ФИЗИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ
МГУ ИМЕНИ
М.В. ЛОМОНОСОВА

teach-in
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

АСТРОФИЗИКА: ОТ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА ДО ВЕЛИКОГО МОЛЧАНИЯ

ЛИПУНОВ
ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ

ФИЗФАК МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ. РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ. СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU.

ЕСЛИ ВЫ ОБНАРУЖИЛИ ОШИБКИ ИЛИ ОПЕЧАТКИ, ТО СООБЩИТЕ ОБ ЭТОМ, НАПИСАВ СООБЩЕСТВУ VK.COM/TEACHINMSU.

БЛАГОДАРИМ ЗА ПОДГОТОВКУ КОНСПЕКТА
СТУДЕНТКУ ФИЗИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МГУ
ЧЕРЕМНОВУ МАРИЮ АЛЕКСАНДРОВНУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ
ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

ОГЛАВЛЕНИЕ

ЛЕКЦИЯ 1. ПРОСТРАНСТВО-ВРЕМЯ 5
Вселенная, которой не могло быть (введение) 5
Скорость света. Эксперимент Рёмера 6
Мнимые числа. Кардано. Эйлер 7
Время - мнимое пространство 8
Пространство-время Минковского 8
Неизменность интервала - постулат Специальной Теории Относительности 9

ЛЕКЦИЯ 2. ЦВЕТНАЯ ВСЕЛЕННАЯ 10
Теория Ньютона. Цветные корпускулы 10
Волновая теория Гюйгенса и Френеля 10
Пятно Пуассона 10
Свет - волна! 11
Спектральные классы звезд 12
Химия Вселенной 13

ЛЕКЦИЯ 3. ЗАКОН ХАББЛА 15
Повторение предыдущих лекций 15
Весто Слайфер – стахановец 15
Туманности 16
Открытие разбегания галактик 17
Стандартная свеча 18
Закон Хаббла 18
Вселенная как мыльный пузырь 19
Фундаментальное время Вселенной 19

ЛЕКЦИЯ 4. ВСЕЛЕННАЯ КАК РАКЕТА 21
Введение 21
Три закона Кеплера 21
Закон всемирного тяготения. Ньютон или Гук? 22
Вселенная как космическая ракета 23
Вторая космическая скорость 23
Критическая плотность 24

ЛЕКЦИЯ 5. ГОРЯЧАЯ ВСЕЛЕННАЯ 26
Великая джаз-банда: Георгий Гамов 26
Три энергии и одно тепло 26
Вселенная как поршень 27
Давление света и закон Стефана-Больцмана 28
Предсказание реликтового излучения 29
Открытие реликтового излучения 29
Радиационно-доминированная Вселенная 29
Почему Вселенная называется горячей? 30
Пьяная Вселенная 30

ЛЕКЦИЯ 6. ОБРАЗОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ВСЕЛЕННОЙ 33
Вселенная как бочка меда 33
Звуковые волны 35

Тяжелый звук 35
Образование объектов в расширяющейся Вселенной 36
Песня про троллейбус 37
Итоги предыдущих лекций 38
Парадокс №1. Нас в этой Вселенной не должно быть! 38

ЛЕКЦИЯ 7. ПАРАДОКСЫ 40

Задача: масса и энергия 40
Парадокс №1. Нас в этой Вселенной не должно быть! 40
Парадокс причинности №2 42
Парадокс №3. Вселенная младше звезд 42
Парадокс тонкой настройки №4 44

ЛЕКЦИЯ 8. ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ 45

Фриц Цвикки и его 40-см телескоп 45
Для чего нужна темная материя 47
Теория поля 48
Вселенная как Черёмушки или мир глазами первого дальтоника 48

ЛЕКЦИЯ 9. ИНФЛЯЦИЯ 50

Солнечная система и атом водорода 50
Как классическая физика получила неуд. Число N1 50
Квантовая механика: глаза боятся, а руки делают 51
Квантование орбит 52
Четыре взаимодействия в природе 53
Симметрия и ее разрушение 53
Пятое колесо в телеге! Скалярное взаимодействие 54
Инфляция Гута и месть Гука 54

ЛЕКЦИЯ 10. ТЕОРИЯ ПУСТОТЫ 57

Эфир. Опыт Майкельсона-Морли 57
Море Дирака 58
Физика – это геометрия, а геометрия - физика? 58
Пятый постулат Эвклида 59
Эрнст Мах и его полезное заблуждение 59
Уравнение Эйнштейна 60
Вселенная Леметра (F) 60
Стационарная Вселенная Хойла 60
Стандартная свеча Вселенной 60
Обнаружение антигравитации 61
Большое число номер два N2 61
Так что же открыл Хаббл? 62
Песня про темную энергию. Мироздание Глинера. 63
Вселенная Линде (МГУ) 63

ЛЕКЦИЯ 11. ВЕЛИКОЕ МОЛЧАНИЕ 65

А дальше? Дальше - Великое Молчание! 65
Сколько планет во Вселенной? 65
Разум как инфляционный процесс 67
Парадокс Ферми и Число N3 67
Посчитаем цивилизации 68

Через сколько лет мы научимся порождать искусственные Вселенные? **68**
Простая Вселенная **68**
Миллион лет средневековья. Нетривиальный прогресс. **69**
Парадокс Циолковского **69**
А что такое время? **69**
Энтропия растет как сорняк на грядке, а остается прекрасной незнакомкой **70**
Великое молчание будущего **70**
Бесконечно сложный мир **70**

ЛЕКЦИЯ 12. "ЧТО ДЕЛАТЬ?" **72**

Введение **72**
Гравитационные волны открыты! **72**
Как поймать гравитационные волны? **72**
Машина сценариев - искусственная Вселенная **73**
Что такое гамма-лучи? **74**
Русский Космический проект **75**
Супертелескопы **75**
Великие космические свершения первой половины XXI века **76**

Лекция 1. Пространство-время

Вселенная, которой не могло быть (введение)

Первые лекции будут посвящены некой Вселенной, которую астрономы и астрофизики пытались строить весь двадцатый век (примерно с 10-х–11-х годов). Сразу стоит обратить внимание, что эта Вселенная рухнула в 1980-х, и сейчас мы живем в совсем непохожей Вселенной. Прежде чем рассказывать о правильной современной Вселенной необходимо понять, почему рухнула прошлая.

Забегая вперед скажем, что Вселенная заполнена такими субстанциями как темная энергия или темная материя, и до сих пор неизвестно, что это такое, но точно знаем, что без этих субстанций (а они дают 95% всей энергии массы Вселенной) не было бы ни Вселенной, ни нас самих. Одна из целей лекций – разобраться, почему без темной энергии и темной материи невозможно обойтись в современной физике/астрофизике.

Согласно современной картине мира (современной теории образования Вселенной) именно таким является соотношения между той Вселенной, которую мы видим, и полной Вселенной, образовавшейся в результате Большого взрыва (рис. 1.1).

Рис. 1.1. Условное соотношения Вселенной, известной нам, и полной Вселенной, образованной в результате Большого взрыва.

Эта маленькая Вселенная представляет огромный мир, в котором живут миллиарды галактик, в каждой из которых – миллиарды звезд. Не существует ни одного наблюдательного факта, который бы показывал, что именно Земля является центром Вселенной: история науки развивалась таким образом, что впервые в центр Вселенной Солнце вернул Коперник. Как сейчас выясняется, еще в Древней Греции люди подозревали о том, что Земля – круглая, а Солнце расположено в центре; также на шумерских и аккадских глиняных табличках находят начертания вполне современного строения Вселенной. Так, в следующих лекциях нам предстоит разобраться в том, что такой Большой взрыв и почему Вселенная стала расширяться (стоит отметить, что это до конца неизвестно, хоть сейчас и распространена т.н. инфляционная теория модели Вселенной, объясняющая причины размера Вселенной и ее разгона). Когда-то во Вселенной отсутствовали объекты, это видно на рис. 1.2. и ее заполняло почти однородное холодное вещество (по химическому составу оно представляло водород (75%) и гелий (25%), – они возникли в результате Большого взрыва). Первые объекты,

появившиеся во Вселенной, – сверхскопления галактик. Внутри скопления начинают кристаллизоваться сами галактики, возникает т.н. крупномасштабная структура Вселенной, и постепенно возникают галактики.

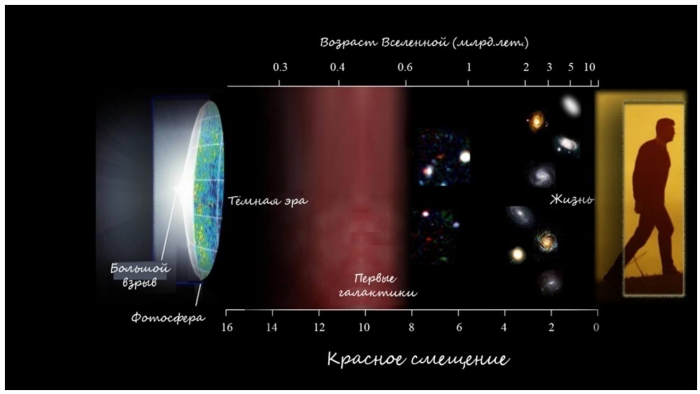


Рис. 1.2. Вопросы, с которыми предстоит разобраться в ходе курса.

Скорость света. Эксперимент Рёмера

Очевидно, что объем, находящийся вокруг нас (Вселенная), должен характеризоваться некими свойствами. Одно из важнейших – скорость распространения информации.

Любое действие не может распространяться во Вселенной со скоростью, большей скорости света. Впервые скорость света была обнаружена в 1676 году Оле Ремером. Он наблюдал моменты затмений спутника Юпитера – Ио – при положениях Земли на орбите в точках F, G, L, K, H (рис. 1.3).

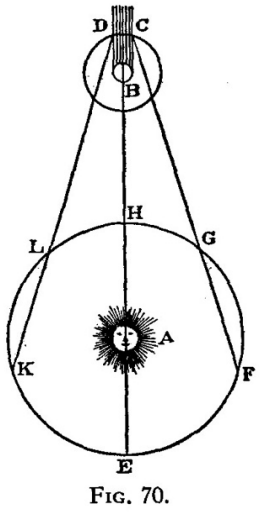


FIG. 70.

Рис. 1.3. Рисунок из статьи Рёмера 1676 г.

Период обращения Ио: 42,5 ч. Затмения и выходы из затмений происходят каждые сутки и 19 часов.

$$c = 300\,000 \text{ км/с} \tag{1.1}$$

Так, Ремер открыл первую фундаментальную величину Вселенной.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

Мнимые числа. Кардано. Эйлер

Физика – наука, занимающаяся реальной Вселенной/природой/миром, и пытающаяся объяснить их с помощью фундаментальных законов, а эти законы формулируются с помощью математического языка. Раньше всего появились натуральные числа.

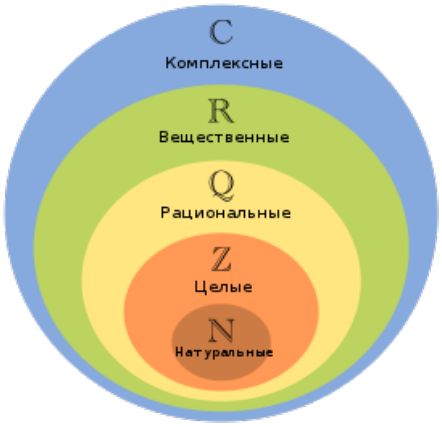


Рис. 1.4. Иерархия чисел.

В своей книге 1545 г. «Великое искусство, или об алгебраических правилах» Джероламо Кардано описал числа, квадрат которых меньше нуля:

$$i^2 = -1 \tag{1.2}$$

Эйлер впоследствии вывел формулу, описывающую мнимые числа:

$$re^{i\varphi} = r(\cos\varphi + i\sin\varphi), e \approx 2{,}71828 = 2{,}7 \text{ (часто } \ldots = 3)$$

Пусть $r = 1, \varphi = \pi \approx 3{,}14 = 3$. Тогда

$$e^{i\pi} = -1 \tag{1.3}$$

Эйлер впервые оценил необходимость комплексных чисел и сделал геометрическую интерпретацию числа i, квадрат которого и равен (1.2):

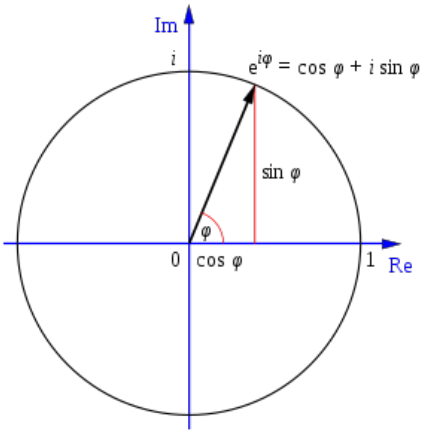


Рис. 1.5. Геометрическая интерпретация формулы (1.2).

Тождество Эйлера:

$$e^{i\pi} + 1 = 0 \tag{1.4}$$

Эта формула связывает пять фундаментальных констант математики.

$$e^{i\varphi} = \cos\varphi + i\sin\varphi \quad (1.5)$$

$$\Longrightarrow e^{it} = \cos t + i\sin t \quad (1.6)$$

Так, мнимые числа компактно описывают волновые процессы вокруг нас (звуковые волны, волны закатов и рассветов, – периодический процесс, связанный с вращением Земли вокруг оси, – и т.д.)

Время - мнимое пространство

Аксиоматика теории относительности возникла после 1905 года, когда Альберт Эйнштейн предложил Специальную Теорию Относительности. До Эйнштейна в мире были две координаты: x, t. Так, представим, что некий объект движется из Москвы в Санкт-Петербург, но, в то время как он движется по оси x, одновременно с этим движется время. Так, время правильно называть мнимым пространством, – это впервые придумал Минковский, учитель Эйнштейна.

Пространство-время Минковского

Оказывается, что расстояние в этом пространстве-времени (пространство-время Минковского) – есть сумма квадратов катетов. Представим, что у Ньютона были события А и Б (рис. 1.6):

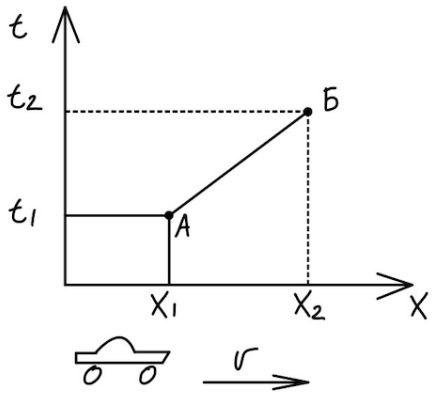


Рис. 1.6. Графическое изображение рассматриваемого случая.

Согласно Ньютону, во всех системах отсчета, как бы мы ни двигались мимо этих событий, расстояние между точками никак не меняется, в то время как в пространстве Миньковского и теории Эйнштейна — это не так:

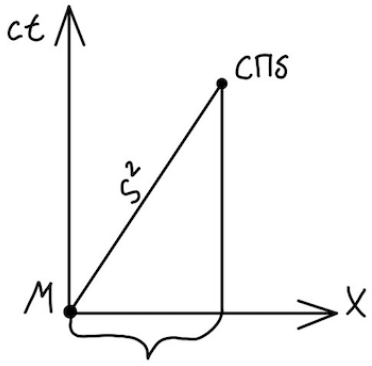


Рис. 1.7. Графическое изображение пространство-времени Минковского.

$$S^2 = x^2 + (ict)^2 = x^2 - (ct)^2 \quad (1.7)$$

Неизменность интервала - постулат Специальной Теории Относительности

Эйнштейн ввел Абсолют (объединил пространство и время и рассказал, что расстояния в этом пространстве никак не меняются): неизменность интервала – постулат СТО = Теории Абсолюта.

$$S^2 = -c^2t^2 + x^2 = const \quad (1.8)$$

Это утверждение оказалось идентичным утверждению о том, что скорость света является фундаментальной константой нашего мира:

$$c = const \quad (1.9)$$

Так, мы выяснили, что в мире существует важнейшая фундаментальная константа, не зависящая от системы отсчета, задающая скорость распространения информации.

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ
ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Лекция 2. Цветная Вселенная

Теория Ньютона. Цветные корпускулы

Мы пытаемся описать Вселенную в больших масштабах и понять, какие характеристики в больших масштабах ее описывают. На первой лекции мы обсудили важнейшую характеристику – скорость света (в своих экспериментах Ремер наблюдал затмение Юпитера и заметил, что затмения – есть процесс периодический).

Рассмотрим, почему наша Вселенная – цветная. Тело или предмет не имеет, но отбрасывает тот цвет, которым наделено. Почему это происходит? Над природой света еще в 18 в. задумался Ньютон и предположил, что свет – набор неких частичек, движущихся с большой скоростью и приобретающих белый цвет при смешении. В то же время, при использовании специальных приборов, например призмы, поток частиц можно раздробить на несколько ручейков, и каждый обретет свой цвет. Эта теория называется корпускулярной теорией света/цвета.

Волновая теория Гюйгенса и Френеля

В дальнейшем Френель и Гюйгенс возразили Ньютону и построили альтернативную модель – волновую модель света. Рассмотрим, чем корпускулы отличаются от волн. Представим море и загородки, установленные для предотвращения разрушения берега. Каждый проход между загородками является источником сферической волны. Наблюдая за этим явлением, Гюйгенс заключил принцип, что волны огибают твердые препятствия – нельзя ли подумать, что свет – есть волна, которая может обойти экран. Так, Гюйгенс и Френель придумали, как посчитать, что же происходит с волной после прохождения препятствия.

