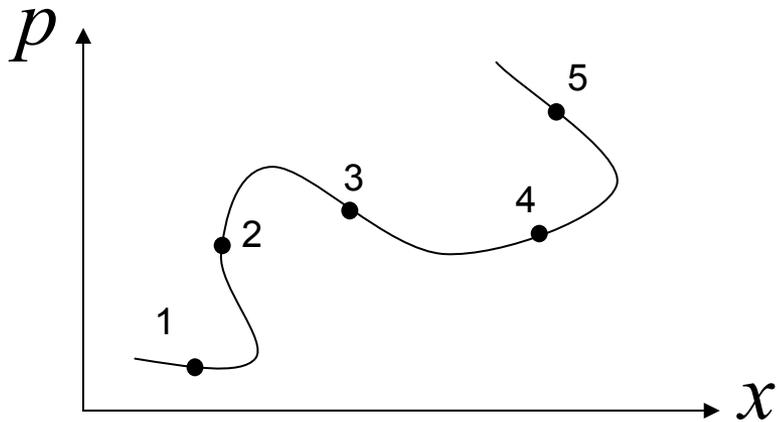
Классическая физика

x, p, t

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

$$\frac{dU}{dx} = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

$$H = U + E$$



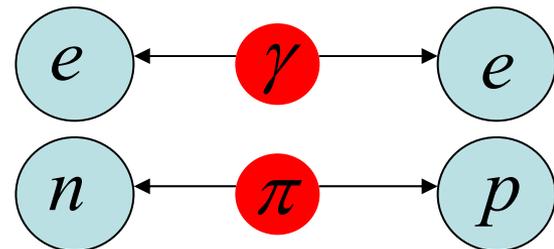
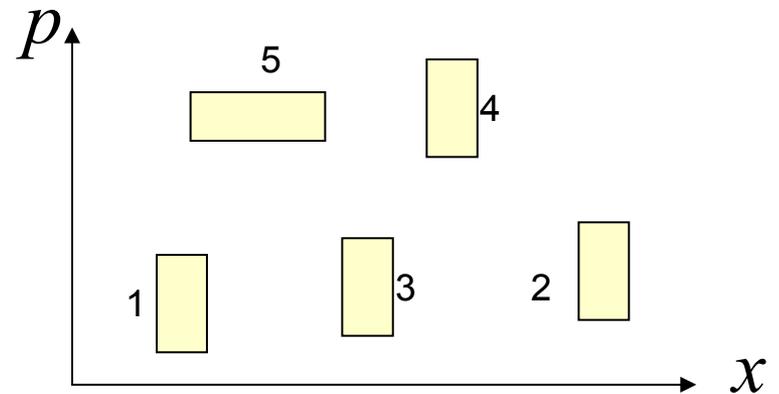
Квантовая физика

$\psi(x, t)$

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = (\hat{U} + \hat{E})\psi$$

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \approx \hbar$$

$$\hat{H}\psi = E\psi$$

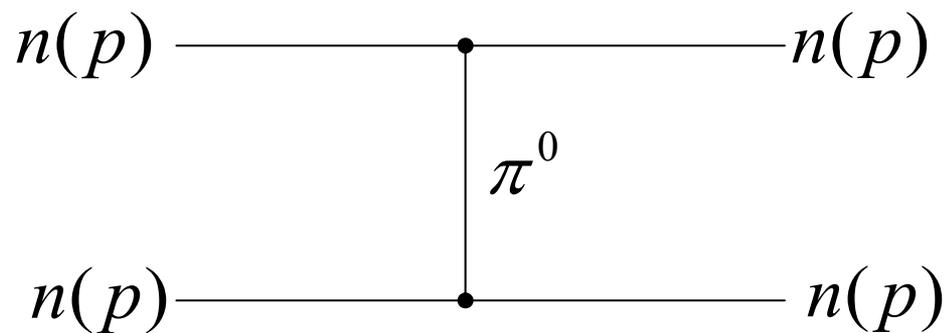
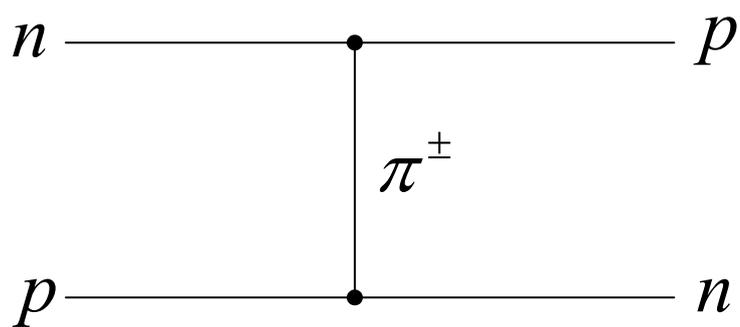
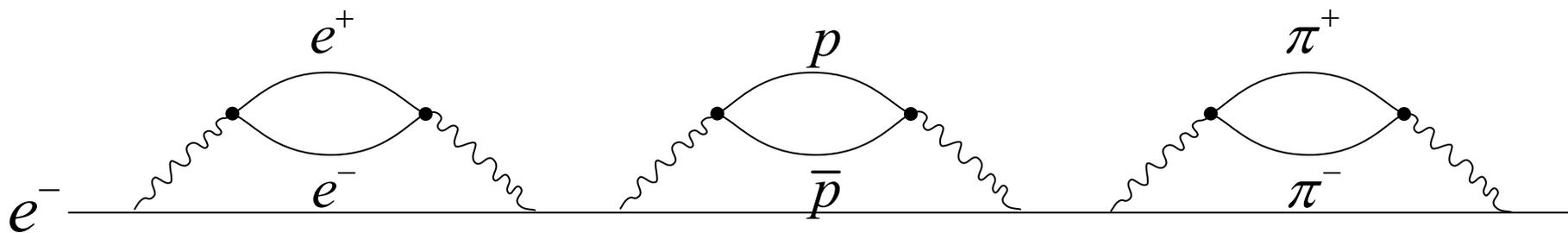


Соотношение неопределённостей.

Виртуальная частица

$$\Delta E \cdot \Delta T \approx \hbar$$

$$\Delta p \cdot \Delta x \approx \hbar$$



Как устроен Мир. 30-е годы XX века



В середине 30-х годов XX века физическая картина мира строилась исходя из трёх элементарных частиц — **электрона**, **протона** и **нейтрона**. Вещество состоит из атомов и молекул, в состав атома входят электроны. Основную массу атома составляет атомное ядро, состоящее из протонов и нейтронов.

Зачем нужны ускорители?

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



Как устроен Мир. 2015 г.