Пятно Пуассона

В начале первой половину 19 в. для того, чтобы доказать несостоятельность теории Гюйгенса и Френеля Пуассон провел эксперимент с шляпой, поставив ее в темном амбаре поперек луча света так, чтобы она была препятствием на пути волновой интерпретации света. Если свет – это корпускулы, то за шляпой возникнет темный круг (тень), если же волна – то каждая точка края шляпы будет огибаться, а волны будут сходиться в центре симметрии (рис. 2.1), что в действительности и оказалось. Пуассону пришлось признать состоятельность теории о том, что свет – есть волна.

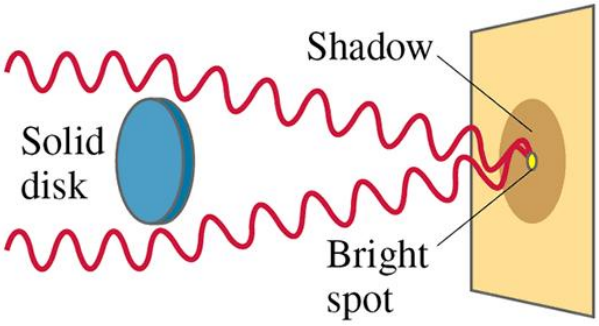


Рис. 2.1. Графическое изображение рассматриваемого случая.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

Аналогичный современный опыт – интерференционная картина для монетки, расположенной на расстоянии в 62 м. (подробно этот опыт описывается в фильме, который можно найти на ютьюбе).

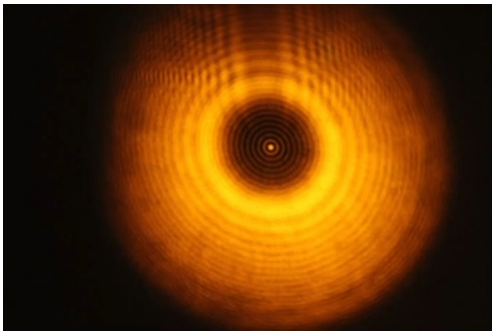


Рис. 2.2. Тень от монеты в €2 на расстоянии в 62 м.

Свет - волна!

Выведем формулу эффекта Доплера-Физо: представим, что есть некий источник света – радист, передающий сигнал с неким постоянным периодом $P_и$. Тогда длина волны будет находиться следующим выражением:

$$P_u v = \lambda \tag{2.1}$$

Период, который войдет в приемник:

$$P_п = P_и - \frac{v P_и}{c} \tag{2.2}$$

$$\Delta P = P_п - P_и = -\frac{v}{c} P_и \tag{2.3}$$

$$\Delta P = \frac{v}{c} P_0 \tag{2.4}$$

$$\frac{\Delta P}{P} = -\frac{v}{c} \tag{2.5}$$

Так, период колебаний неподвижному наблюдателю будет казаться меньше, если источник колебаний движется на нас и наоборот. Частота колебаний:

$$\nu = \frac{1}{p} \tag{2.6}$$

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{v}{c} \tag{2.7}$$

Длина волны:

$$\lambda = cP = \frac{c}{\nu} \tag{2.8}$$

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \tag{2.9}$$

Когда источник удаляется от приемника– длина волны увеличивается, а по опытам Гюйгенса мы понимает, что разные цвета волны связаны не с разными частицами, а с разной длиной волн, например, красного и синего цвета. Так, когда источник удаляется – предмет краснеет, а когда приближается – испытывает фиолетовое смещение.

Если найти отличия в длине волны между испущенной и принятой, то можно найти скорость света.

Спектральные классы звезд

В 19 веке призму, с которой Ньютон разлагал свет на радужные цвета, поставили на пути света, прошедшего телескоп. При детальном рассмотрении оказалось, что радужная полоска пересекается некими темными линиями, напоминающими штрих код.

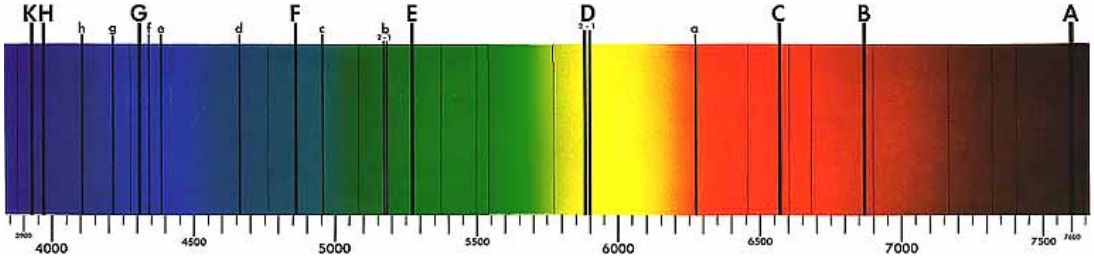


Рис. 2.3. Фраунгоферовы линии.

Так, каждый химический элемент во Вселенной имеет уникальный штрих код. Штрих код в спектре означает определенную линию с определенной длиной волны.

$$\lambda = \text{Å} = 10^{-8}\ \text{см} \tag{2.10}$$

Самые яркие линии на рис (2.3) принадлежат кальцию. Также оказалось, что у каждого спектрального класса оказался свой специфический спектр, и одни звезды состоят из водорода, другие из кальция и т.д.

$$O\ \ B\ \ A\ \ F\ \ G\ \ K\ \ M$$

Так, звезды оказались разного цвета и состава, что на самом деле совершенно неверно. Когда люди научились расшифровывать спектры – они поняли, что в среднем химический состав звезд примерно одинаковый и соответствует следующему распределению:

- Водород: 75%
- Гелий: 23%
- Тяжелые элементы: 2%

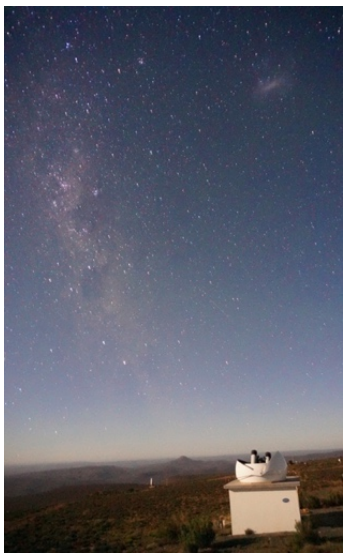


Рис. 2.4. Русский телескоп-робот МАСТЕР в Южной Африке МГУ.

Химия Вселенной

В результате исследования звезд по химическому составу оказалось, что кальция на Солнце очень мало, а его яркость обуславливалась тем, что при 6000° он наиболее удачно поглощает свет.

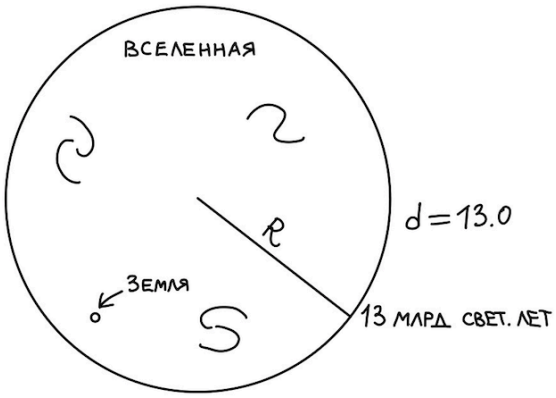
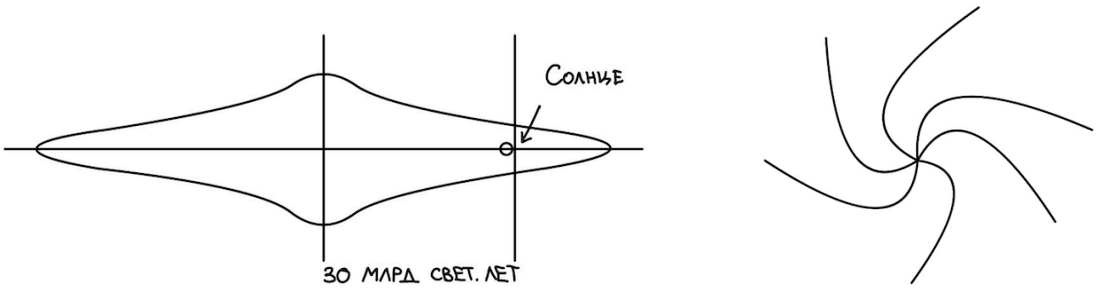


Рис. 2.5. Планета Земля относительно нашей Вселенной.

Важно понимать, что звезды не «бродят» по Вселенной, а разбросаны по т.н. городам. На рис. (2.4) можно заметить млечный путь – это есть некая дорожка, проекция дискообразной галактики. Если же посмотреть на нее сверху – это будет галактика, состоящая из спиралей.



а б

Рис. 2.6. Млечный путь а) вид сбоку б) вид сверху.

В каждой галактике примерно 10^{11} звезд. Звезда (солнце) имеет массу $4 * 10^{33}$ г. Разделим эту массу на массу атома и узнаем, сколько атомов в звезде:

$$\frac{4*10^{33}\text{ г}}{m_p} = \frac{4*10^{33}\text{ г}}{10^{-24}\text{ г}} = 10^{58}\text{ атомов} \quad (2.11)$$

Докажем, что Солнце состоит из атомов. Для того, чтобы определить, из чего сделана звезда, необходимо измерить свойства «кирпичиков», из которых состоит эта звезда. Так, полная плотность Солнца:

$$4 * \frac{10^{33}}{V} = 1\text{ г/см}^3 \quad (2.12)$$

Подсчитаем плотность атома водорода. Его размер: 10^{-8} см, тогда

$$\frac{10^{-24}\text{ г}}{(10^{-8})^3} = \frac{10^{-24}\text{ г}}{10^{-24}\text{ см}^3} = 1\text{ г/см}^3 \quad (2.13)$$

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

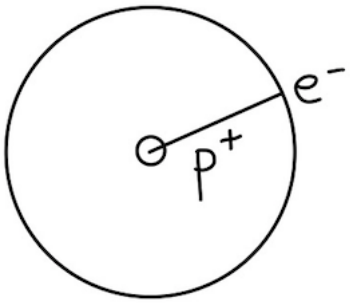


Рис. 2.7. Атом водорода.

Посчитаем плотность Вселенной и узнаем, из чего она состоит:

$$10^{11} * 4 * 10^{33} * 10^{10} = 4 * 10^{54} \text{ г} \quad (2.14)$$

$$\rho_{\text{вселенной}} = \frac{4*10^{54} \text{ г}}{V} = \frac{4*10^{54} \text{ г}}{(10^{10}*3*10^{10})^3} = \frac{4*10^{54} \text{ г}}{10^{84} \text{ см}^3} = 10^{-30} \text{ г/см}^3 \quad (2.15)$$

Так, мы нашли среднюю плотность Вселенной (или среднюю плотность вещества, которое светит, то есть, звезд). Поэтому это значение также называют плотностью светящегося вещества. Очевидно, что Вселенная не состоит из атомов. Так, всего во Вселенной:

- Галактик: 10^{10}
- Звезд: 10^{22}
- Атомов: 10^{80}

Учитывая объем мозга человека, найдем, сколько атомов в этой Вселенной думают об ее устройстве (найдем количество частиц в голове думающих астрономов):

$$\left(\frac{10^3}{10^{-24}} \approx 10^{27}\right) * 1000 = 10^{30} \quad (2.16)$$

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Лекция 3. Закон Хаббла

Повторение предыдущих лекций

Почти все изображения звездного неба, которые будут встречаться нам в ходе лекций, были получены в глобальной сети МАСТЕР МГУ.

Рис. 3.1. Географическое расположение телескопов МАСТЕР МГУ.

На прошлой лекции мы определили, что свет – это волны, что цвет света зависит от длины волны, и что Вселенная похожа на супермаркет, где у каждой звезды есть некий спектр, похожий на штрих код. Так, сняв спектральный класс звезды, ее очень трудно перепутать с любой другой.

Рис. 3.2. Классификация звезд женской бригадой под руководством Эдуарда Пикеринга (Гарвардская классификация звезд).

Весто Слайфер – стахановец

В 1901 году Весто Слайфер окончил университет Индианы сразу по двум специальностям – астрономии и математике, и стал изучать спектры планет в обсерватории Персиваля Лоуэлла. Важно знать, то у всех телескопов 20 в. рядом всегда была труба той же длины – она называлась гидом. Слайфер снимал на фотопластинки не просто звездное небо, а спектры, а значит яркость в каждом участке фотографии резко падала, и приходилось получать спектры на протяжение всей ночи.

Рис. 3.3. Телескоп в обсерватории Персиваля Лоуэлла.

Туманности

Какая Слайферу была поставлена задача: еще в 18-19 в. Месье заметил, что кроме звезд на небе также расположены туманные пятна, но что это такое – никто не понимал – поэтому Слайферу предстояло снимать спектры (штрих коды) и выяснить, что это такое.

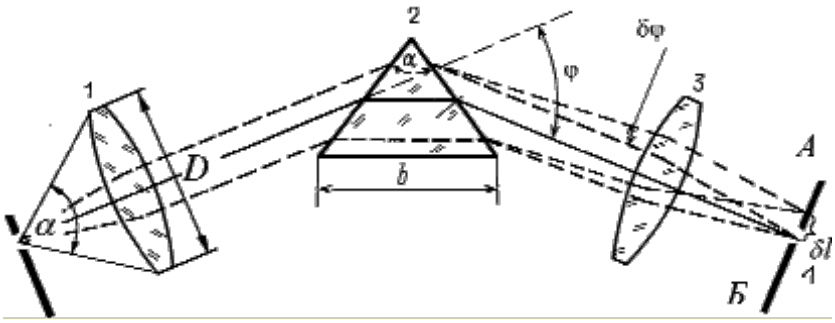


Рис. 3.4. Схема призменного спектрографа.

В начале декабря 1912 г. Слайфер снял фотопластинку со спектром Андромеды с экспозицией 13,5 часов. Из снимка следовало, что туманность состоит из звезд.

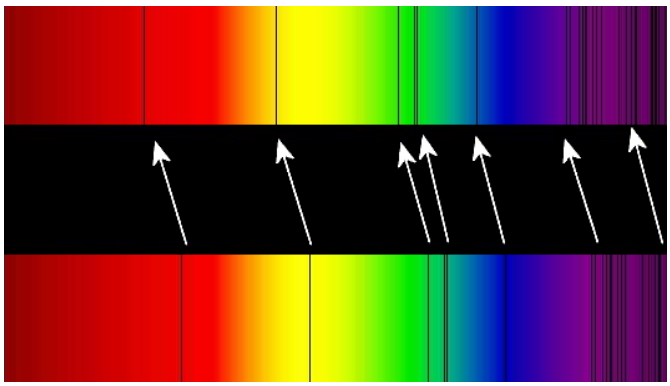
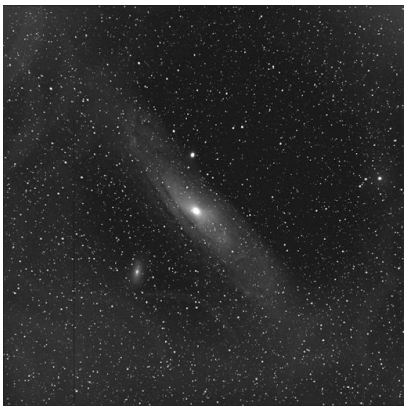


Рис. 3.5. Лабораторные линии и линии галактики.

Мы знаем, что у звезд есть линии: на рис. 3.6 видно, что линии галактики сдвинуты относительно лабораторных – впервые это было обнаружено Слайфером.



]Рис. 3.6. Туманность Андромеды. Снимок телескопа-робота МАСТЕР-Урал Коуровская обсерватория. 3 минуты.

Уже более современное доказательство того, что Андромеда – звездный дом.

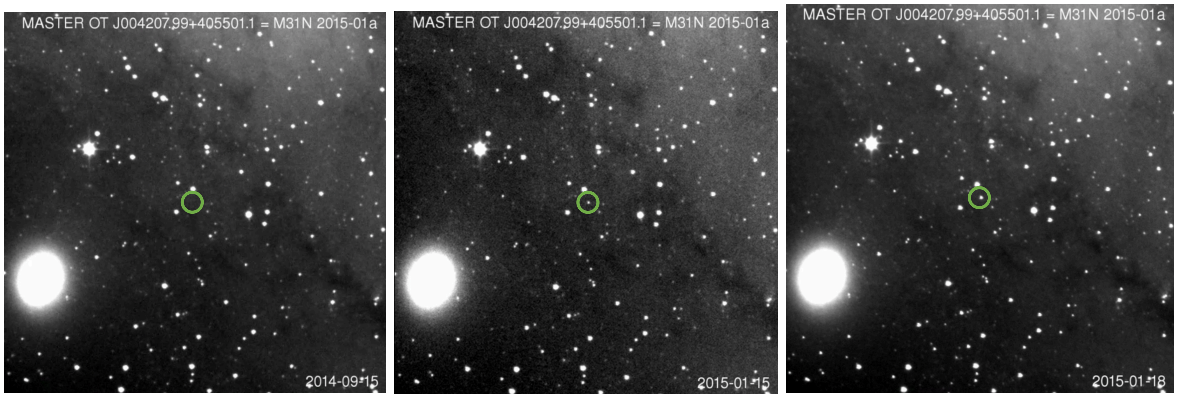


Рис. 3.7. Новая звезда в галактике Андромеда: снимок, сделанный телескопом-роботом МГУ МАСТЕР-Кисловодск.

Открытие разбегания галактик

Слайфер также обнаружил, что линии сдвигаются тем сильнее, чем больше длина волны. Более того, линии сдвинуты не в красную сторону, а в фиолетовую.

$$\Delta\lambda = \lambda_{\text{П}} - \lambda_{\text{И}} \sim \lambda_{\text{И}} \Longrightarrow \text{эффект Доплера} - \text{Физо} \tag{3.1}$$

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \tag{3.2}$$

$$V = -300 \text{ км/с} \tag{3.3}$$

Так, Слайфером были сделаны два важных открытия:

1. Спектр туманностей оказался похож на звездный – т.е. туманности – это скопления звезд (галактики).
2. Большинство галактик «убегают» от нас – Вселенная расширяется.

Тем не менее, сам факт того, что Вселенная расширяется, не произвел никакого впечатления на больших физиков. Кроме того, открытие, по какому закону галактики разбегаются, Слайфер не сделал.

Стандартная свеча

Одна из девушек из женской бригады под руководством Эдуарда Пикеринга – Гениретта Ливитт – сделала важное открытие, которое позволило определять расстояния внутри и до других галактик. Она увидела, что звезды типа Дельта Цефея «прыгают» с периодом в 10 дней, тем самым обнаружив переменные звезды и стандартную свечу (измерив видимую яркость стандартных свеч-астрономических объектов, принадлежащих определенному классу с известной светимостью, можно посчитать расстояние до них). Генриетта обнаружила, что, чем больше период «прыжка», тем больше мощность звезды.

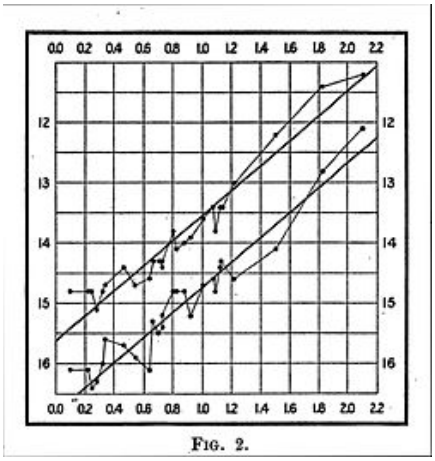


Рис.3.8. Измерения, выполненные Генриеттой Ливитт: горизонтальная ось - логарифм периода соответствующей цефеиды, а вертикальная ось - ее величина. Проведенные линии соединяют точки, соответствующие минимальной и максимальной яркости звезд соответственно.

Так, светимость (мощность) равна произведению потока на площадь:

$$L = F4\pi R^2 \tag{3.4}$$

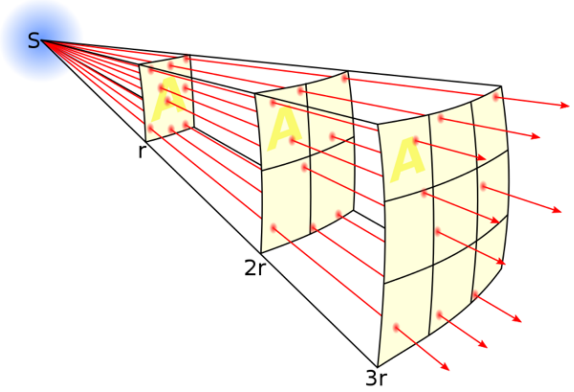


Рис. 3. 9. Закон обратных квадратов.

Закон Хаббла

Впервые закон, описывающих расширение Вселенной, вывел Хаббл, недавно международный космический союз решил изменить название закона и также добавить

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

фамилию аббата Леметра. Хаббл определил, что, чем дальше галактика, тем с большей скоростью она убегает.

$$V = HR \tag{3.5}$$

Вселенная как мыльный пузырь

В 30-х годах прошлого века было придумано явление «плоскатик». Представим, что наша Вселенная двумерна: представим мыльный пузырь (это пригодится при рассмотрении теории инфляции), на котором живут люди – плоскатики (так как они могут двигаться только направо-налево). Если пузырь надувать, то плоскатики, находясь на этом пузыре, будут видеть, что их Вселенная расширяется. Предположим, что шарик идеально круглый (изотропен и однороден), а угол между галактиками А и Б равен α.

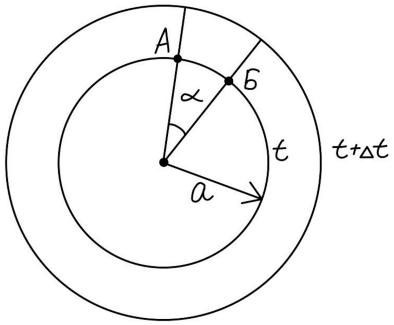


Рис. 3. 10. Графическое изображение рассматриваемого случая.

$$R_{АБ}(t) = \alpha a \tag{3.6}$$

$$R'_{АБ}(t + \Delta t) = \alpha a' \tag{3.7}$$

Тогда скорость, с которой будет двигаться одна галактика относительно другой:

$$v = \frac{R'_{АБ} - R_{АБ}}{\Delta t} = \frac{(a' - a)\alpha}{\Delta t} = \frac{\Delta a}{\Delta t}\alpha \tag{3.8}$$

$$\alpha = \frac{R}{a} \Longrightarrow v = \frac{\frac{\Delta a}{\Delta t}}{a} R \tag{3.9}$$

$$H \equiv \frac{\frac{\Delta a}{\Delta t}}{a} \equiv \frac{\dot{a}}{a}, \qquad \dot{a} \neq const, \tag{3.10}$$

где $\frac{\Delta a}{\Delta t}$ – скорость надувания пузыря. Так, при надувании однородной изотропной Вселенной, гладкой и идеально круглой как мыльный пузырь, на поверхности этого пузыря выполняется закон Хаббла.

Фундаментальное время Вселенной

Советский физик Яков Борисович Зельдович говорил: «всегда старайтесь решить задачу разными путями - только тогда вы правильно представите это явление». Чем больше путей вы пройдете – тем лучше поймете этот опыт. Так, если в прошлый раз Вселенная была схожа с супермаркетом (штрих коды и спектры звезд как ключ к понимаю химии Вселенной), то сейчас мы рассматриваем ее с позиции мыльного пузыря (ключ к пониманию динамики Вселенной).

$$v = HR \tag{3.11}$$

Представим, что в некотором месте были подорваны яркие пороховые огни (салют). Через некоторое время разлетается шар, и некоторым прибором измеряется скорость

летящих брызг – они родились мгновенно/одновременно, но находятся на разном расстоянии от центра. С какой скоростью разные брызги движутся от центра? Этому отвечает закон взрыва, похожий на закон Хаббла:

$$t_{\text{от взрыва}} = \frac{R}{v} = \frac{1}{H} \tag{3.12}$$

Взрыв войдет в теорию образования Вселенной – модель Большого взрыва, – она возникла благодаря Слайферу и Хабблу, а сам термин «Большой взрыв» был придуман Фредом Хойлом.

Представим, что в нашей Вселенной галактики разлетаются следующим образом (рис. 3.12), причем чем дальше – тем больше вектор, а движение равномерно, то возраст Вселенной:

$$T_{\text{вселенной}} = \frac{1}{H_0} = 14 \text{ млрд лет} \tag{3.13}$$

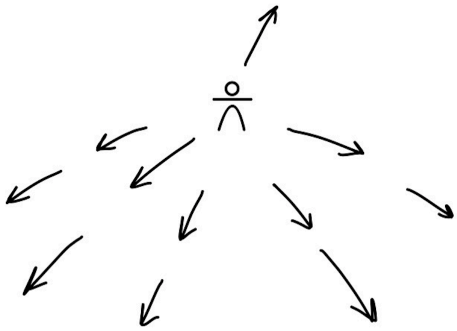


Рис. 3.11. Графическое изображение рассматриваемого случая.

$$H_0 \approx 70 \text{ км/с/Мпс}, \tag{3.14}$$

где Мпс $= 10^6$ парсек.

$$1 \text{ парсек} \approx 3{,}26 \text{ световых года}$$

$$H(t) = \frac{R}{V} - \text{время} \tag{3.15}$$

Уже в 1929 году были получены первые геологические данные по углеродному распаду и обнаружена радиоактивность. И уже в то время

$$T_{\text{ё}} > T_{\text{вселенной}}, \tag{3.16}$$

что является парадоксом. Ранее мы говорили о взрыве, повлекшем разлет осколков с постоянной скоростью – это возможно в «пустой Вселенной» Милна: Вселенной без гравитации, где $v = const$. Тогда

$$T_{\text{вселенной}}(\text{Милн}) = \frac{1}{H_0} \tag{3.17}$$

Так, мы выяснили, что:

1. С одной стороны, есть фундаментальная скорость света:

$$c = 300000 \text{ км/с} \tag{3.18}$$

2. Во Вселенной появилась новая константа:

$$\frac{1}{H_0} \approx 14 \text{ млрд лет} \tag{3.19}$$

3. Примерно 14 миллиардов лет назад Вселенной не было.

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Лекция 4. Вселенная как ракета

Введение

Задача этой лекции – рассмотреть Вселенную в качестве ракеты: некого объекта, запускаемого с земли и улетающего на расстояние, зависимое от скорости, получаемой при старте. Так как мы не может обойти закон всемирного тяготения, у нас появится еще одна фундаментальная постоянная – постоянная тяготения.

Три закона Кеплера

Тихо Браге, европейский астроном, годами исследовал планеты, в частности, Марс. Записи наблюдений за планетой попали в руки к Кеплеру, которые он принялся анализировать. Как мы знаем, до Коперника была распространена геоцентрическая система (с Землей в центре), но при этом возникала проблема: многие планеты двигались прямо по небу, а затем останавливались и двигались обратно. На самом деле этой было связано с тем, что они двигались не вокруг Земли, а вокруг Солнца, но люди изобрели специальную теорию эпициклов и дифферентов для разрешения проблемы. Так, считалось, что планеты не только движутся вокруг Земли, но и вращаются вокруг своей оси.

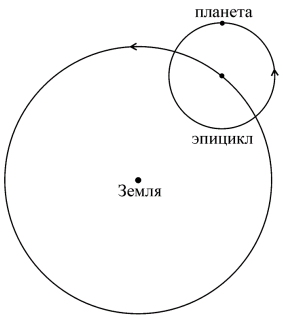


Рис. 4.1. Графическое изображение рассматриваемого случая вращения планет вокруг Земли.

С этим разобрался Коперник и поставил Солнце в центр. А Кеплер, проанализировав данные Браге, вывел три закона:

1. Все планеты движутся по эллипсам, где эллипс – такое геометрическое место точек, сумма расстояний которых от двух других, все время постоянна.

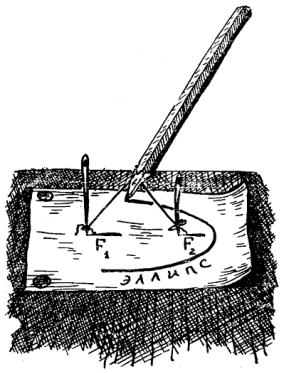


Рис. 4.2. Графическое изображение первого закона Кеплера.

2. За равные промежутки времени ($t_2 - t_1 = t_4 - t_3$) радиус-вектор планеты описывает равновеликие площади. Чем дальше планета, тем медленнее она двигается.

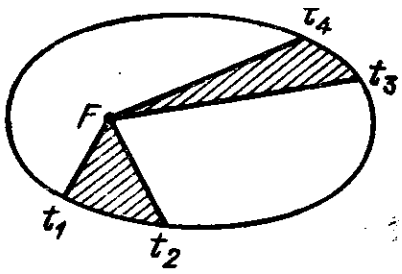


Рис. 4.3. Графическое изображение второго закона Кеплера.

3. Отношение полуосей эллипса в кубе любых двух планет равно отношению квадратов периодов обращения вокруг Солнца:

$$\frac{R_1^3}{R_2^3} = \frac{T_1^2}{T_2^2} \tag{4.1}$$

Закон всемирного тяготения. Ньютон или Гук?

Запишем третий закон Кеплера в виде пропорциональности:

$$R^3 - T^2 \tag{4.2}$$

Разделим левую и правую части на квадрат периода и на радиус в квадрате:

$$\frac{\left(\frac{R}{T}\right)^2}{R} - \frac{1}{R^2} \tag{4.3}$$

Но $\frac{2\pi R}{T} = v$ – скорость движения по окружности $\frac{V^2}{R} - \frac{1}{R^2}$. Так, из закона Кеплера, зная ускорение, можно вывести, как сила тяготения зависит от расстояния. Закон Гука:

$$F = -kx \tag{4.4}$$

$$F = ma - \frac{V^2}{R} - \frac{1}{R^2} \tag{4.5}$$

Допустим есть две точечных массы, находящихся на расстоянии R, то они будут притягиваться по закону, выведенному Ньютоном (закон всемирного тяготения):

$$F = \frac{FM_1M_2}{R^2}, \tag{4.5}$$

где G – постоянная тяготения.

$$\frac{1}{G} \approx 1{,}5 * 10^7 \text{ г с}^2/\text{см}^3 \tag{4.6}$$

Второй закон Ньютона:

$$F = m_и a,\ a = \frac{F}{m_и} \tag{4.7}$$

$$F = \frac{Gm_г M_{Земли}}{R^2} \tag{4.8}$$

$$m_и a = m_г g \tag{4.9}$$

Но т.к. а $= g$, то

$$m_{инерции} = m_{гравитации} \tag{4.10}$$

Вселенная как космическая ракета

Формулу всемирного притяжения Ньютон получил из наблюдений луны и планет. Впервые всемирное тяготение преодолела ракета «Луна-1» в 1959 г. – это первая ракета, стартовавшая с второй космической скоростью с поверхности Земли. Вторую космическую скорость вывел Циолковский.

$$\mathrm{v}_{II} = \sqrt{\frac{2GM}{R_\oplus}} = 11{,}2 \text{ км/с},\ \mathrm{v}_{II} = H_0 R_\oplus \tag{4.11}$$

$$\frac{v^2}{2} = \frac{GM_\oplus}{R} \tag{4.12}$$

$$E_{\text{кин}} + U = 0 \tag{4.13}$$

$$v = \frac{GM}{R} \tag{4.14}$$

Вторая космическая скорость

Запишем выведенную Ньютоном формулу:

$$F = -\frac{GM_1M_2}{R^2} \tag{4.15}$$

Представим круглое тело: прорoем вертикальный туннель и бросим в него камень. Исходя из (4.15) кажется, что камень будет падать бесконечность, однако это не так. Ньютон рассмотрел следующую задачу: представим сферу конечной толщины.

Ньютон установил, что если поместить внутрь сферы маленькую массу, не влияющую на гравитацию, то на эту массу не будет действовать гравитационная сила. Так, теорема Ньютона звучит следующим образом: сила притяжения исчезает внутри сферы.

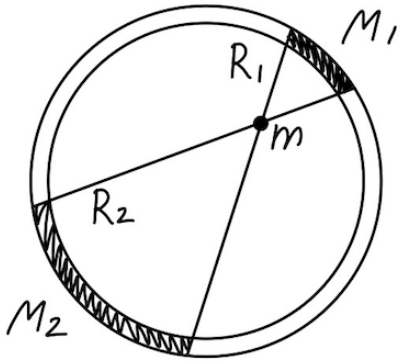


Рис. 4.4. Графическое рассматриваемого случая.

Для того, чтобы это доказать, проведем две линии. Тогда сила, с которой участок M_1 притягивает массу m пропорциональна массе этого участка и обратно пропорциональна квадрату расстояния:

$$F_1 \sim \frac{M_1}{R_1^2} \tag{4.16}$$

$$F_2 \sim \frac{M_2}{R_2^2} \tag{4.17}$$

$$M_1 \sim R_1^2,\ M_2 \sim R_2^2,\ M \sim R^2, \tag{4.18}$$

так как масса пропорциональна телесному углу, «обнимающему» данный сегмент.

$$F_1 = F_2 = const \tag{4.19}$$

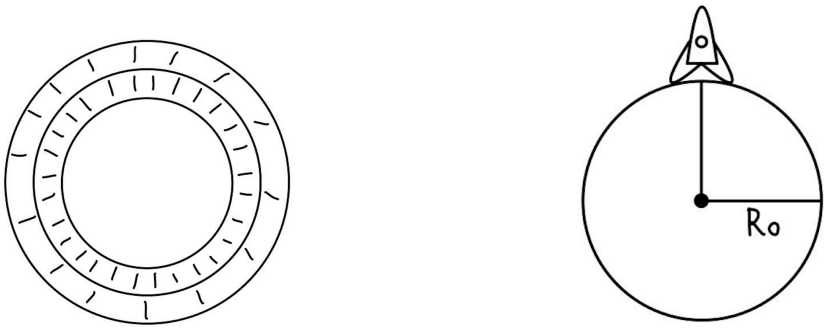
Критическая плотность

Мы выяснили, что во Вселенной справедлив закон Хаббла. Более того, рассматривая «плостатиков» на мыльном пузыре, мы выяснили, что при надувании этой абсолютно симметричной конструкции, то все предметы на поверхности шара будут «убегать» друг от друга по закону Хаббла: $v = HR$. Так, мы живем в однородной изотропной Вселенной.

Вырежем в ней шарик произвольного радиуса R_0. Нарисуем вокруг шарика круг чуть большего диаметра. Он, как и последующие круги не будут оказывать никакого влияния на (поскольку шарик очень маленький – кривизны пространства нет, а, согласно Ньютону, сила внешнего слоя не действует на внутренний). А значит исходный шарик расширяется, и к нему применимы все формулы ньютоновской механики. Следовательно,

$$v_0 = H_0 R_0 \tag{4.20}$$

Теперь можно задать вопрос (первый вопрос о судьбе Вселенной): что может происходить с этим шариком в пустоте? Для этого изобразим на вершине шарика ракету – она чувствует притяжение шарика, но, согласно Ньютону, все равно, в плотности шарик или в точке. Тогда задача превращается в старт ракеты с некоторого расстояния от центра шарообразного тела (задача о второй космической скорости).