ФЕРМИОНЫ

Спин $J = 1/2$

Лептоны (спин = 1/2)			Кварки (спин = 1/2)				
Аромат		Масса, ГэВ/с ²		Аромат		Масса, ГэВ/с ²	Электрический заряд
ν_e	электронное нейтрино	$< 1 \cdot 10^{-8}$		1 поколение	u	up	0,003
e	электрон	0,0005111	d		down	0,006	-1/3
ν_μ	мюонное нейтрино	$< 0,0002$	2 поколение	c	charm	1,3	2/3
μ	мюон	0,106		s	strange	0,1	-1/3
ν_τ	тау-нейтрино	$< 0,02$	3 поколение	t	top	175	2/3
τ	тау	1,7771		b	bottom	4,3	-1/3

Стабильные частицы

e^- — электрон, e^+ — позитрон

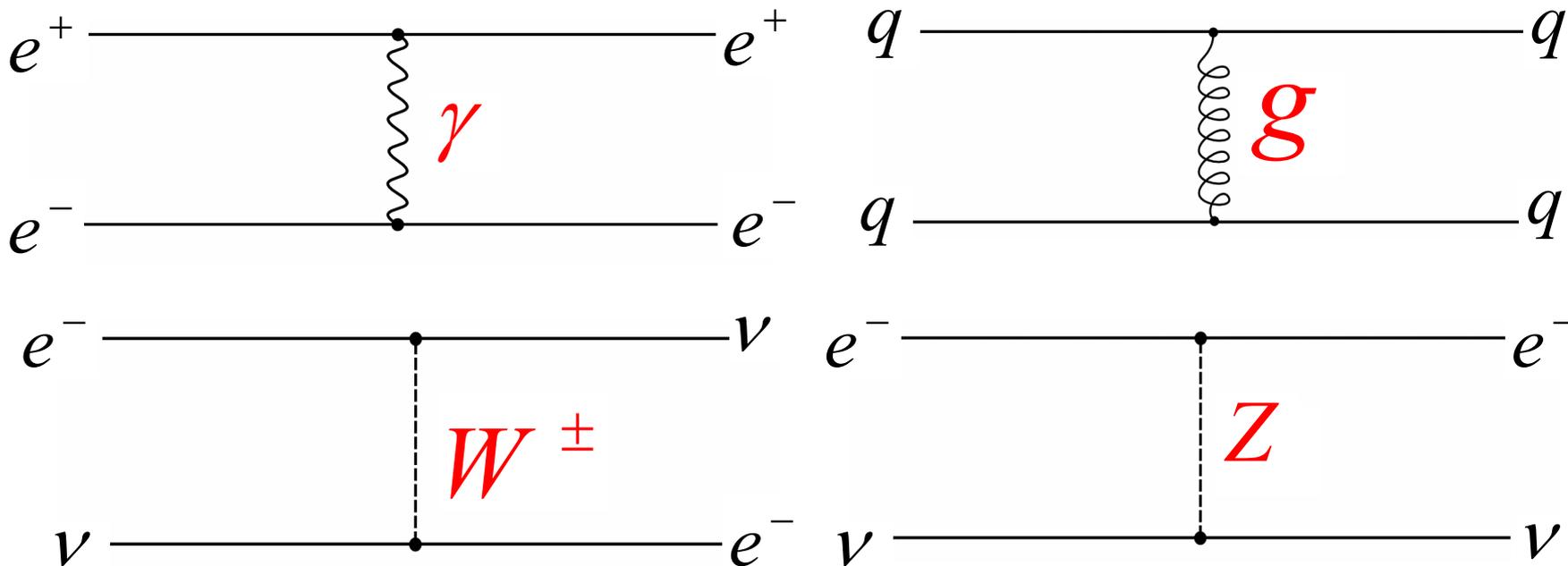
p — протон, \bar{p} — антипротон

? $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, \tilde{\nu}_e, \tilde{\nu}_\mu, \tilde{\nu}_\tau$