а б

Рис.4.5. Графическое изображение рассматриваемого случая а) с начальными условиями б) с ракетой на вершине.

Если шарик (Вселенная) расширяется со скоростью большей, чем вторая космическая, то Вселенная никогда не вернется назад. Если Вселенная будет расширяться со скоростью меньшей, чем вторая космическая, то она «схлопнется» обратно. Только со скоростью равной второй космической Вселенная будет лететь бесконечно долго. Так, ответ на вопрос, что произойдет со Вселенной, будет зависеть от того, как скорость соотносится со второй космической скоростью:

$$v \lessgtr v_{II} \tag{4.21}$$

Следствие теоремы Ньютона можно сформулировать следующим образом: если вырезать в однородной Вселенной шарик, то внешние сферические слои можно отбросить, да так, что всю окружающую Вселенную можно выбросить. И судьба шарика окажется судьбой ракеты.

$$H_0 R_0 = \sqrt{\frac{2GM}{R_0}} \tag{4.22}$$

$$(H_0 R_0)^2 = \frac{2GM}{R_0} = \frac{2G\rho_0 \frac{4}{3}\pi R_0^3}{R_0},\ M = V_0\rho_0 \tag{4.23}$$

$$H_0^2 \rho_0^2 = \frac{8\pi}{3} G R_0^2 \rho_0 \tag{4.24}$$

$$\rho_0 = \rho_{cr} = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \approx 10^{-29}\ \text{г/см}^3 \tag{4.25}$$

Плотность Вселенной:

$$\Omega = \frac{\rho_0}{\rho_{\text{кр}}} = \frac{1}{30} \tag{4.26}$$

Вплоть до 1980 г. мы жили в следующей Вселенной:

$$\rho_0(\text{наблюдаемое}) \approx \frac{1}{30} * 10^{-29}\ \text{г/см}^3 \tag{4.27}$$

На рис. (4.6) можно увидеть ранее высказанные представления об эволюции Вселенной.

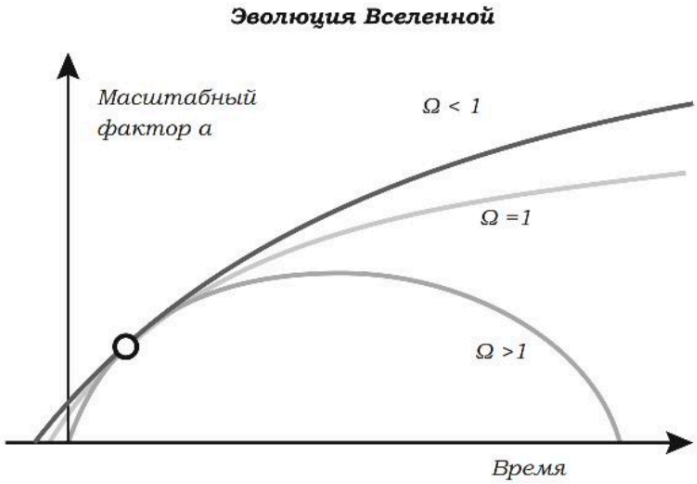


Рис. 4.6. Представление о «судьбе» «кеплеровской» Вселенной.

Лекция 5. Горячая Вселенная

Великая джаз-банда: Георгий Гамов

Под джаз-бандой принято понимать Дмитрия Иваненко, Льва Ландау и Георгия Гамова. – они в некотором смысле определили «лицо» нынешней Вселенной. Ландау стал нобелевский лауреатом, Гамов был обязан нобелевским лауреатом, Иваненко является автором работы, в которой впервые было сформулировано строение атомного ядра.

Рис. 5.1. Внизу двое в центре – Дмитрий Иваненко (Димус) и Лев Ландау (Дау). Слева вверху – Георгий Гамов (Джо). Остальные – члены физического кружка.

В 1953 г. в «Трудах Датской Королевской академии наук» была опубликована статья «Расширяющаяся Вселенная и образование галактик», в которой Джонни предсказал наличие во Вселенной еще одной компоненты кроме вещества – реликтового излучения – особого микроволнового излучения. В ходе этой лекции разберемся, как Гамов пришел к этому.

Три энергии и одно тепло

Мы уже знакомы с тремя видами энергии:

1. Кинетическая энергия: $K = \frac{mv^2}{2}$
2. Потенциальная энергия: Mgh
3. Внутренняя энергия: U

Один опыт позволяет связать эти энергии: возьмем поршень, газ. Если привести поршень в равновесие с газом, подставить горелку и начать нагревать, то поршень начнет подниматься и преодолевать гравитационное притяжение Земли. Когда мы подносим горелку, энергия увеличивается (так как мы подводим тепло ΔQ), а газ совершает работу. Наблюдая это явление, удалось сформулировать закон, который нельзя доказать (аксиому/начало).

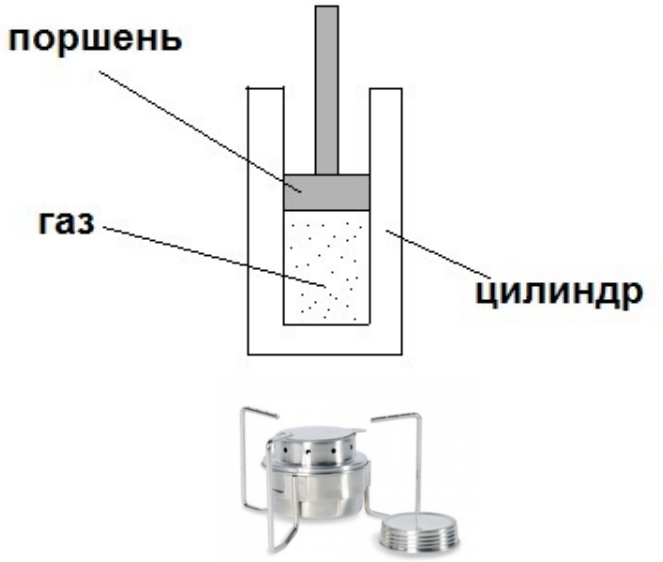


Рис. 5.2. Рассматриваемый опыт.

Первое начало термодинамики:

$$\Delta U = -A + \Delta Q \tag{5.1}$$

$$A = Fh = Psh = p\Delta V \Longrightarrow \tag{5.2}$$

$$\Delta U = -p\Delta V + \Delta Q \tag{5.3}$$

Вселенная как поршень

Если процессы идут медленнее, чем расширение Вселенной, то тепло сохраняется:

$$\Delta Q = 0 \tag{5.4}$$

Такое расширение поршня, при котором тепло не меняется, называется адиабатическим. Первое начало термодинамики упрощается:

$$\Delta U = -p\Delta V \tag{5.5}$$

Помимо начала термодинамика также имеет идеальный объект, который невозможно найти во Вселенной. Так, есть такое состояние, где устанавливается полное термодинамическое равновесие, в котором отсутствуют всякие потоки тепла. Абсолютно черное тело подразумевает, что

$$a = 0, \tag{5.6}$$

где a −альбедо. Тело поглощает $(1 - a)$. ЧТ излучения:

- Неполяризовано
- Универсальный спектр
- Изотропно

Установление термодинамического равновесия возможно с помощью термостата.

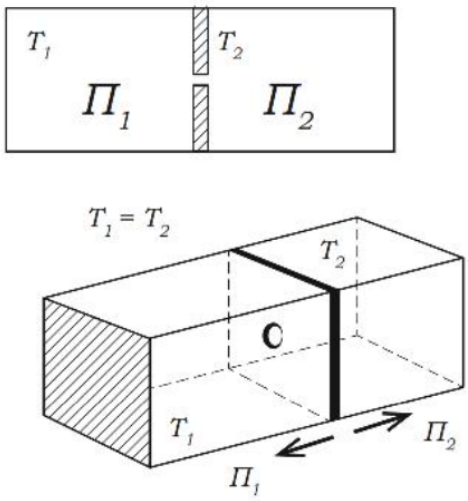


Рис. 5.3. Термостат.

Давление света и закон Стефана-Больцмана

Петр Лебедев первым обнаружил, что свет оказывает давление (теоретически это предсказывал и Максвелл, и Больцман), первым правильно поставил опыт и доказал, что фотоны давят на тела. Из теории можно вывести, что давление света равно

$$p = \frac{u}{3} \tag{5.7}$$

$$u = \frac{U}{V} - \text{плотность энергии} \tag{5.8}$$

Возьмем двухкамерный термостат, в одной половине – свет, в другой – идеальный газ. Подвигаем перегородкой и посмотрим, как изменится внутренняя энергия фотонного газа.

$$\Delta(U) = -\left(\frac{U}{3V}\right)\Delta V \Longrightarrow \tag{5.9}$$

$$U \sim \frac{1}{V^{1/3}} \tag{5.10}$$

Но $V \sim R^3$, значит

$$U \sim \frac{1}{R},\ T \sim \frac{1}{R} \tag{5.11}$$

Уравнение Менделеева-Клайперона:

$$U \sim T \tag{5.12}$$

Плотность энергии:

$$u \sim \frac{U}{V} \sim R^{-4} \tag{5.13}$$

Закон Стефана-Больцмана:

$$u \sim T^4 \tag{5.14}$$

Так, квантовая механика всегда подчиняется термодинамике. Так как Вселенная однородна и изотропна, рассматриваем ее как шарик. Сейчас мы выяснили, что если заполнить этот шарик фотонами, то плотность энергии излучения:

$$u_r = \frac{1}{R^4} \tag{5.15}$$

$$U_r = uV = \frac{1}{R} \tag{5.16}$$

Пусть во Вселенной, помимо фотонов есть обычное вещество. Его масса равна

$$M = \rho_m V \tag{5.17}$$

$$\rho_m = \frac{M}{V} \sim R^{-3},\ V = \frac{4}{3}\pi R^3 \tag{5.18}$$

Предсказание реликтового излучения

Вернемся к предсказанию, сделанному Георгием Гамовым в начале 50-х. Он заметил, что поскольку по закону Стефана-Больцмана плотность энергии чернотельного излучения:

$$u = aT^4, \tag{5.19}$$

то температура излучения во Вселенной меняется по следующему закону:

$$T \sim \frac{1}{R} \tag{5.20}$$

Так, если мы видим, что галактики и Вселенные разбегаются во все стороны, а раньше, наоборот были близки, и расстояния между телами-шариками уменьшалось, то температура во Вселенной стремилась к бесконечности:

$$R \to 0 \tag{5.21}$$

$$T \to \infty \tag{5.22}$$

Предположим, реликтовое излучение существует. Температура в прошлом:

$$T \sim \frac{1}{R} \to \infty \text{ при } R \to 0 \tag{5.23}$$

Но при температуре $10^{10}K$ протоны начнут объединяться в гелий:

$$^1H \to {}^4He \tag{5.24}$$

$$n + p \to D + v \tag{5.25}$$

$$D + D \to T + p \tag{5.26}$$

$$T + D \to {}^4He + n \tag{5.27}$$

Гамов предсказал, что температура

$$T_0 \approx 10\ {}^0K \tag{5.28}$$

Открытие реликтового излучения

В 1955 г. аспирант Пулковской обсерватории Тигран Шмаонов обнаружил излучение с температурой $T \approx 4\ {}^0K$. В 1965 г. радиоинженеры Роберт Уилсон и Арно Пензиас (нобелевские лауреаты), не имевшие понятия о горячей Вселенной, сообщают об открытии универсального чернотельного излучения, позже названного советским астрофизиком Иосифом Шкловским реликтовым.

$$\mathrm{T} = 2{,}7\ {}^0K \tag{5.29}$$

Радиационно-доминированная Вселенная

Поскольку плотность энергии фотонов растет назад, то неизбежно она достигнет плотности вещества:

$$U_r = aT^4 \tag{5.30}$$

$$a = 4\sigma/c = 7{,}5657 * 10^{-15}\ \text{эрг} * \text{см}^{-3} * K^{-4}, \tag{5.31}$$

– постоянная Стефана-Больцмана. Сейчас мы видим реликтовое излучение с температурой

$$T = 2{,}7^\circ K \tag{5.32}$$

$$n\left[\frac{1}{\text{см}^3}\right] \approx 400,\ [n_{cr}] \approx 10^{-5} \tag{5.33}$$

Частиц во Вселенной много меньше фотонов.

$$U \sim \frac{U}{h\nu} \sim \frac{at^4}{T} \sim T^3 \tag{5.34}$$

$$u_r \sim T^4 \sim \frac{1}{R^4} \tag{5.35}$$

$$U_m \sim \frac{M}{v} \sim \frac{1}{R^3} \tag{5.36}$$

Следовательно, если пойти назад, и Вселенные начнут «склопываться», то обязательно наступит такое время, когда

$$U_r = U_m = \rho_m c^2 \tag{5.37}$$

$$v \sim HR \sim (z+1),\ z \equiv \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \tag{5.38}$$

$$U_z \sim (1+z)^4,\ U_m \sim (1+z)^3,\ R = R_0(1+z) \tag{5.39}$$

$$a\big(2{,}7(1+z)\big)^4 = \rho_{cr} c^2 (1+z)^3 \tag{5.40}$$

$$z_r \approx 10000 \tag{5.41}$$

По закону Кеплера можно найти момент, когда энергия излучения стала сравнима с энергией материи:

$$\mathrm{t}_r = t_0 \left(\frac{R_r}{R_0}\right)^{3/2} \approx \frac{1}{H_0}(1+z)^{-\frac{3}{2}} \approx 10^{10}\ \text{лет}/10^6 \approx 10^4\ \text{лет} \tag{5.42}$$

Почему Вселенная называется горячей?

Помимо того, что только в горячей Вселенной можно было сварить гелий, есть еще одна причина, почему Вселенную называют горячей. В начале 60-х голов, за несколько лет до открытия реликтового излучения, Зельдович публикует статью: «холодная модель Вселенной». Его модель рухнула уже через год, оттого что в ней не было реликтового излучения (на тот момент еще не открытого).

Итак, температура фотонного газа во Вселенной:

$$T \sim \frac{1}{R},\ \lambda \sim R \tag{5.43}$$

Эффект Доплера-Физо:

$$\lambda = \lambda_0(1+z) \tag{5.44}$$

$$T = T_0(1+z) \tag{5.45}$$

Пьяная Вселенная

Вспомним основную мета-идею, по которой мы движемся уже которую лекцию: мы пытаемся создать Вселенную, в которой можно родить галактику и жить. На прошлой лекции мы показали, что, когда во Вселенной нет ничего кроме материальных тел и универсального закона притяжения Ньютона, она сводится к старту ракеты с шара (движение в поле тяжести точечной/сферической массы). Однако, после Кеплера и Ньютона нам известно, что в поле тяготения движущейся массы все тела двигаются по законам Кеплера. Один из важнейших его законов:

$$\mathrm{R}^3 \sim t^2 \tag{5.46}$$

Тогда расширение Вселенной на рис. (5.5) описывается законом Кеплера.

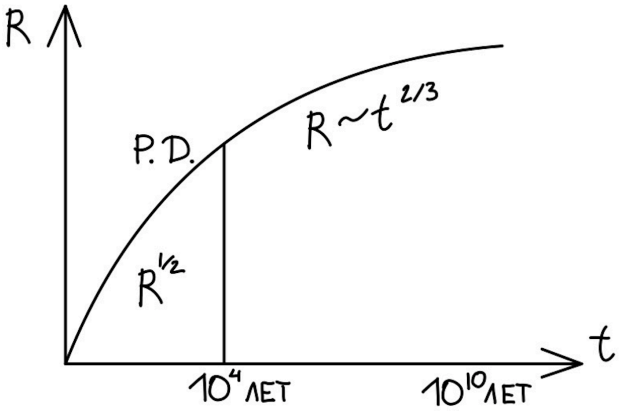


Рис. 5.4. Расширение Вселенной.

Продолжим рассматривать Вселенную в виде ракеты, а значит, использовать вторую космическую скорость:

$$\frac{V^2}{2} = \frac{GM}{R} \tag{5.47}$$

Но масса шарика меняется:

$$M \sim \frac{U_r}{c^2} \sim R^{-4} R^3 \sim \frac{1}{R} \tag{5.48}$$

Тогда во время радиационно-доминированной стадии (стадии пьяной Вселенной) скорость расширения шарика меняется по следующем закону:

$$v \sim \frac{1}{R} \tag{5.49}$$

Апория Пети: если скорость падает обратно-пропорционально пройденному пути, то путь пропорционален корню квадратному из времени. Доказательство:

$$\mathrm{R} \sim vt,\ t \sim \frac{R}{v} \sim R^2,\ R \sim \sqrt{t} \tag{5.50}$$

Почему же мы называем Вселенную пьяной? Рассмотрим следующую задачу: в абсолютно круглом сумрачном лесу заблудился нетрезвый Петя и очутился в самой середине. После столкновения с очередным деревом он забывал, куда шел, и случайным образом менял направление (т.н. гауссовский процесс). Среднее расстояние между деревьями: $d = 10$ м. Через какое время он выберется на опушку, если его скорость равна $v = 5$ км/ч, а расстояние до нее: $R = 100$ м?

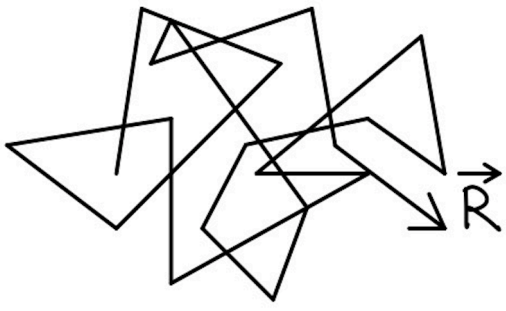


Рис. 5.5. Графическое изображение рассматриваемой задачи.