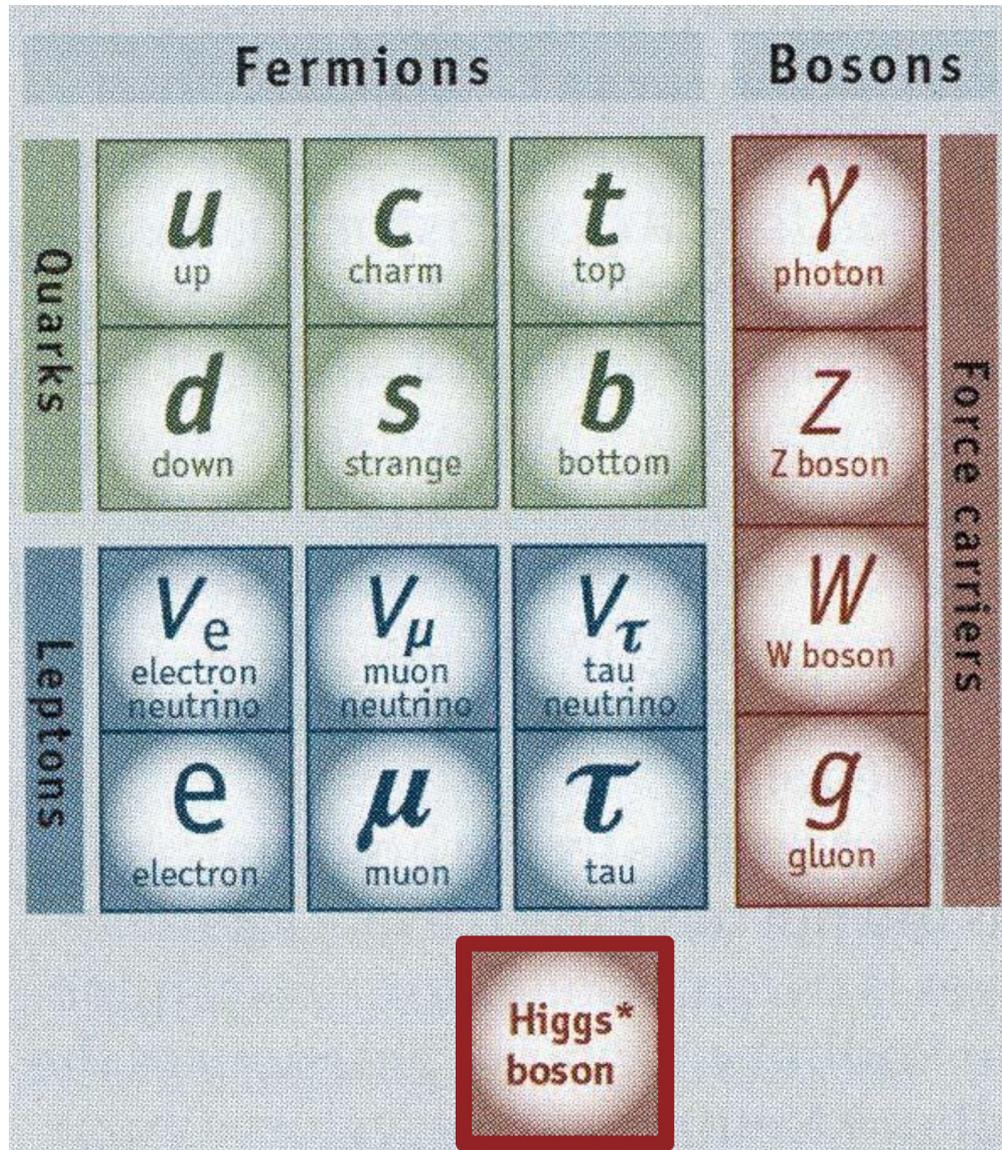
Взаимодействия

Спин $J=1$

Взаимодействие	На какие частицы действует	Калибровочные бозоны	Радиус действия	Константа взаимодействия
Сильное	Все цветные частицы	8 глюонов, безмассовые.	$1 \text{ ФМ} = 1/m_\pi$	1
Электромагнитное	Все электрически заряженные частицы	Фотон, безмассовый.	∞	1/137
Слабое	Кварки, лептоны, электрослабые калибровочные бозоны	W^+, W^-, Z , $m(W^\pm) = 80 \text{ ГэВ}$, $m(Z) = 91 \text{ ГэВ}$.	$10^{-2} \text{ ФМ} = 1/m_W$	$\sim 1/30$
Гравитационное	Все массивные частицы	Гравитон, спин $J = 2$, безмассовый	∞	10^{-38}



Стандартная модель



Принцип относительности

Все наблюдатели, движущиеся с постоянной скоростью, испытывают действие одних и тех же физических законов. Поэтому каждый наблюдатель может утверждать, что он находится в покоящейся системе координат.

1905 г. Специальная теория относительности



Альберт Эйнштейн
1879 – 1955

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}$$

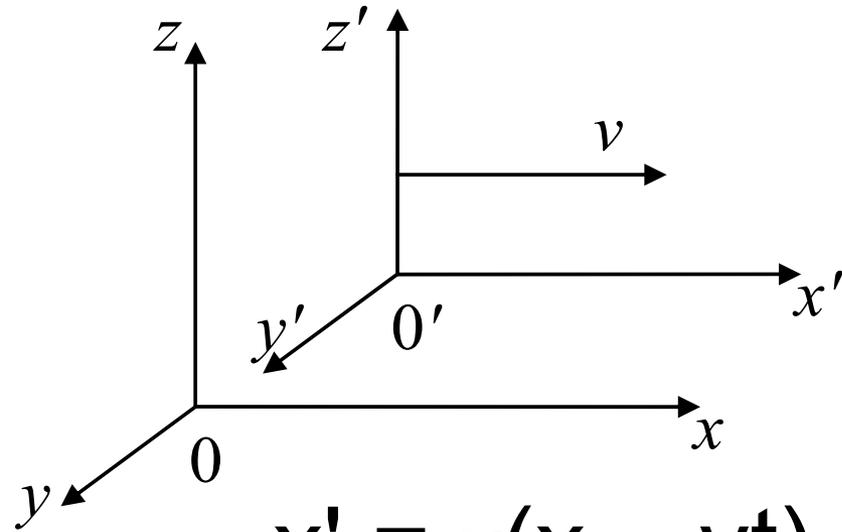
Постулаты Эйнштейна

1. Все физические законы одинаковы во всех инерциальных системах отсчета, движущихся относительно друг друга поступательно и равномерно.
2. Скорость света в пустоте одинакова с точки зрения всех наблюдателей независимо от движения источника света относительно наблюдателя.

Пространство. Время. Наблюдатель

1638 г. Преобразования Галилея

1904 г. Преобразования Лоренца



$$x' = x - vt,$$

$$y' = y,$$

$$z' = z,$$

$$t' = t$$

$$x' = \gamma(x - vt),$$

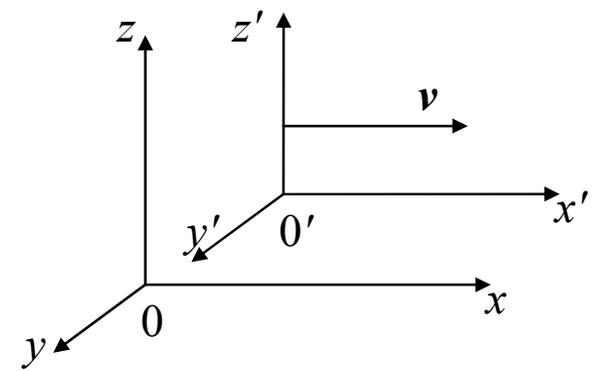
$$y' = y,$$

$$z' = z,$$

$$t' = \gamma(t - \beta x/c)$$

$$\beta = \frac{v}{c}, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Замедление времени



Интервал времени, измеренный в движущейся системе отсчета S' , длиннее интервала времени в покоящейся системе отсчета S .

$$t' = t \cdot \gamma = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Сокращение длины

Размер линейки, движущейся параллельно своей оси в системе отсчета S' , короче размера линейки в покоящейся системе отсчета S .

$$l' = \frac{l}{\gamma} = l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Классическая и релятивистская динамики

$$E_{\text{кин}} = \frac{mv^2}{2}$$

$$p = mv$$

τ_0 - время жизни частицы
в системе покоя

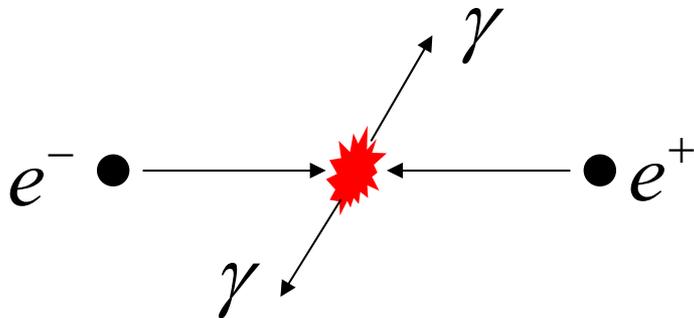
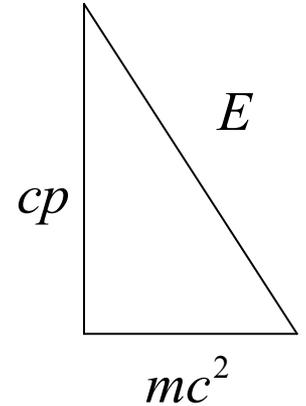
$$E^2 = c^2 p^2 + m^2 c^4$$

$$E_{\text{кин}} = E - mc^2$$

$$p = \frac{mc\beta}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

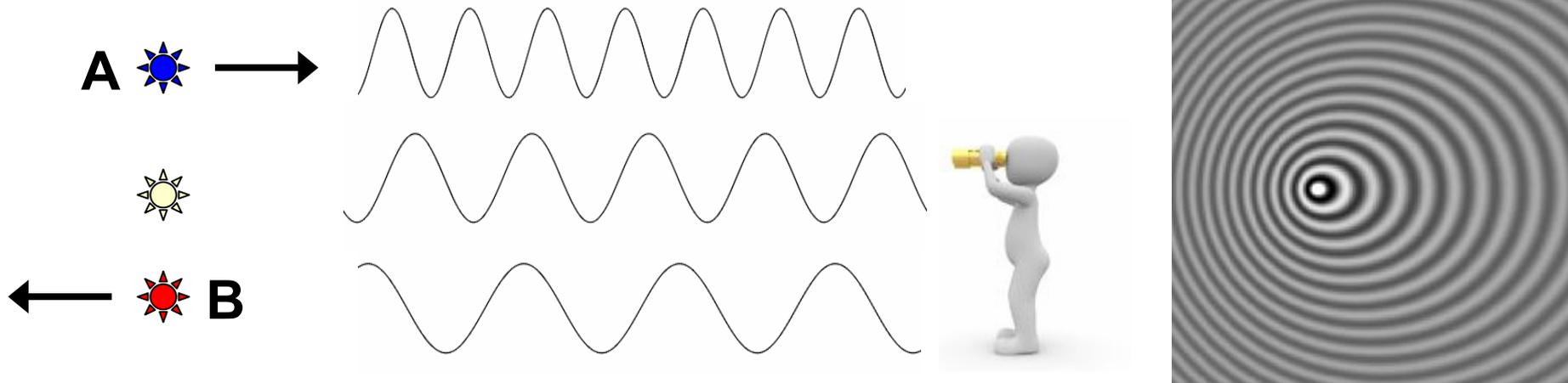
$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

- время жизни частицы,
движущейся со скоростью β .



1842 г. Эффект Доплера

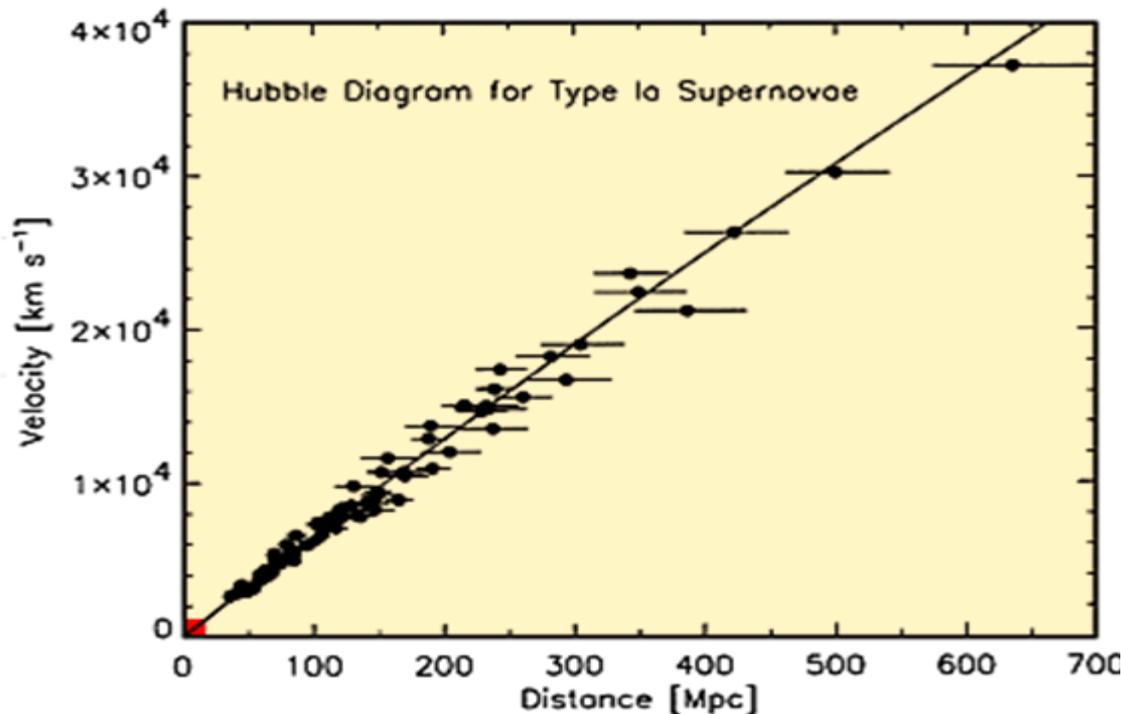
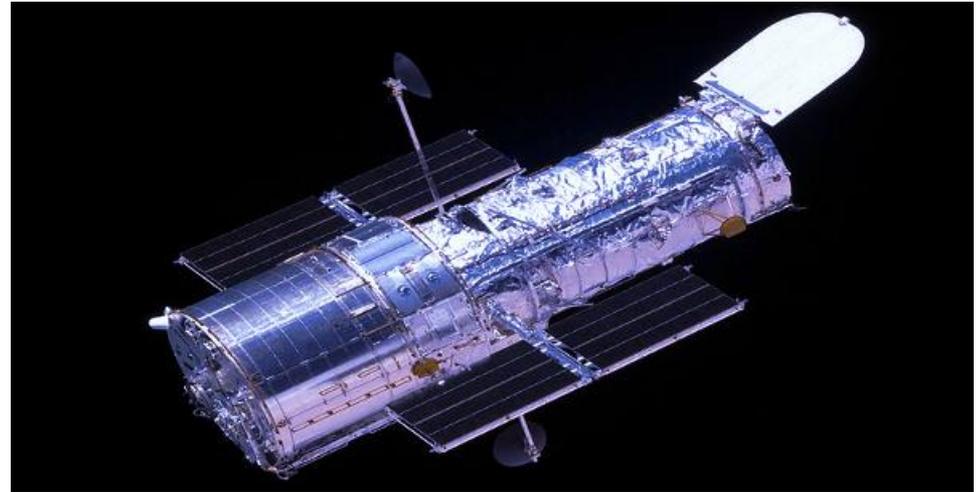
Во всех инерциальных системах отсчета скорость света в вакууме постоянна и равна c . Существует ли различие в световых сигналах от неподвижного и движущегося источников? **Да.** Оно проявляется в эффекте Доплера. Свет, приходящий к наблюдателю от источника **A**, движущегося к наблюдателю, будет приходить с меньшей длиной волны (синее смещение). Свет, приходящий к наблюдателю от источника **B**, удаляющегося от наблюдателя, будет приходить с большей длиной волны (красное смещение).