Опишем процесс следующим образом:

$$\vec{R} = \vec{R}_1 + \vec{R}_2 + \vec{R}_3 + \cdots + \vec{R}_N \tag{5.51}$$

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

Возведем в квадрат:

$$R^2 \approx Nd^2 \tag{5.52}$$

$$d = vt_{\text{ст}} \tag{5.53}$$

Число шагов:

$$N = \frac{R^2}{d^2} \tag{5.54}$$

$$t \approx Nt_{\text{ст}} = \frac{Nd}{v} = \frac{R^2}{vd} \tag{5.55}$$

$$t \approx 8{,}3 \text{ дня} \tag{5.56}$$

Так, пьяный человек идет по закону расширяющейся Вселенной.

Лекция 6. Образование объектов Вселенной

Вселенная как бочка меда

Эта лекция о том, как будут образовываться объекты во Вселенной, выстроенной нами за последние пять занятий. В целом, многое, что мы обсуждали, верно, и до 1980 года имело название стандартной фридмановской моделью Вселенной.

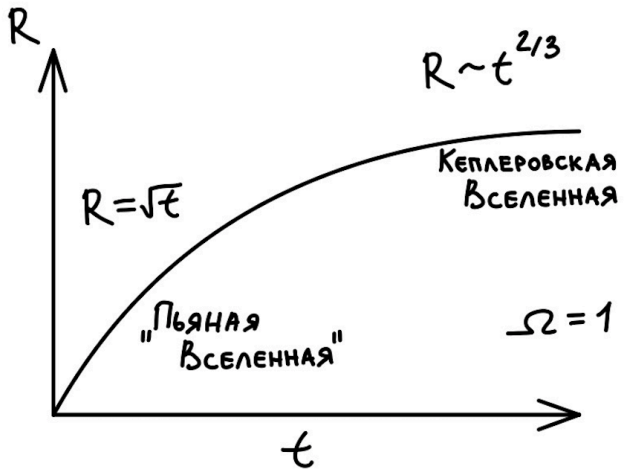


Рис. 6.1. Динамика расширения вселенной.

$$T = T_0(1+z) \sim \frac{1}{R} \tag{6.1}$$

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \tag{6.2}$$

На прошлой лекции мы выяснили, что наша Вселенная горячая. Это значит, что во Вселенной обнаружено изотропное однородное излучение (реликтовое излучение), и плотность энергии этого излучения растет

$$[U] = \frac{\text{эрг}}{\text{см}^3} = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \sim \frac{1}{R^4} \tag{6.3}$$

Этот закон предполагает, что при $R \to 0: U \to \infty$. Она определяет энергию Вселенной в некоторый момент – а этот момент имеет название радиационно-доминированной стадии (тогда меняется закон расширения, так как в расширении Вселенной принимает участие еще и газ, состоящий из фотонов). Такая Вселенная называется горячей или радиационно-доминированной. Еще одна важная величина. – температура. Температурой Вселенной будем называть температуру излучения. По закону Стефана-Больцмана,

$$U \sim T^4 \tag{6.4}$$

$$T \sim \frac{1}{R} \tag{6.5}$$

Кроме того, радиус Вселенной (радиус шарика) связан с красным смещением:

$$R = R_0(1+z)^{-1} \tag{6.6}$$

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

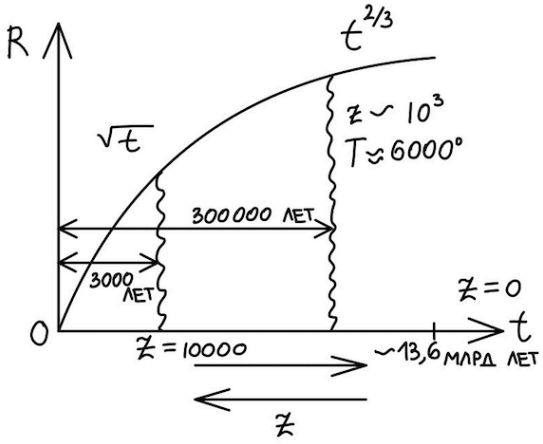


Рис. 6.2. Графическое изображение рассматриваемого случая.

$$T = T_0(1 + z) \tag{6.7}$$

$$z \equiv \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \tag{6.8}$$

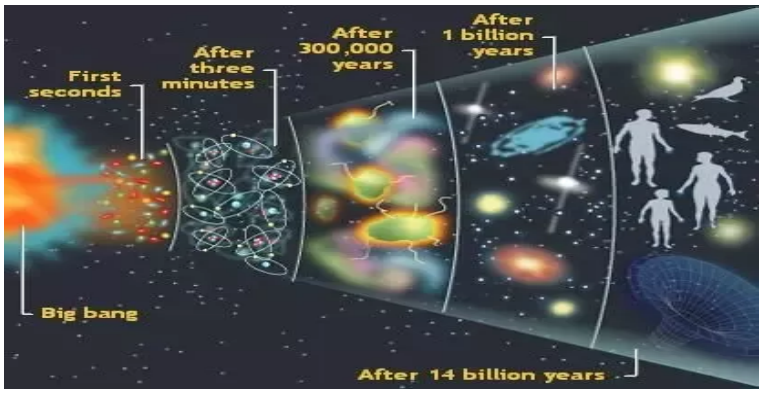


Рис. 6.3. Модель вселенной.

Также можно построить следующую модель вселенной (рис. 6.4), где красная граница – момент рекомбинации, когда электроны и протоны объединяются в нейтральный водород, и фотоны отрываются от плазмы. Если бы Вселенная не расширялась, то все небо было бы похоже на Солнце (температура красной поверхности: 6000°). Эту границу также можно назвать фотосферой.

Рис. 6.4. Модель Вселенной.

Так, Вселенная от Солнца отличается только тем, что последнее стоит на месте в гидростатическом равновесии, а Вселенная расширяется (так как 13 млрд. лет назад ее «пнули» с большой физической силой).

Звуковые волны

Главное, за что бьется человек в своей жизни – это внимание. А общается он, помимо прочего, посредством излучения звуковых волн (волны пучности и разрежения). Задача о звуковых волнах н физическом факультете решается на первом курсе: пишется уравнение, учитывающее давление сжатого газа, которых хочет разжаться, – но когда разжимается – то набегает следующее слово, и газ снова сжимается. Так появляются звуковые колебания. Задача о звуковых волнах имеет следующий ответ: если ударить по камертону, то пойдет одинокая синусоидальная волна с определенной частотой.

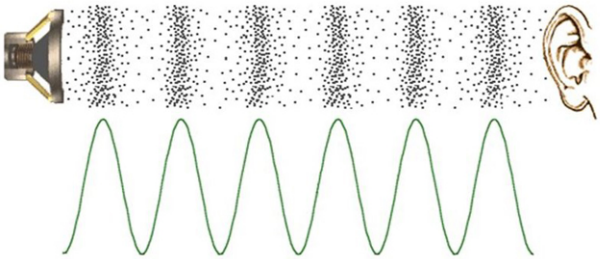


Рис. 6.4. Звуковые волны – волны сжатия.

Тяжелый звук

Звук может порождать объекты (а звук – это слова), он называется тяжелым ($G \neq 0$). Решая задачи на звуковые волны, студенты первого курса пренебрегают самогравитацией газа. Конечно, плотность газа достаточно небольшая, и он ничего не притягивает. Однако, Вселенная большая, и из-за огромных масштабов набираются огромные массы газов (и она притягивают к себе). Тогда возникает задача о тяжелом звуке. Задачу о тяжелом звуке впервые решил Джеймс Джинс.

Представим, что за абстрактной линией – бесконечная однородная Вселенная, заполненная однородным газом плотностью ρ_0. Предположим, мы его возмутили.

$$E = U + Q = -\frac{GM^2}{\lambda} + \frac{Ma^2}{2} < 0 \tag{6.9}$$

$$U \sim \frac{GM^2}{\lambda} \sim G\rho^2\lambda^5 \tag{6.10}$$

$$Q \sim \frac{Ma_{3B}^2}{2} \sim \rho\lambda^3 a_{3B}^2 \tag{6.11}$$

$$|U| \approx |Q| \tag{6.12}$$

$$\lambda_{\text{Джинса}} = \left(\frac{a_{3B}^2}{G\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{6.13}$$

Если $\lambda > \lambda_{\text{Джинса}}$, то слово (бас) становится звездами (гравитационная неустойчивость). Однако мы рассмотрели нерасширяемую Вселенную, поэтому эту формулу нельзя к ней применить. Если $\lambda \gg \lambda_{\text{Джинса}}$,

$$\frac{d\rho}{\rho} \sim e^{\Gamma t} \tag{6.14}$$

$$t_{\text{Дж}} \approx \frac{1}{\Gamma} \approx \frac{R}{v} \approx \frac{1}{\sqrt{\frac{GM}{\lambda^3}}} \approx \frac{1}{\sqrt{G\rho_0}} \tag{6.15}$$

Время образования объекта (звезды) не зависит от масштаба облака и его массы. На рис. (6.5) – туманность Карина в созвездии Киля, снятая русским телескопом-роботом МАСТЕР, расположенным в ЮАР.

Рис. 6.5. Туманность Карина в созвездии Киля.

Образование объектов в расширяющейся Вселенной

Возникает вопрос, работает ли неустойчивость Джинса в расширяющейся Вселенной. эту задачу строго математически впервые поставил Евгений Левшиц. Рассмотрим задачу при помощи шариков.

Пусть Вселенная расширяется со второй космической скоростью – как ракета, улетающая от Земли в межпланетное пространство. Вырежем из Вселенной два шарика – первый шарик ничем не отличается от самой Вселенной и расширяется со второй космической скоростью, а второй шарик начал расширяться немного позже. На графике расширения Вселенной это будет выглядеть следующим образом:

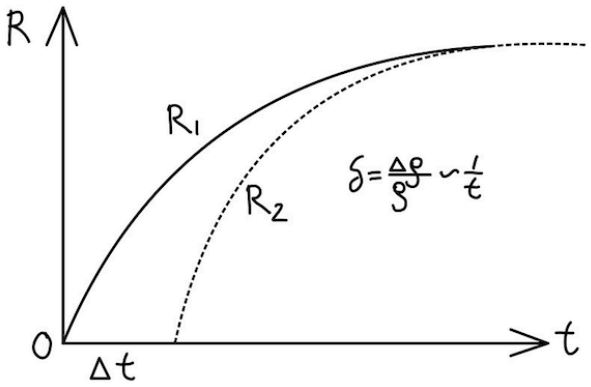


Рис. 6.6. График расширения Вселенной для рассматриваемых случаев.

$$E = K + U = 0 \tag{6.16}$$

$$R \sim t^{2/3} \tag{6.17}$$

$$M = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho \sim R^3 \rho \tag{6.18}$$

$$\frac{v_1}{2} - \frac{GM}{R_1} = 0,\ \frac{v_2^2}{2} - \frac{GM}{R_2} = \varepsilon < 0 \tag{6.19}$$

$$\rho_{1,2} \sim \frac{M}{R_{1,2}^3} \sim \frac{1}{t^2} \tag{6.20}$$

$$\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} = \frac{d\rho}{\rho} \tag{6.21}$$

$$(1+x)^\alpha \approx 1 + \alpha x,\ x \ll 1 \tag{6.22}$$

$$R_2 = R_1 + \Delta R,\ \Delta R \ll R \tag{6.23}$$

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{M}{R_2^3} - \frac{M}{R_1^3} = \frac{M}{R_1^3}\left(\left(\frac{R_1}{R_1+\Delta R}\right)^3 - 1\right) \approx \frac{M}{R_1^3}\left(\left(\frac{1}{1+\frac{\Delta R}{R_1}}\right)^3 - 1\right) \tag{6.24}$$

$$\frac{1}{\left(1+\frac{\Delta R}{R}\right)^3} \approx \frac{1}{1+3\frac{\Delta R}{R}} \approx 1 - 3\frac{\Delta R}{R} \tag{6.25}$$

$$\Delta\rho \sim t^{-2} - (t+\Delta t)^{-2} \sim \frac{2t\Delta t}{\left(t^2(t^2+2t\Delta t+\Delta t^2)\right)} \sim \frac{1}{t^3} \tag{6.26}$$

$$\frac{d\rho}{\rho} \sim R \sim t^{2/3} \to \infty \tag{6.27}$$

$$t \to \infty \tag{6.28}$$

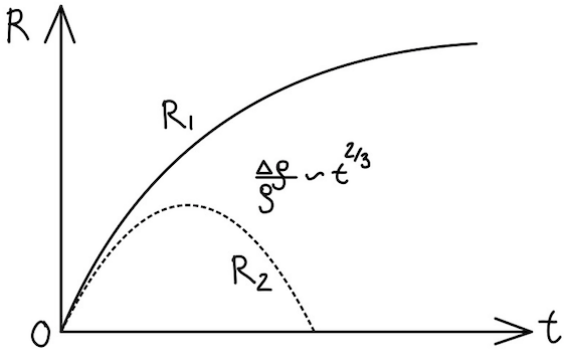
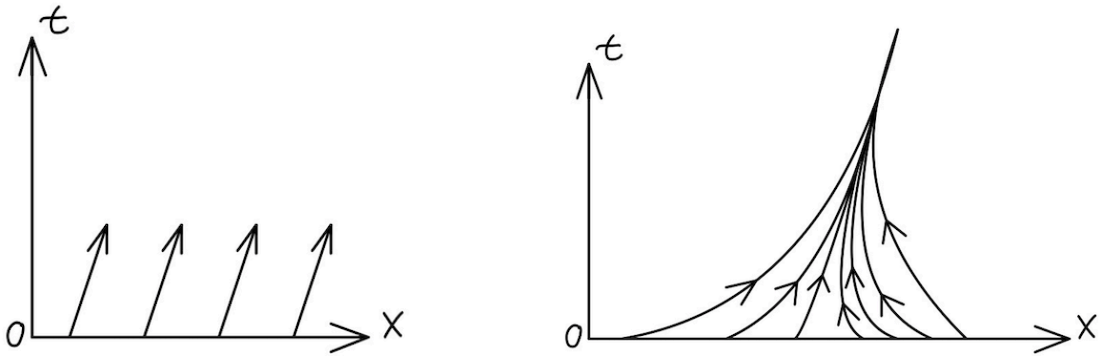


Рис. 6.7. Траектории расширение/движения двух шариков.

Песня про троллейбус

То, что в мире возникают объекты без гравитации, первым для Вселенной заметил Зельдович. Троллейбусы – это одномерные существа, – так, можно представить модель одномерной вселенной. попробуем доказать, что, если возмутить такую вселенную, то все векторы неизбежно встретятся вдоль некоторой точки, где произойдет столкновение троллейбусов.



а б

Рис. 6.8. Модель одномерной вселенной а) до возмущения б) после возмущения.

Так, в одномерном мире/Вселенной при его/ее возмущении могут возникать точки, где произойдут столкновения объектов. Если то же самое выполнить на плоскости, то возникнет одномерная линия. В пространстве – поверхность. Ее Зельдович назвал блином. Пробки на дорогах также являются блинами Зельдовича.

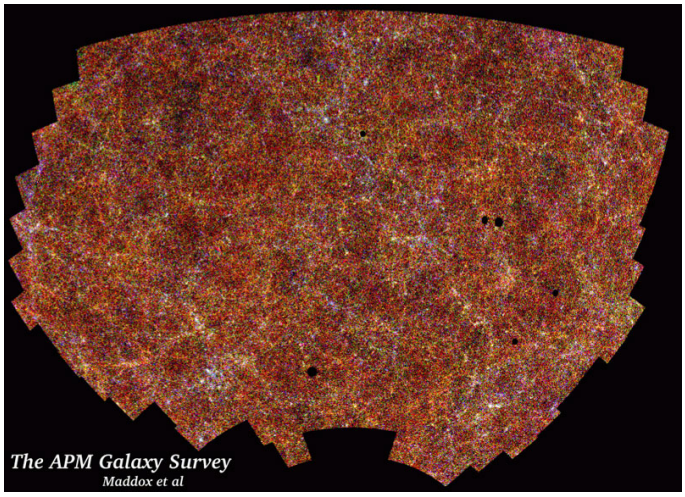


Рис. 6.9. Сетчатая структура Вселенной.

Итоги предыдущих лекций

Так, структуры образуются во Вселенной только при появлении малых возмущений. Опираясь на наблюдения, Слайфер обнаружил, что большинство галактик «убегает» от нас (почувствовал расширение вселенной). через 15 лет Хаббл показал, что это расширение происходит по закону $V = HR$ (скорость тем больше, чем дальше от нас объект во вселенной). Кроме того, Гамов предсказал, что Вселенная должна быть горячей (Вселенная могла быть холодной раньше, но в ней должен был остаться некоторый остаток – след горячности). Таким следом является реликтовое излучение – оно было открыто в 1965 году. Однако все это – Вселенная, в которой нет никакой жизни.

Парадокс №1. Нас в этой Вселенной не должно быть!