Другие галактики



Э. Хаббл
1889 – 1953



1924 - туманность Андромеда – другая галактика

1929 - красное смещение, разбегание галактик

1990 - запуск телескопа Хаббл

$$V = H \cdot R$$

Постоянная Хаббла

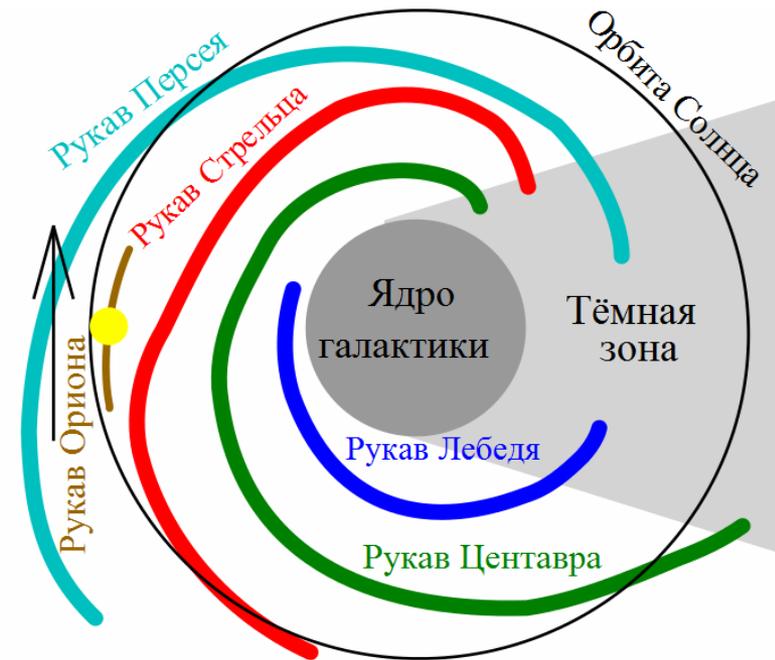
$$H = 71 \pm 4 \frac{\text{км}}{\text{сек} \cdot \text{мегапарсек}}$$

Туманность Андромеды



Галактика Млечный путь

Масса	$\sim 3 \cdot 10^{12} M_{\odot}$
Число звезд	~ 200 млрд. звезд
Диаметр	$\sim 100\,000$ св. лет
Толщина	
балдж	3000 св. лет
диск	1000 св. лет
Скорость относительно реликтового излучения	550 км/сек
Галактический период обращения Солнца	200–250 млн. лет



Модели Вселенной



Жорж Леметр
1894 – 1966

Стационарная модель Вселенной

Независимость расширения Вселенной и появления материи.

Теория панспермии.

Автор термина «Большой Взрыв».

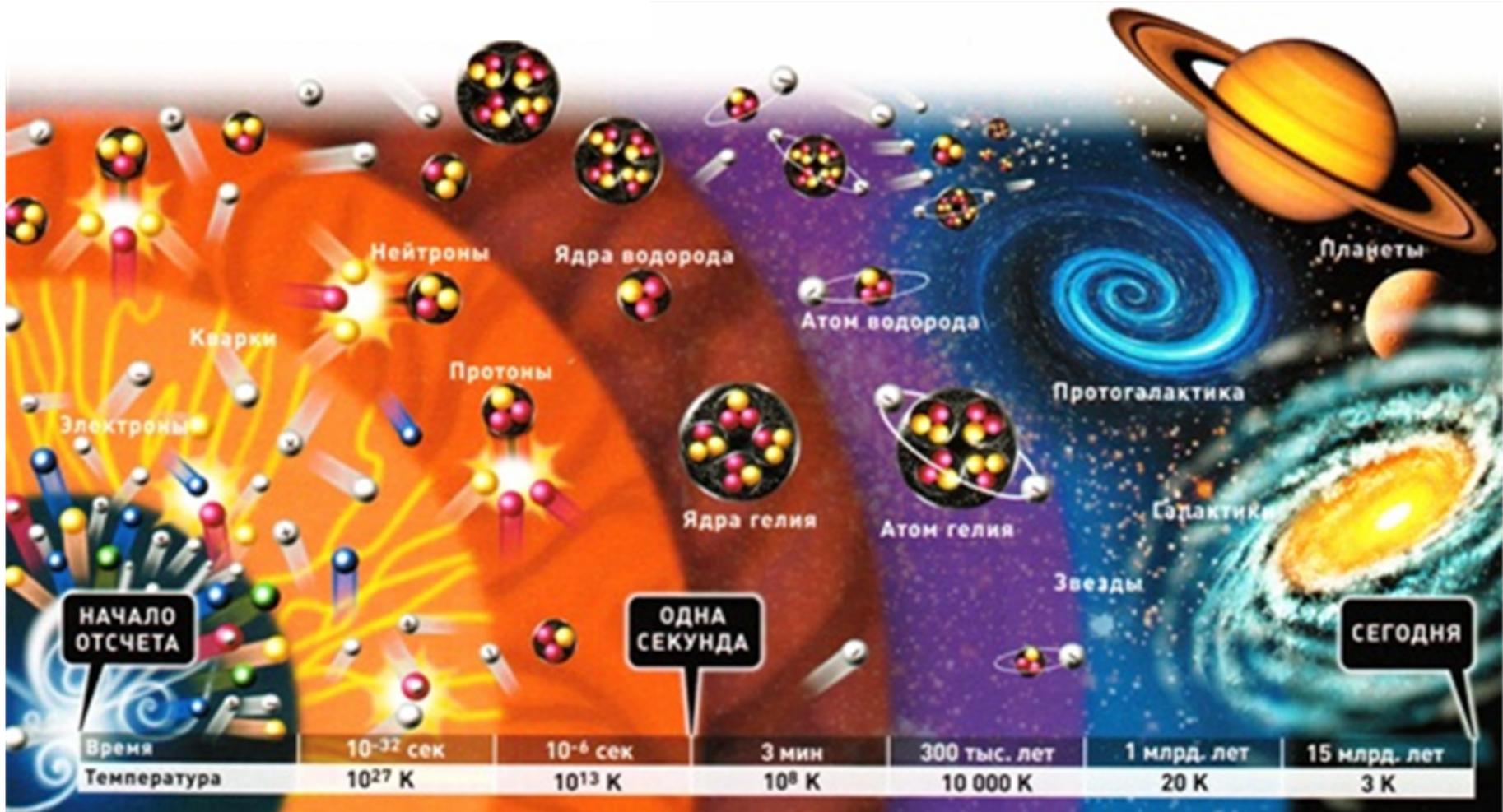


Фред Хойл
1915 – 2001

Модель расширяющейся Вселенной, развитая на основе наблюдаемого красного смещения галактик.

Закономерность между расстоянием до галактики и её скоростью.

История Вселенной



Планковские единицы

Объединение четырёх фундаментальных взаимодействий, включая гравитацию, должно происходить при энергиях $\approx 10^{19}$ ГэВ. Эту энергию называют *планковской*. Она получается комбинацией трёх мировых констант: гравитационной постоянной G , постоянной Планка \hbar и скорости света:

Планковская энергия

$$E_{Pl} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} \approx 1.2 \cdot 10^{19} \text{ ГэВ}$$

Планковская масса

$$m_{Pl} = \frac{E_{Pl}}{c^2} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 1.2 \cdot 10^{19} \text{ ГэВ} / c^2$$

Планковская длина

$$r_{Pl} = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} \approx 10^{-33} \text{ см}$$

При планковской энергии к трём уже объединённым при более низких энергиях сильному, электромагнитному и слабому взаимодействиям присоединяется гравитационное, образуя единое универсальное взаимодействие.

Первые мгновения жизни Вселенной

Время после Большого Взрыва, с	Характерные температуры, К	Характерные расстояния, см	Этап/Событие
$< 10^{-43}$	$> 10^{32}$	$< 10^{-33}$	Квантовый хаос. Суперсимметрия (объединение всех взаимодействий)
10^{-43}	10^{32}	10^{-33}	Планковский момент. Отделение гравитационного взаимодействия
$10^{-43} - 10^{-36}$	$10^{32} - 10^{28}$	$10^{-33} - 10^{-29}$	Великое объединение электрослабого и сильного взаимодействий
10^{-36}	10^{28}	10^{-29}	Конец Великого объединения. Разделение сильного и электрослабого взаимодействий
10^{-10}	10^{15}	10^{-16}	Конец электрослабого объединения

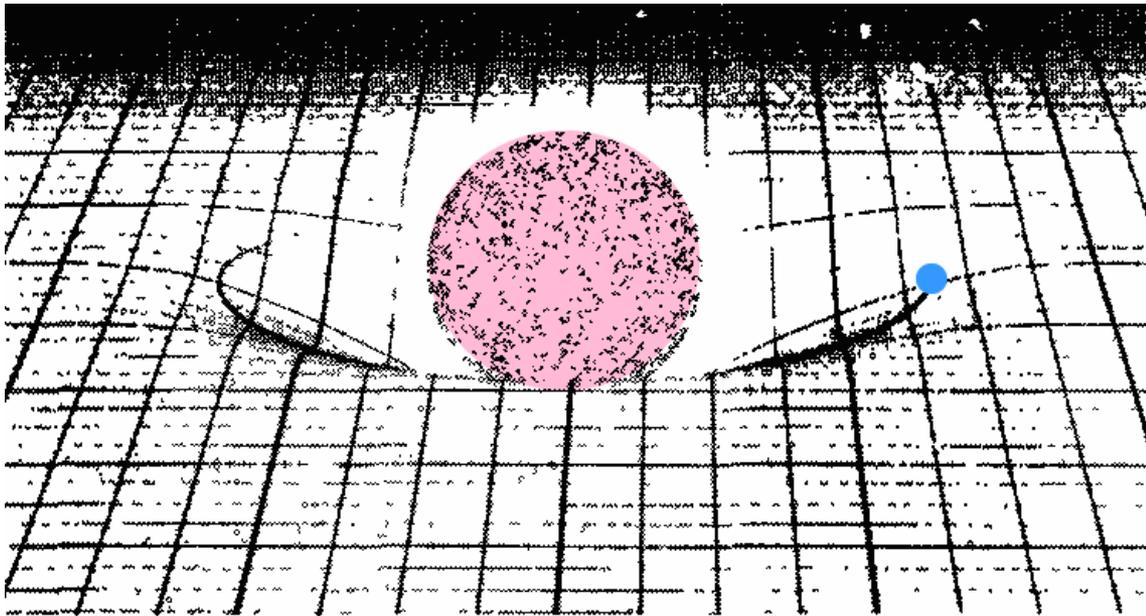
Космическая шкала времени

Время от настоящего момента, млрд. лет	Событие
14	Большой Взрыв
14	Рождение частиц, аннигиляция вещества и антивещества
14	Синтез ^2H , ^4He
13	Образование Галактик
10	Сжатие нашей протогалактики
10	Образование первых звёзд
5	Образование Солнечной системы, планет
4	Образование земных пород
3	Зарождение микроорганизмов
2	Формирование атмосферы Земли
1	Зарождение жизни
0,60	Ранние окаменелости
0,45	Рыбы
0,15	Динозавры
0,05	Первые млекопитающие
2 млн. лет	Человек

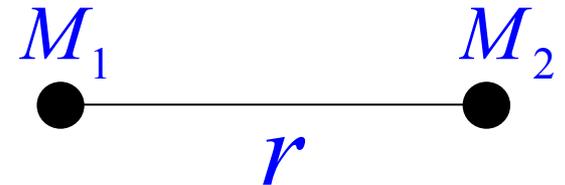
Гравитация.

Общая теория относительности.