Если проанализировать полученную модель, то мы увидим, что в ней нет начального радиуса, – он появляется из ничего. Рассмотрим один из парадоксов,

разрушающих построенную модель Вселенной. на рис. (6.4) – та самая теплая пещера, в которой мы живем. Красная линия – красное смещение.

$$R_{1000} = \frac{R_0}{1+z} \tag{6.29}$$

$$\frac{d\rho}{\rho} \sim R \tag{6.30}$$

$$\frac{d\rho}{\rho} \sim \frac{(1+z_r)}{(1+z_1)} = 100 \tag{6.31}$$

$$z = 1000,\ \frac{d\rho}{\rho} \sim \frac{1}{100} \tag{6.32}$$

Лекция 7. Парадоксы

Задача: масса и энергия

Вспомним задачу про Петю, выехавшего из Москвы в Питер. Пусть в некоторый момент своего путешествия он вынул два фонарика и один направил вдоль дороги, а другой – назад. Проследим за фотонами, вылетевшими из фонариков, стоя вдоль дороги. Импульс любого тела:

$$p = Mv \tag{7.1}$$

$$E_1 = hv_0\left(1+\frac{v}{c}\right),\ E_2 = hv_0\left(1-\frac{v}{c}\right) \tag{7.2}$$

$$E_1 + E_2 = 2hv_0 \tag{7.3}$$

Тогда изменение энергии Пети равно $2hv_0$, а изменение импульса Пети равно разности импульсов фотонов. Импульс фотонов впервые измерил Петр Николаевич Лебедев.

$$v\Delta M = p_2 - p_1 = \frac{E_2}{c} - \frac{E_1}{c} = 2hv_0\frac{v}{c^2} = v\frac{\Delta E}{c^2} \tag{7.4}$$

В нашей системе отсчета импульс, который вылетает и который летит на нас, – разный.

$$v\Delta M = v\frac{\Delta E}{c^2} \tag{7.5}$$

$$\Delta M = \frac{\Delta E}{c^2} \Longrightarrow \Delta E = \Delta M c^2 \tag{7.6}$$

$$E = Mc^2 \tag{7.7}$$

Парадокс №1. Нас в этой Вселенной не должно быть!

Оказалось, что существует три существенных парадокса (и дополнительный четвертый), каждого из которых будет достаточно для того, чтобы назвать нашу Вселенную неправильной. В нашей модели мы находимся в центре сферы: если убрать здания и прочий наполнитель, то мы увидим светящуюся поверхность (фотосферу Вселенной), дальше которой заглянуть нельзя.

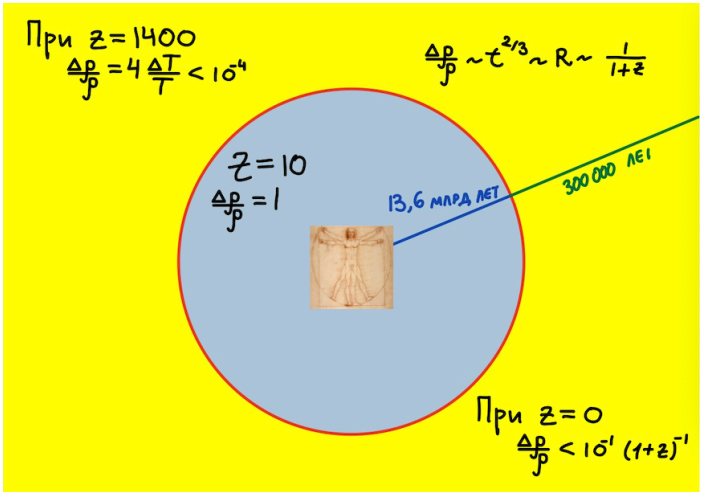


Рис. 7.1. Графическое изображение рассматриваемого случая.

Температура фотосферы Вселенной равна температуре Солнца, а ночью мы не видим ее по той причине, что она «убегает» от нас с огромной скоростью и краснеет согласно эффекту Доплера.

$$\rho_{\text{воздуха}} = 10^{-3}\ \text{г/см}^3 \quad (7.8)$$

$$\rho_{\text{человека}} = 1\ \text{г/см}^3 \quad (7.9)$$

$$\rho_{\text{газа в галактике}} = 10^{-24}\ \text{г/см}^3 \quad (7.10)$$

$$\rho_{\text{Вселенной}} = 10^{-30}\ \text{г/см}^3 \quad (7.11)$$

Так, во Вселенной полно предметов с огромным контрастом плотностей. Мы представляем собой чуждые неоднородные предметы, а это значит, что когда мы смотрим на фотосферу Вселенной, то должны наблюдать какие-то зазубрины/неоднородности (даже на Солнце они есть).

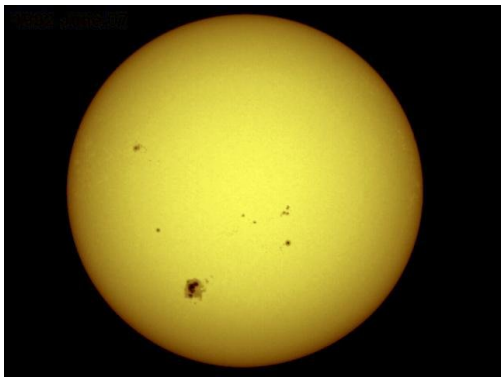


Рис. 7.2. Пятна на Солнце.

Примерно с 1970 года в течение десяти дет работал телескоп РАТАН 600 – самый крупный в диаметре на тот момент – с целью обнаружить пятна на фотосфере Вселенной, однако все попытки были неудачными.

Рис. 7.3. Телескоп РАТАН 600.

$$\frac{d\rho}{\rho} \sim R \sim \frac{1}{(1+z)} \quad (7.12)$$

$$\left(\frac{d\rho}{\rho}\right)_{\text{сегодня } (z=0)} = \left(\frac{d\rho}{\rho}\right)_{\text{ф}} * 1000,\ \left(\frac{d\rho}{\rho}\right)_{\text{ф}} < 10^{-4} \quad (7.13)$$

$$\frac{d\rho}{\rho} \sim 0{,}1 \quad (7.14)$$

Таким образом, мы не видим никаких возмущений на фотосфере вселенной (она слишком однородна), и нет ни одной физической идеи, как сделать предметы, нас окружающие. А значит нас во Вселенной быть не должно.

Парадокс причинности №2

Ранее мы неоднократно рассматривали динамику расширения Вселенной (6.1). Любая новость в этом мире распространяется со скоростью меньше или равной скорости света. Следовательно, через время t о новости узнают только те, кто находится внутри сферы с радиусом

$$R_{\text{гор.}} = ct \tag{7.15}$$

Аналогично этому можно рассмотреть появление Вселенной и найти ответ на вопрос: «как далеко можно увидеть Вселенную, если она прожила время t ?».

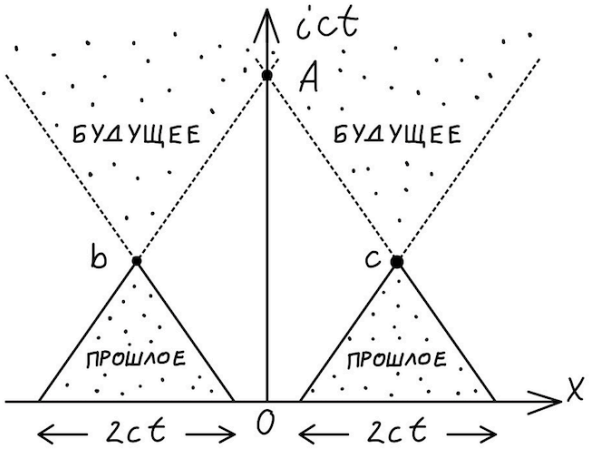


Рис. 7.4. Графическое изображение рассматриваемого случая.

$$\frac{R_{\text{гор.}}}{R} \sim \frac{t}{t^{2/3}} \sim t^{1/3} \to 0 \tag{7.16}$$

Если же обернуть время в прошлое и смотреть t все более и более молодой Вселенной, то радиус, на который мы видим, будет уменьшаться быстрее, чем радиус Вселенной. Это означает, что если во Вселенной есть миллионы таких же наблюдателей, как и мы, то Вселенная разобьется на маленькие информационные горизонты каждого наблюдателя, которые, с свою очередь, также будут разбиваться на все меньшие и меньшие горизонты. Так, в какой-то момент наблюдатели исключат возможность сообщаться друг с другом. Тогда по мере увеличения времени и радиуса Вселенной эти круги (информационные горизонты) начинают пересекаться.

$$\frac{R_{\text{гор.}}}{R} \sim \frac{t}{t^{1/2}} \sim t^{1/2} \to 0 \tag{7.17}$$

Парадокс №3. Вселенная младше звезд

На первой лекции мы ввели понятие фундаментального времени/ фундаментальной константы Хаббла во Вселенной: в 1912 г. было установлено, что большинство галактик убегают от нас, в 1928 г. Хаббл определил, по какому закону:

$$v = H_0 R \tag{7.18}$$

$$\frac{R}{v} = \frac{1}{H_0} = 1{,}4 * 10^{10} \text{ лет} \tag{7.19}$$

Посчитаем, какое отношение это число имеет к возрасту Вселенной.

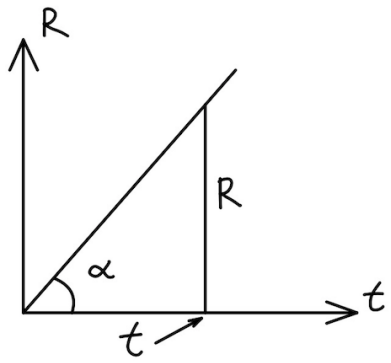


Рис. 7.5. Равномерное расширение Вселенной.

Допустим, в ней нет гравитации (Вселенная расширяется равномерно), тогда ее возраст

$$tg\ \alpha = \frac{R}{t} = v = const \tag{7.20}$$

$$v = HR \tag{7.21}$$

$$t \equiv \frac{1}{H} \tag{7.22}$$

Однако во Вселенной есть тяготение, открытое Ньютоном с подсказки Гука. Значит он расширяется с замедлением (раньше скорость Вселенной разлета была больше). Следовательно, средняя скорость больше наблюдаемой сейчас

$$R \sim t^{2/3} \tag{7.23}$$

$$t_0 = \frac{2}{3}\frac{1}{H_0} = 9{,}3 \text{ млрд лет} \tag{7.24}$$

В то же время, во Вселенной есть звезды значительно старше 11-12 млрд лет, что парадоксально.

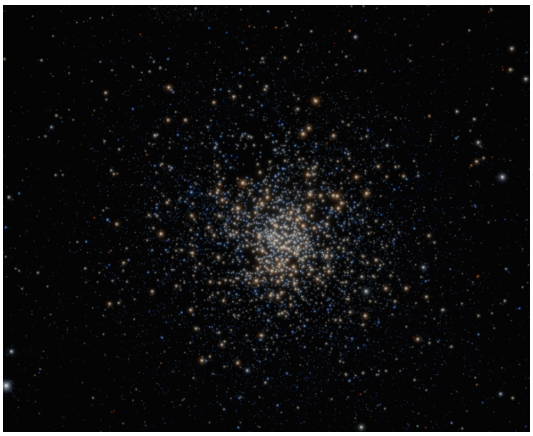


Рис. 7.6. Шаровое скопление M15 (13 млрд лет): Gaia.

Вспомним движение Пети из Москвы (пункт А) в Питер (пункт Б), если он едет равномерно, то затратит время $t = \frac{R}{v}$. Представим, что Петя ехал с замедлением и уже заезжает в пункт Б:

$$\langle v \rangle > v \tag{7.25}$$

$$t = \frac{R}{\langle v \rangle} < \frac{R}{v} \tag{7.26}$$

$$R \sim t^{2/3} \tag{7.27}$$

$$\frac{d^2R}{dt^2} = -\frac{1}{2^2},\ \frac{dR}{dt} = \frac{2}{3}\frac{R}{t} \tag{7.28}$$

Так и астроному Вселенная кажется всегда моложе, чем она есть.

Парадокс тонкой настройки №4

Вселенная, которую мы построили, обладала еще одним непонятным свойством, по какой-то причине, в прошлом ее плотность с огромной точностью была равна критической (как будто ее выстрелили с второй космической скоростью с точностью, необъяснимой случайным совпадением).

$$\frac{d\rho}{\rho} \sim t^{2/3} \sim R \tag{7.29}$$

$$\rho = \rho_{\text{крит}} = \frac{3H_0}{8\pi G} = 10^{-29}\ \text{г/см}^3 \tag{7.30}$$

Такая плотность обладает следующим свойством: если $\rho = \rho_{\text{крит}}$, то она все время остается равной $\rho_{\text{крит}}$. Но почему она изначально равна этому значению и с какой точностью? Рассмотрим шарик, у которого плотность отличается от критической, тогда он будет соответствовать (7.29). Рассмотрим время, когда образовывался гелий ($t =$ 1 мин):

$$\left(\frac{d\rho}{\rho}\right)_{t=1\text{ мин}} = \left(\frac{d\rho}{\rho}\right)_{t=10^{10}\text{ лет}} * \left(\frac{60\text{ сек}}{10^{10}\text{ лет}*\pi*10^7}\right)^{\frac{2}{3}} \approx \tag{7.31}$$

$$\approx \left(\frac{60\text{ сек}}{\pi*10^{17}\text{сек}}\right)^{\frac{2}{3}} = (2*10^{-16})^{\frac{2}{3}} \approx 10^{-10}$$

Так, двигаясь в прошлое, мы обнаруживаем, что все отличия от параболического движения исчезают. Тогда контраст плотности будет меняться по закону роста (в будущее) и падения (в прошлое) решение Лифшица:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_{\text{крит}}} = \frac{(\rho - \rho_{\text{крит}})}{\rho_{\text{крит}}} = (\Omega - 1) \sim R \tag{7.32}$$

В момент, когда Вселенной была одна минута, ее плотность отличалась от критической на величину 10^{-10}. Этот парадокс называется тонкой настройкой Вселенной (fine-tuning universe). Кроме того, когда Вселенная рождалась, она уже должна была двигаться со скоростью

$$\frac{d\rho}{\rho} = \left(\frac{R_{Pl}}{R_0}\right) \sim \frac{10^{-33}\text{ см}}{10^{17}\text{ см}} \approx 10^{-50} \tag{7.33}$$

Лекция 8. Темная материя

Фриц Цвикки и его 40-см телескоп

До этого мы долго строили Вселенную и на прошлой лекции стали разрушать ее. Сегодня мы рассмотрим скрытое вещество (темную материю). В начале 30-х годов Фриц Цвикки открыл новую сущность во Вселенной, о которой мы до сих пор мало знаем, но без которой мы не может существовать (согласно новой Вселенной, которую мы сейчас строим). В его распоряжении был 18-дюймовый телескоп, позволявших получать изображения галактик до 16,5 видимой звездной величины (человеческий глаз видит максимум с шестой).

Рис. 8.1. Скопление галактик в созвездии Волосы Вероники.

Так, Цвикки смотрел на скопление галактик и подумал, почему оно не расширяется вместе со Вселенной, а остается на месте. Мы знаем, что если много масс двигаются в некотором рое, то

$$E = K + U < 0,\ E = const \tag{8.1}$$

Докажем от противного:

$$R \to \infty \Longrightarrow U \to 0 \tag{8.2}$$

$$K = \frac{mv^2}{2} > 0 \tag{8.3}$$

Цвикки сообразил, что вероятно кинетическая энергия должна быть порядка потенциальной – тогда рой галактик не будет ни разлетаться, ни схлопываться. Тогда он взял спектры галактик и принялся считать скорости:

$$K + U < 0 \tag{8.4}$$

$$K = \frac{Mv^2}{2} > 0 - \text{кинетическая энергия} \tag{8.5}$$

$$K \approx 400|U| \text{ и } E = K + U \gg 0, \tag{8.6}$$

что, по сути, невозможно. Цвикки продолжал думать над этой проблемой в течение пяти лет обнаружил скрытое вещество/темную материю. Для этого Фриц рассуждал о природе такой частицы, которая не светится и притягивает (удерживает) скопления и думал, где еще такое можно обнаружить.

Рис. 8.2. Спектральные галактики.

Довольно быстро он понял, что если наблюдать спектральные галактики (плоские вращающиеся галактики) спектрографом, то можно измерить скорость движения правой и левой стороны и убедиться, что такие галактики вращаются. Так, светящиеся звезды создают кеплеровский закон движения:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R}} \tag{8.7}$$

Тогда, если наблюдать галактики на больших расстояниях, то можно почувствовать, что все они окружены некой «темной шубой» – той самой темной материей.

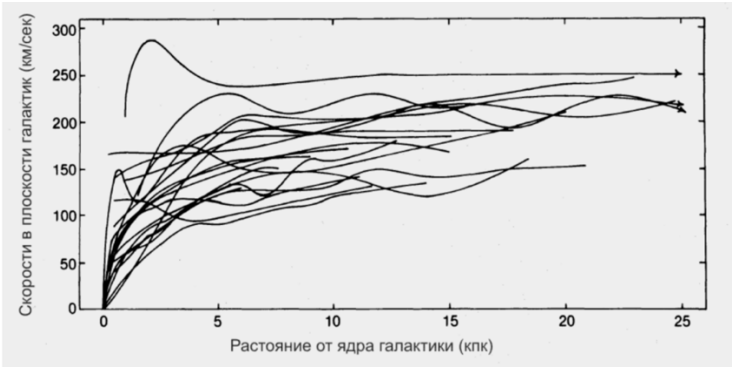


Рис. 8.3. Кривые вращения галактик.

После Цвикки заметил, что, если темные облака летают по Вселенной, то возможно удивительное явление, следующее из общей теории относительности: если есть некоторое скопление галактик (или просто далекие объекты), а между нами – некая звезда (пусть темная), то свет, проходя мимо нее, искривляется и попадает на Землю так, что эта невидимая планета становится линзой (гравитационной).

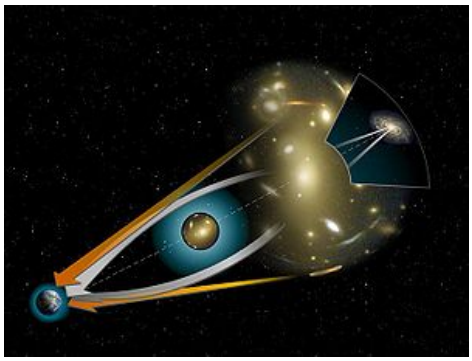


Рис. 8.4. Микролинзирование темной материей.