Искривление пространства

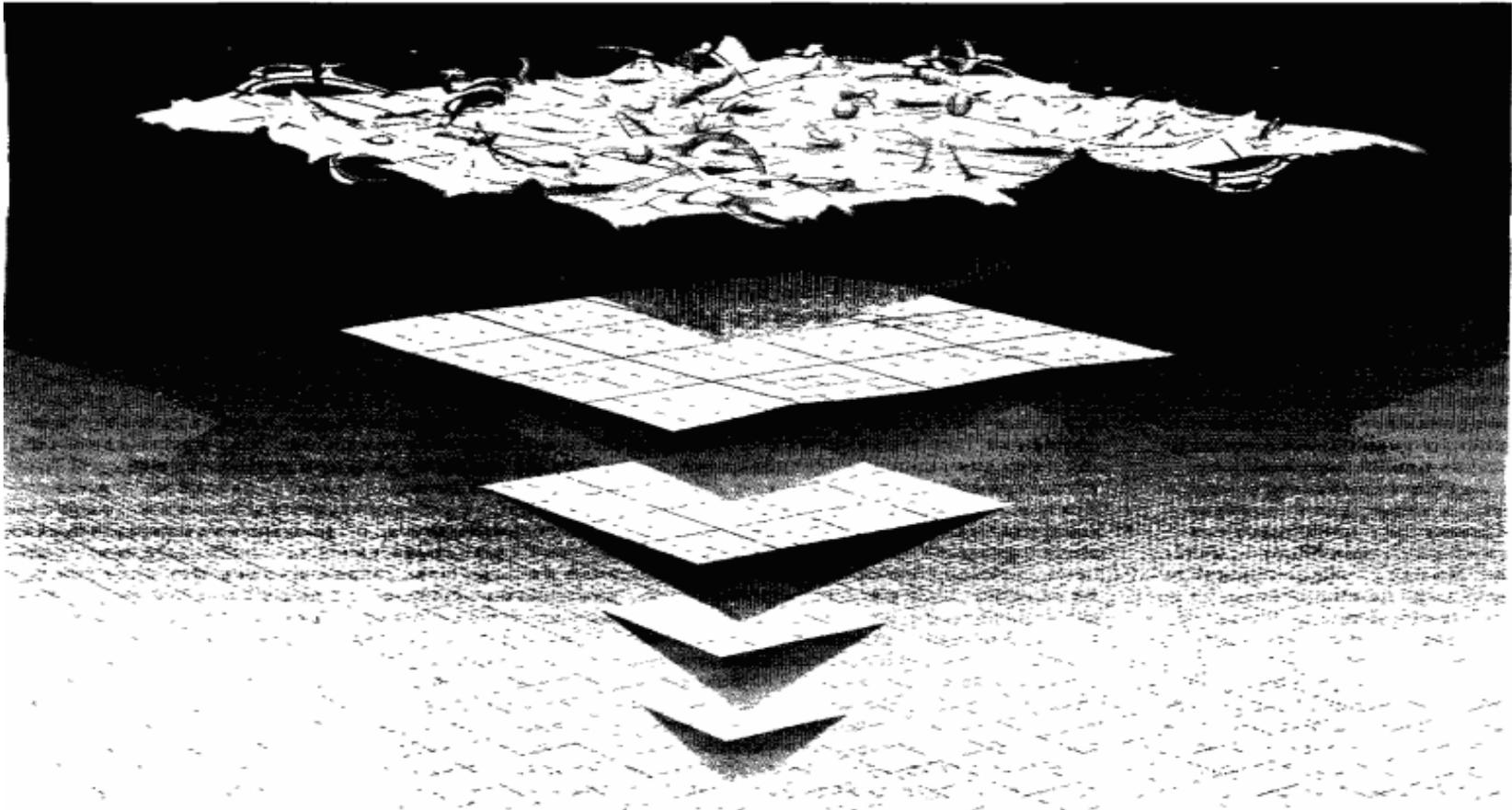


$$F = G \frac{M_1 M_2}{r^2}$$



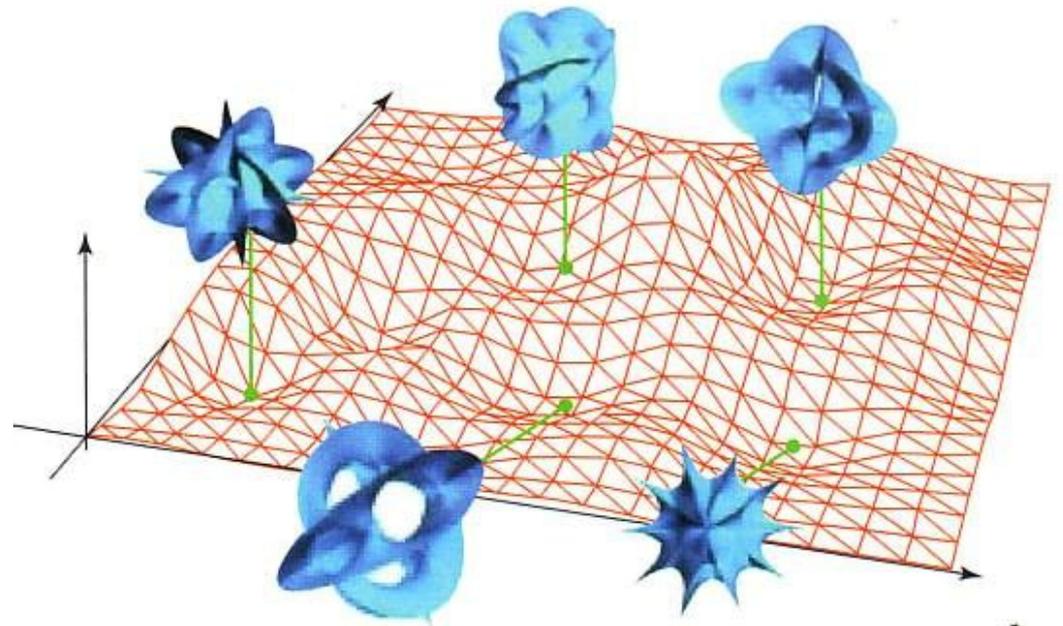
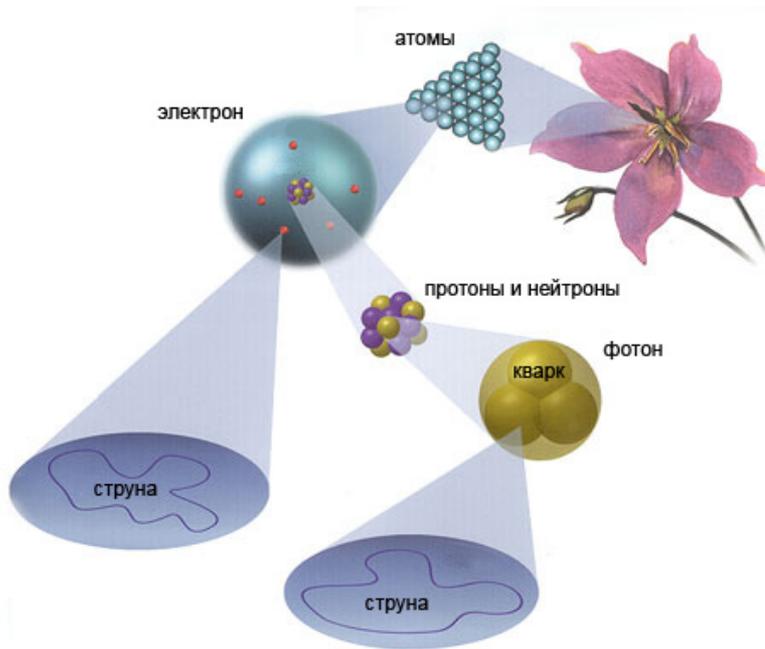
Земля остается на орбите вокруг Солнца потому, что катится по ложбине в искривленной структуре пространства. Говоря более точно, она следует «линии наименьшего сопротивления» в деформированной окрестности Солнца

Квантовая теория. Структура пространства

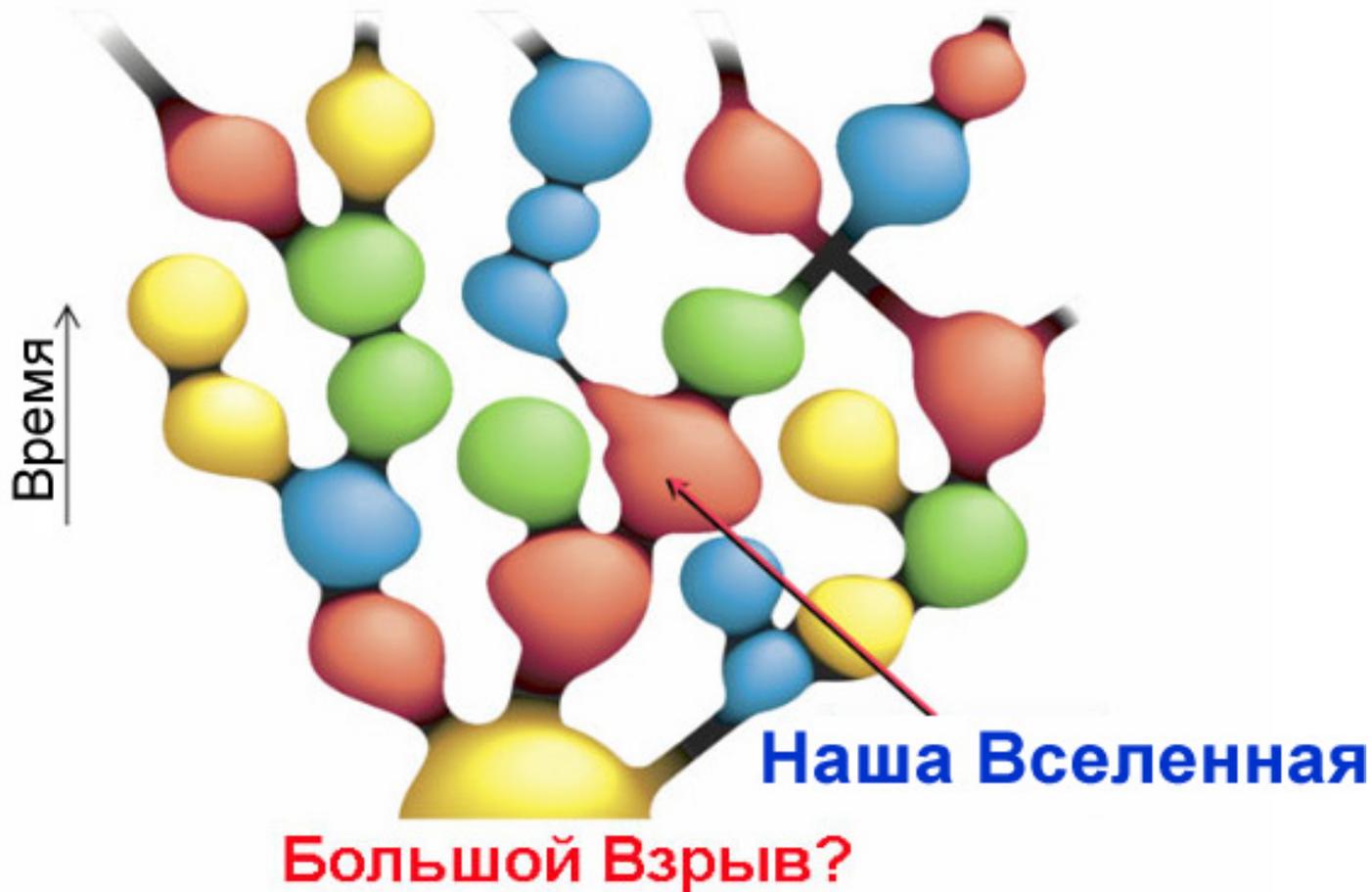


Рассматривая область пространства при все большем увеличении, можно исследовать свойства пространства на ультрамикроскопическом уровне. Попытки объединить общую теорию относительности и квантовую механику наталкиваются на кипящую квантовую пену, проявляющуюся при самом большем увеличении.

Струны. 10 + 1



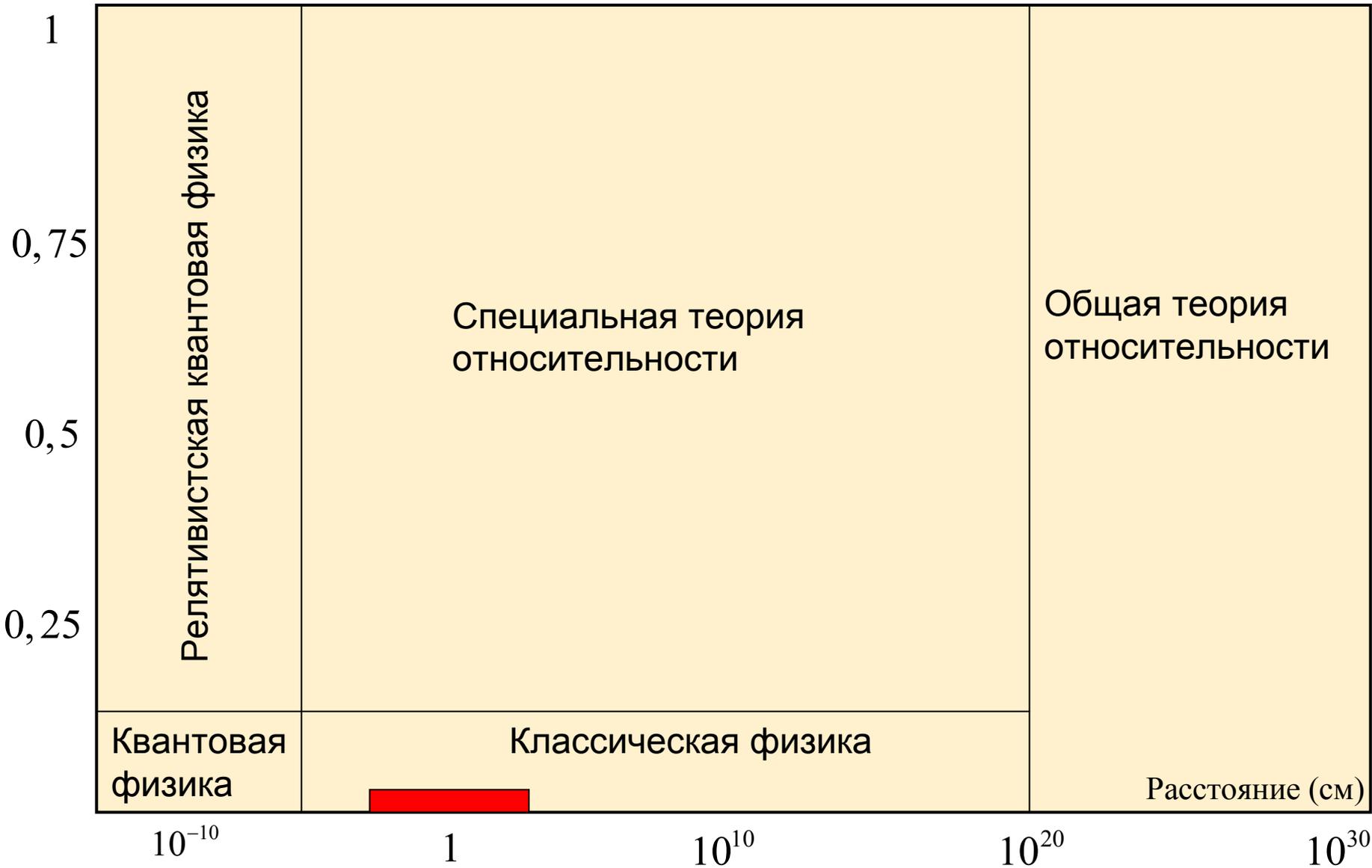
Параллельные Вселенные



Из принципа неопределенности следует, что Вселенные могут иметь различные истории развития. Мы живём в одной из таких Вселенных.

Явления повседневной жизни

$$\beta = \frac{v}{c}$$



Вопросы? Вопросы!

Несмотря на впечатляющие успехи Стандартной модели, целый ряд вопросов сегодня не имеет убедительных ответов.

1. Почему существуют три поколения фундаментальных частиц, состоящих из пары кварков и лептонов?
2. Существуют ли четвертое, пятое, ... поколения фундаментальных частиц?
3. Почему существуют кварки и лептоны, и чем вызвано различие между ними?
4. Почему фундаментальными частицами вещества являются фермионы, в то время как фундаментальными переносчиками взаимодействия — бозоны?
5. Почему разные фундаментальные частицы имеют разные массы?
6. Почему различаются пространственная и временная степени свободы?
7. Живем ли мы в четырехмерном пространстве-времени, или оно имеет большее число измерений?
8. Существуют ли кванты пространства и времени?
9. ???????