Для чего нужна темная материя

Тысячи проведенных измерений показали, что общая плотность темной материи близка к 25%, что, вкупе с обычным барионным веществом, дает не больше

$$\Omega = 0{,}3 \tag{8.8}$$

Несмотря на безуспешные попытки найти зернышки, из которых выросли объекты, в начале. 80-х годов в США и СССР двое ученых (Джордж Смут и Николай Кардашев) предложили один и тот же эксперимент по обнаружению флуктуаций реликтового фона – запустить телескоп в космос. Идея заключалась в том, чтобы взять космический аппарат и разместить в нем чувствительный радиоприемник, измеряющий сигналы.

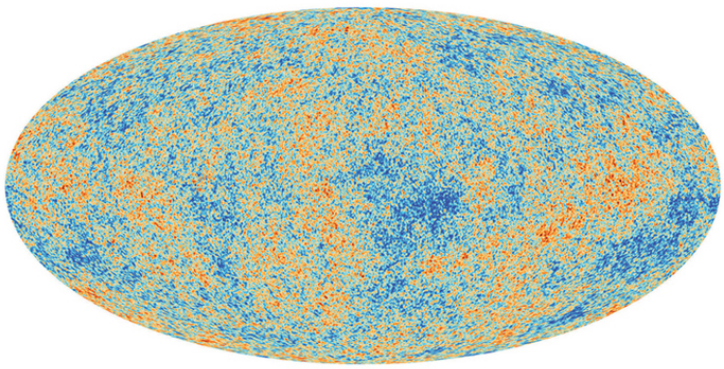


Рис. 8.5. Реликтовое излучение: картина, полученная американскими учеными.

Так, во Вселенной в веществе нет ни одного объекта, так как она привязана в свету, а значит, непрозрачная (свет делает ее однородной и изотропной). Вдруг Вселенная просветлевают и возмущения начинают медленно расти. Представим, что есть еще одна компонента, гораздо большая по массе, совершенно не взаимодействующая со светом (а значит, она росла и до этого). Волокна на рис. (8.6) – скрытые объекты Вселенной, темные протогалактики/протоскопления. Таким образом, под действием тяготения вещество ринулось, и вспыхнули первые желтые объекты, – вот для чего нужна материя: если нет сетки, то нет и нас.

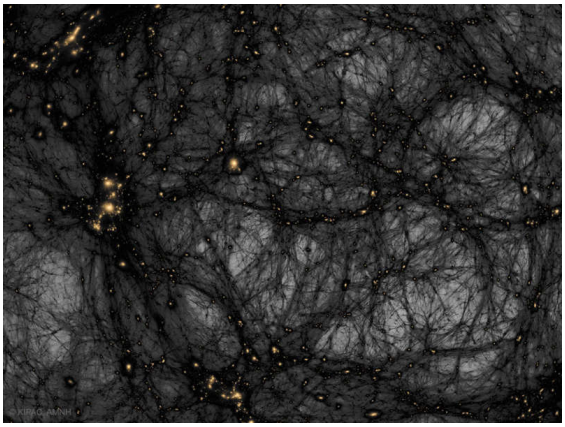


Рис. 8.6. Распределение темной материи по Вселенной.

Так, мы решили первый парадокс и согласились с тем, что во вселенной образуются объекты, но не объяснили, почему в ней есть объекты, которые старше самой

Вселенной (на возраст Вселенной темная материя никак не повлияла). Мы также не объяснили, почему разные части Вселенной так похожи друг на друга.

Теория поля

В этой главе мы поймем, как люди узнали о том, что вещество состоит из атомов. Так, остается парадокс причинности. Оказывается, это связано с самыми фундаментальными свойствами материи, которая нас окружает. Для объяснения понадобилось привлечь несколько разных типов сил в природе.

Рассмотрим теорию поля на примере теории Ньютона:

$$F = \frac{FmM}{R^2} \tag{8.9}$$

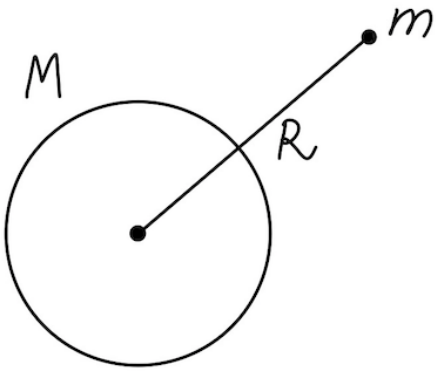


Рис. 8.7. Графическое изображение теории Ньютона.

На языке Ньютона все гравитационное поле, создаваемое шаром, можно описать одной функцией

$$\phi(x,y,z) = \phi\left(\vec{R}\right) = -\frac{GM}{R} \tag{8.10}$$

так, в каждой точке гравитационное поле характеризуется одним числом, и сила возникает только в том случае, если от одной точки к другой потенциал меняется. Ньютоновская гравитация – это скалярное поле. Электромагнитное поле – векторное.

$$\frac{F_{\text{кулон}}}{F_{\text{ньютон}}} = \frac{e^2}{Gm_p m_e} \approx 10^{40} \text{ раз} \tag{8.11}$$

Теория поля – есть теория потенциалов разных физических взаимодействий.

Вселенная как Черёмушки или мир глазами первого дальтоника

Атом был открыт Джоном Дальтоном, также открывшим болезнь дальтонизма, так как сам был ей болен. Дальтон первым осуществил следующий опыт: брал водород и сжигал его в кислороде. Оказалось, что для того, чтобы газ полностью сжигался, необходимо было брать определенное отношение водорода к кислороду: $\frac{1}{8}$. Так, всегда, когда Дальтон смешивал водород и кислород – оставалась лужица воды. Масса, объем менялись, но всегда отношение вступивших по весу компонентов было целым числом.

После Амедео Авогадро заметил, что при сжигании разных веществ можно ожидать, что они сожгутся до конца только в случае, когда их отношение по массе равно натуральному числу. Если бы водород был сделан из одних «кирпичиков», а кислород – из других, то это отношение могло быть любым (целым, дробным, …), однако у нас оно

– всегда целое, а значит в природе есть фундаментальный «кирпичик», из которого сложена материя. Благодаря этому в дальнейшем будет открыта таблица Менделеева.

Для лучшего понимания приведем аналогию с выпившим Женей Лукашиним из к/ф Рязанова, поднимающимся по ступенькам на нужный ему этаж, считая ступеньки (чтобы не скучать). Так, он доходит до конца, понимает, что ошибся домом, и идет в следующий. В какой-то момент он замечает, что количества ступенек во всех домах, деленное на количество этажей, относятся друг к другу как целые числа.

Так, Дальтон смог макроскопическим экспериментом доказать, что в природе существует элементарная частица.

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Лекция 9. Инфляция

Солнечная система и атом водорода

Ранее мы подробно рассмотрели то, как физика в 19 в. открыла атом и обсудили, что в мире, где нет темной материи, нет и никаких предметов, а темная материя создает структуру: она практически не взаимодействует с обычными частицами, и поэтому сначала создает некую темную вуаль, чтобы в момент просветления Вселенной барионы устремились в потенциальные гравитационные ямы. Тем не менее, новую Вселенную мы до сих пор не построили, а лишь решили парадокс, связанный с тем, что остающееся реликтовое излучение однородно и изотропно (а связано это с тем, что на самом деле объекты уже есть, но мы их не видим, так как они находятся в темной компоненте Вселенной).

Далее был найден новый этап образования Вселенной, ответивший на другие основные вопросы – теория Инфляции. Эта идея возникла из физической Теории полей. В начале 19 века Дальтоном были открыты атомы. Самый простой атом (атом водорода) состоит из протона и электрона, который подобно Меркурию или Земле вращается вокруг Солнца.

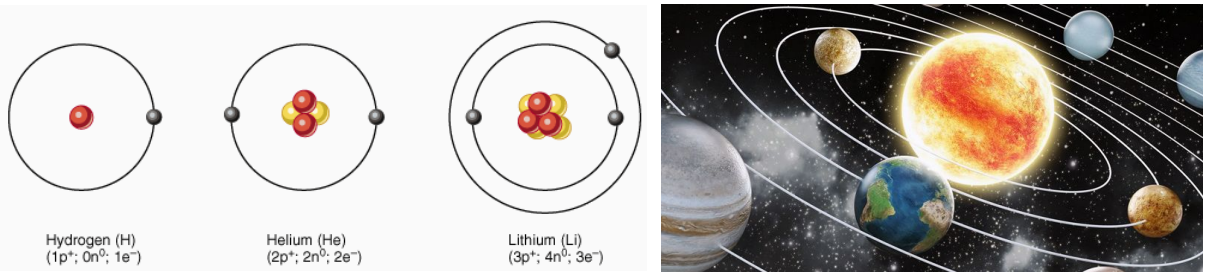


Рис. 9.1. Атом и солнечная система.

Размер атома, радиус которого равен 10^{-8} см:

$$R = 10^{-8} = 1\text{Å} = 0{,}1 \text{ Нм} \tag{9.1}$$

Ядерная сила (сила взаимодействия) удерживает ядра и действует между протонами и нейтронами. Протоны и нейтроны вместе имеют название нуклонов, а по массе отличаются на одну массу электрона. Если нейтрон вынуть из ядра атома и положить подальше от других элементарных частиц, то он проживет ровно 13 минут.

$$n \to p^+ + e^- + \tilde{\nu}_e \tag{9.2}$$

$$m_n \approx m_p,\ \Delta m \sim \frac{1}{800} m_e \tag{9.3}$$

Как классическая физика получила неуд. Число N1

Разрушим картину, в которой атом напоминает солнечную систему. Если посмотреть на атом водорода, то мы увидим, что отрицательный заряд равномерно двигается вокруг положительного. Максвелл доказал, что любой заряд, если он двигается ускоренно, начинает передавать сигнал Вселенной в виде электромагнитных волн – начинает излучать. Согласно теории Джеймса Максвелла, время жизни атома:

$$t_{\text{кл}} \approx 10^{-8} \text{ с} \tag{9.4}$$

Нам точно известно, что Вселенная живет время порядка обратной постоянной Хаббла:

$$14 \text{ млрд лет} = 14 * 10^9 * \pi * 10^7 = 1{,}4 * 10^{17} \text{ с} \quad (9.5)$$

$$\frac{t_{\text{атом}}}{t_H} \approx 10^{-26} \quad (9.6)$$

Вспомним рис. (9.1): когда мы перейдем к урану, то будем наблюдать 238 таких шариков (нуклонов), что их будет удерживать? Радиус ядерной силы:

$$R \cong 10^{-13} \text{ см} \quad (9.7)$$

Ядерная сила «сильная», но короткодействующая, поэтому уран и остальные тяжелые элементы с большим количеством нуклонов все время стремится развалиться.

$$F_{\text{ядр}} = \frac{1}{R^2} e^{-\frac{R}{L}},\ L = 10^{-13} \text{ см} \quad (9.8)$$

Согласно классической физике атомов быть не должно, но они есть (в дальнейшем мы рассмотрим три таких числа).

$$F_{\text{кул}} = \frac{e^2}{R^2} \sim \frac{1}{10} \quad (9.9)$$

В 1913 г. Нильс Бор постулировал, что электрон вращается, но ничего не излучает. Излучать же он может только в том случае, если будет переходить с орбиты два на орбиту один и при этом

$$\Delta E = E_2 - E_1 = \hbar\nu \quad (9.10)$$

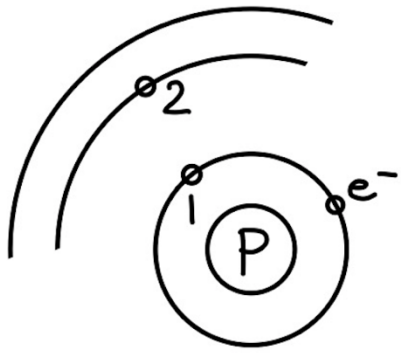


Рис. 9.2. Боровская модель атома.

Квантовая механика: глаза боятся, а руки делают

Объяснить, почему постулат Бора подтверждается всеми экспериментами, решил Луи де Бройль. Он предположил, что электрон, также как и фотон обладают таким свойством, что они и частицы, и волны.

$$\lambda_{\text{Бройля}} = \frac{h}{mV} \quad (9.11)$$

Представим гитару с натянутой струной – волной.

$$n\lambda = L \quad (9.12)$$

Тогда если электрон – это волна, то орбита должна вмещать целое число волн:

$$2\pi R = n\lambda \quad (9.13)$$

Рис. 9.3. Графическое изображение рассматриваемого постулата.

Так, де Бройль объяснил постулат Бора.

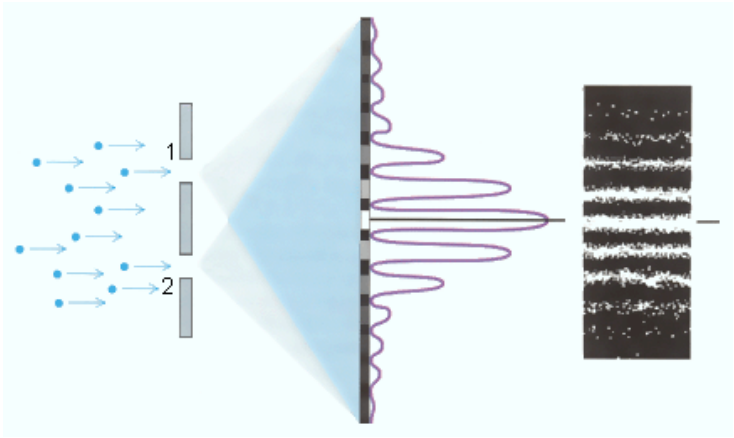


Рис. 9.4. Дифракция электронов на двух щелях.

Квантование орбит

Квантование орбит происходит следующим образом:

$$\lambda_{\text{Бройля}} = \frac{h}{mV} \tag{9.14}$$

$$2\pi R = n\lambda_{\text{Бройля}} \tag{9.15}$$

В 1925 г. Гейзенберг и Шредингер одновременно и независимо вывели уравнение, описывающее механику движения электрона, являющегося и частицей, и волной.

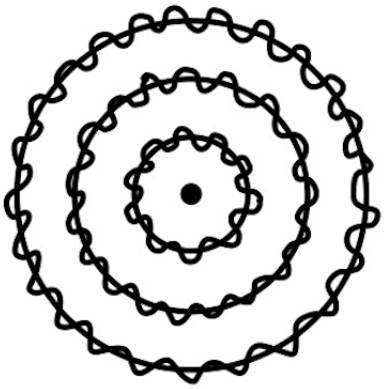


Рис. 9.5. Процесс квантования орбит.

Так, если электрон летает по комнате, то никогда невозможно определить, где он находится. При попытке определить его нахождение, возникают неравенства Гейзенберга:

$$\Delta E \Delta t > \hbar \text{ или } \Delta x \Delta p > \hbar, \quad (9.16)$$

где $\hbar = 6{,}67 * 10^{-27}$ эрг $*$ с $-$ постоянная Планка.

Четыре взаимодействия в природе

Оказалось, что квантовой механике подчиняются все взаимодействия, которые есть в природе:

- Гравитационное (поле тяготения)
- Кулоновское (электромагнитное поле)
- Сильное (ядерные силы)
- Слабое

$$n \rightarrow p^+ + e + \upsilon \quad (9.17)$$

Все взаимодействия должны квантоваться, следовательно, у каждого из них есть свой квант: гравитон для гравитационного поля, фотон для электромагнитного поля, глюоны у сильного и нейтрино у слабого взаимодействия.

Симметрия и ее разрушение

В физике, начиная с 50-х годов прошлого века возникла идея о том, что ведущей идеей мира является идея красоты (если уравнение красивое, то оно правильное). Что же на физическом языке означает красоту? Так, звездочка на рис. (9.6) красивая, потому что она переходит сама в себя при повороте на 45°. Получается, что при некотором преобразовании эта звезда остается той же самой (не стареет и светит, как атом, падающий сам на себя).

Рис. 9.6. Рассматриваемая звездочка.

Цитируя В. Хлумова: «Морские волны, огонь в камине, свечи, закаты, восходы – все это прекрасная мертвечина, туристическая красота». Такая красота примитивна – все такие процессы объединяет периодичность. И в физике эта красота является ведущей:

- Закон сохранения энергии
- Закон сохранения импульса
- Закон сохранения момента импульса
- И т.д.

Пространство, в котором мы живем, однородно и изотропно относительно вращения. Законы сохранения в физике являются следствием некой симметрии.

Пятое колесо в телеге! Скалярное взаимодействие

Эта идея была положена в систему современного мироздания. На рис. (9.7) изображены главные частицы, формирующие вещество вокруг.

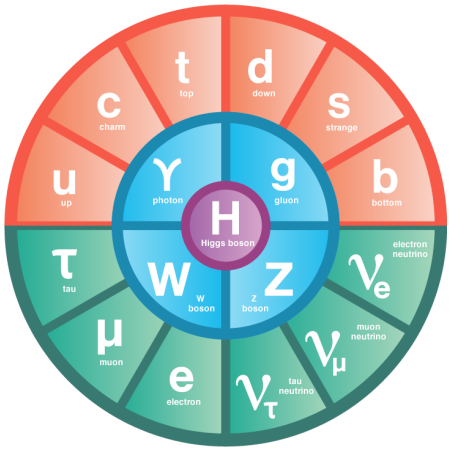


Рис. 9.7. Частицы, формирующие вещество вокруг.

Представим, что есть некий мир, в котором отсутствует скалярное поле и есть набор безмассовых частиц, изображенных на рис. (9.7): пусть по стеклянному столу без трения бегают таблетки, сделанные из пенопласта. Масса – попытка сопротивления изменить свое положение. Для того, чтобы ее породить, необходимо «налить масло» на этот стол. Роль масла исполняет скалярное поле – тогда у частиц появляется инерция. Так, скалярное поле необходимо для того, чтобы частицы обретали массу – ее порождает хиггсовский бозон.

Инфляция Гута и месть Гука

Статья, в которой были изложены основные принципы инфляции, вышла в 1980 г. под авторством Алана Гута – он придумал следующий сценарий нашей Вселенной, решающий несколько важных парадоксов. Тем не менее, инфляцию первым придумал не Гут, но именно он красиво сформулировал и подал ее. Физики заметили, что, если взять скалярное поле, поместить его в термостат и начать выдвигать поршень, то окажется, что поршень будет сам выдвигаться.

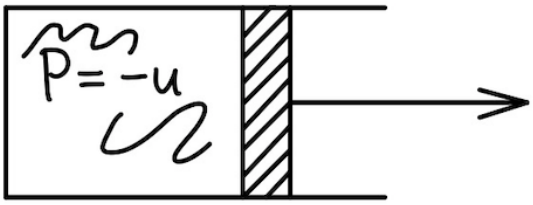


Рис. 9.8. Графическое изображение рассматриваемого случая.

Само скалярное поле можно представить как

$$P = -u = -\rho c^2, \tag{9.18}$$

где P – давление, u – плотность энергии. Первое начало термодинамики:

$$\Delta U = -p\Delta V = u\Delta V \tag{9.19}$$

Но $U = uV$, тогда

$$\Delta uV = u\Delta V + V\Delta u = -p\Delta V \quad (9.20)$$

$$u\Delta V + V\Delta u = u\Delta V \quad (9.21)$$

$$V\Delta u = 0 \quad (9.22)$$

$$u = const \quad (9.23)$$

Тогда полная энергия в сосуде:

$$\mathcal{E} = U = uV \sim R^3 \quad (9.24)$$

Получается самоподдерживающийся взрыв.

$$\rho_{\text{Т}} = \frac{u}{c^2} - \frac{3u}{c^2} = -\frac{2u}{c^2} \quad (9.25)$$

При этом, ускорение, которое создает это давление, оказывается пропорционально расстоянию

$$\frac{F}{1\text{ г}} = -\frac{GM}{R^2} = -\frac{4}{3}\pi G\rho_{\text{Т}}R \quad (9.26)$$

$$\frac{F}{1\text{ г}} = \frac{8}{3}\pi G\rho_{\Phi}R = kR \quad (9.27)$$

В результате, радиус Вселенной:

$$R = R_0 e^{H_{\text{инф}}t} \quad (9.28)$$

Экспонента появляется за счет того, что

$$a \sim R \quad (9.29)$$

Так, оказалось, что скалярное поле может разгонять Вселенную из ничего, и она будет экспоненциально размываться. Если вернуться к рисункам динамики расширения Вселенной, то решение парадокса причинности (а парадокс существовал, т.к. Вселенная в прошлом была разбита на никак не сообщающиеся сосуды) наступает из-за присутствия довольно долгого участка, куда доходит сигнал:

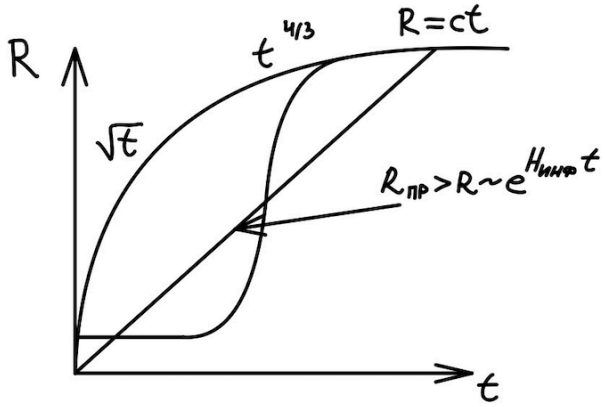


Рис. 9.9. Решение парадокса причинности (Вселенная с фазой инфляции).

$$t_{\text{инф}} = (70 - 100)\frac{1}{H_{\text{инф}}} \quad (9.30)$$

$$T_{Pl} = \frac{1}{H} \sim 10^{-43}\text{ с} \quad (9.31)$$

$$R_{Pl} \sim 10^{-33}\text{ см} \quad (9.32)$$

$$\rho_{pl} \approx 10^{93}\text{ г/см}^3 \quad (9.33)$$

$$T_{pl} \approx 1{,}3 * 10^{32}\ K \quad (9.34)$$

$$V(\phi) = \frac{m^2}{2}\phi^2 \tag{9.35}$$

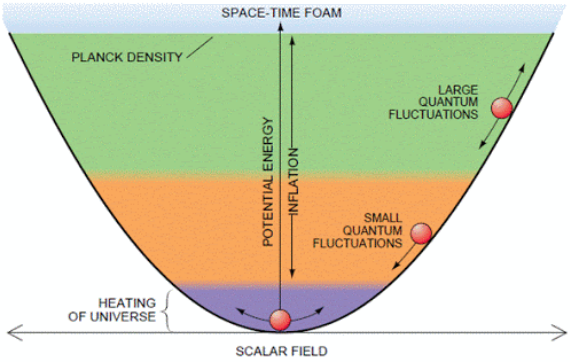


Рис. 9.10. Инфляция и скалярное поле.

Лекция 10. Теория пустоты

Эфир. Опыт Майкельсона-Морли

В этой лекции мы разберемся, откуда взялась темная энергия. Представим насос, откачивающий воздух из некоторого консервированного сосуда. Останется ли что-то в этой пустоте? Ранее философской пустотой называлась некая субстанция, мы будем говорить о пустоте физической (такой, которую можно установить экспериментально).

Первый эксперимент по обнаружению пустоты был поставлен в XIX в. Майкельсоном и Морли – они использовали интерферометр типа Майкельсона (рис. 10.1). Источник света посылается в направлении зеркала через делительную пластинку – полупрозрачное зеркало, отсылающее каждый второй квант под углом в 90°, а каждый третий (первый-третий-пятый-…) – налево. Затем эти кванты возвращаются и оранжевые и зеленые кванты смешиваются. Поскольку расстояние детектора выбирается таким образом, чтобы длина пути была одинакова, то кванты приходят в одной и той же фазе. А это означает, что когда две волны на берег моря приходят в одной фазе, то они складываются (что образует светлое пятно на детекторе).

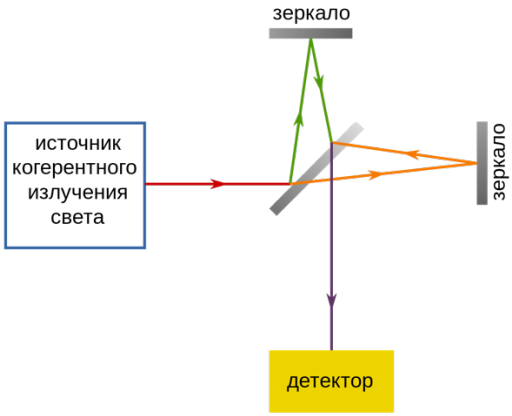


Рис. 10.1. Опыт Майкельсона: схема.

После люди XIX в. стали размышлять в классической физике о движении детектора относительно света – так появилось понятие эфира (в классической физике скорость любой частицы зависела оттого, двигается от нее наблюдатель или нет).

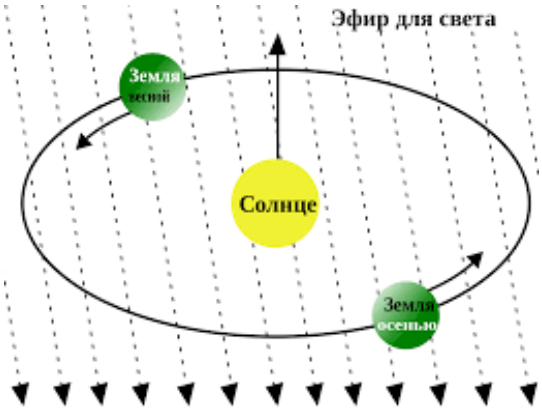


Рис. 10.2. Идея смещения света эфирным ветром.

Люди того времени предсказали, что из-за того, что скорость света в направлении движения планеты Земля будет другая, то светлые пятна заменятся темными (картина интерференционных полей).

Море Дирака

Первое подозрение о том, что в пустоте что-то есть, возникло с приходом квантовой механики. Поль Амадей Дирак первым задался следующим вопросом: в релятивистской формуле есть формула

$$E^2 - p^2c^2 = const = m_\rho c^2 \quad (10.1)$$

$$E = mc^2 = \frac{m_e}{\sqrt{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)}} \quad (10.2)$$

Дирак преобразовал формулу в

$$E = \pm\sqrt{(mc^2 + p^2c^2)} \quad (10.3)$$

Далее Поль рассудил, что частицы, которые мы видим вокруг, имеют положительную энергию, – тогда нет ли минуса, который существует в математике, еще и в физике? Оказалось, что такие частицы существуют, однако невидимы для нас.

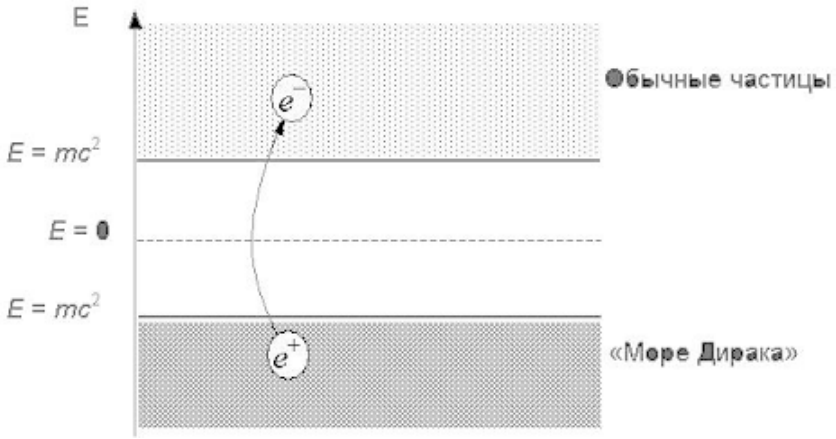


Рис. 10.3. Море Дирака.

Так, Дирак показал, что в квантовой механике той самой пустоты, о которой мечтал Эйнштейн, нет, так как в пустоте все равно остается некая неявная виртуальная частица.

Физика – это геометрия, а геометрия - физика?

Второй закон Ньютона: сопротивляемость покою пропорциональна силе, деленной на изменение скорости изменения конфигурации тела во Вселенной.

$$m_{\text{инерции}} = \frac{F}{a} \quad (10.4)$$

$$F = \frac{GMm_T}{R^2} = m_и a \quad (10.5)$$

Но $a = g$ – ускорение свободного падения.

$$m_{\text{инерции}} = m_и \quad (10.6)$$

Массы инерции и тяготения оказались одинаковыми, а значит, поле тяготения каким-то образом завязано на желании тела оставаться в покое (покой подразумевает, что расположение тел в пространстве не меняется).

Пятый постулат Эвклида

Когда Николаю Лобачевскому было 25 лет, он задумался о том, зачем в геометрии Евклида существует пятый постулат о параллельных прямых. После того, как Лобачевский понял, что от постулата можно отказаться, он сформулировал геометрию в виде седла, на поверхности которого через прямую линию вне данной прямой линии можно провести бесконечное число непересекающихся с начальной прямой прямых.

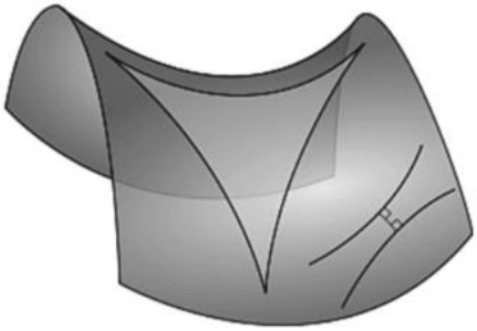


Рис. 10.4. «Седло» – геометрия Лобачевского.

Теорема Гаусса–Остроградского: если окружить ежика сферой и продолжить все его иголки, то их плотность будет меняться по закону $\frac{1}{R^2}$, так как число иголок не меняется, а площадь растет как R^2.

Эрнст Мах и его полезное заблуждение

На рис. (10.5) опыт, который поставил Эйнштейн, прежде чем придумать теорию гравитации. Представим полную пустоту и двое наблюдателей на Земле. Один сидит на Земле формы репы, а другой – формы шара. Один наблюдатель говорит: «вокруг пустота, я стою на месте – Земля круглая», а второй, что вокруг пустота, он вращается, а Земля – репа». Один вращается относительно пустого пространства 0, другой - $0'$. Тогда Эйнштейн спрашивает, могут ли наблюдатели найти разницу между двумя пустыми пространствами. Эта апория до сих пор не имеет ответа в современной физике. Это также т.н. принцип Маха: Мах утверждал, что центробежная сила/инерция возникает только в том случае, если Вселенная не пустая.

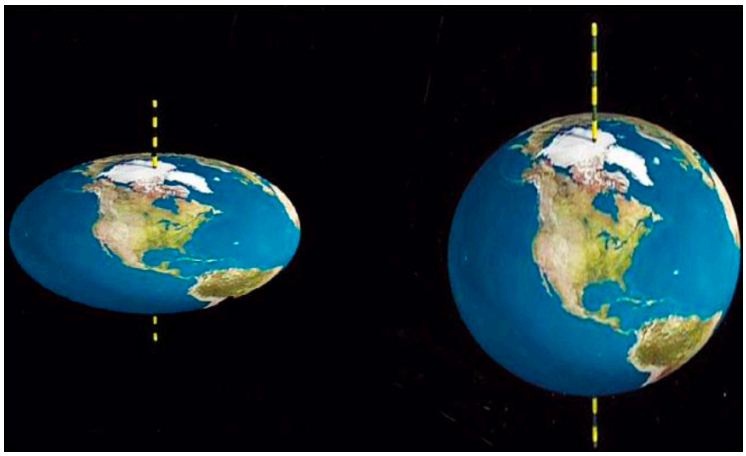


Рис. 10.5. Апория Эйнштейна.

Это показывает, что существует некая загадка между силами и свойствами пустоты.

Уравнение Эйнштейна

Эйнштейн выводил уравнение следующим образом:

$$\text{Геометрия} = f(\text{массы} - \text{энергии}) \tag{10.7}$$

Затем он добавил константу Λ, а потом перенес ее, а массу выкинул:

$$\text{Геометрия} + \Lambda = f(\text{массы}) \tag{10.8}$$

$$\text{Геометрия} = -\Lambda \tag{10.9}$$

В дальнейшем Фред Хойл и Эраст Глинер показали, что Λ действует как жидкость с отрицательным давлением: $P = -u$, а это – антигравитация.

Вселенная Леметра (F)

Леметр подставил в уравнения Эйнштейна постоянную (космологическую Хаббла), набросал вещества и стал строить различные модели Вселенной. так, он обнаружил, что она расширяется, но все энергии по законам молекулярной физики должны уменьшаться. Раз все отступают, и остается только константа Λ, то она и завоевывает Вселенную. В результате, как только все энергии упали, началось экспоненциальное развитие.

Когда в 1928 г. Эдвин Хаббл открыл закон Хаббла-Леметра разбегания галактик его имени, постоянная оказалась равной $H_0 = 500\ (\text{км/с})/\text{Мпс}$. Если перейти к обратной величине, хаббловскому времени, то

$$t_{\text{Вселенной}} = \left(\frac{2}{3}\right)\frac{1}{H_0} = 2\ \text{млрд лет} \tag{10.10}$$

Тогда Леметр заметил, что, раз есть Λ, Вселенная расширяется антигравитационно с ускорением.

Стационарная Вселенная Хойла

Фред Хойл – один из первых, кто доказал, что число Λ эквивалентно тому, что во Вселенной есть космическая энергия вакуума. Космический вакуум Эйнштейна-Хойла-Глинера:

$$\rho_\Lambda = \frac{\Lambda}{8\pi G} \tag{10.11}$$

$$\Longrightarrow u = \rho_\Lambda c^2,\ P = -u \tag{10.12}$$

Для того, чтобы узнать, с ускорением расширяется Вселенная или с замедлением, необходимо понаблюдать далекие объекты в ней.

Стандартная свеча Вселенной

Уже достаточно давно люди заметили, что на небе вспыхивают т.н. сверхновые звезды. Среди этих звезд есть довольно удивительные: $SN1a$, оказывается, такие звезды могут быть стандартной свечой. Для того, чтобы определить, что это значит, рассмотрим теорему Гаусса для световых иголок, вылетающих из ежика:

$$F = \frac{L}{4\pi R^2} \tag{10.13}$$

$$R = \left(\frac{L}{4\pi F}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{10.14}$$

Так, если известно L (истинная мощность объекта), то определив F (поток излучения) можно найти R (расстояние). Это называется космологической линейкой – измерительный стандартный метр/стандартная свеча. Юрий Павлович Псковский (эффект Псковского) заметил, что чем ярче сверхновая, тем дольше она тухнет. Тогда на рис. (1.6) можно измерить только наклон кривой блеска и установить истинную яркость сверхновой. Этот эффект Псковского помогает снизить ошибки настолько, что удалось определить эффект, который мы рассмотрим далее.

Обнаружение антигравитации

На рис. (10.6) описана мощность сверхновых. Ученые заметили, что чем дальше сверхновая, тем меньше ее светимость и предположили, что сверхновые на самом деле одинаковые, а формулы - неправильные. Оказалось, что, если включить темную энергию, то все сверхновые становятся одинаковы.

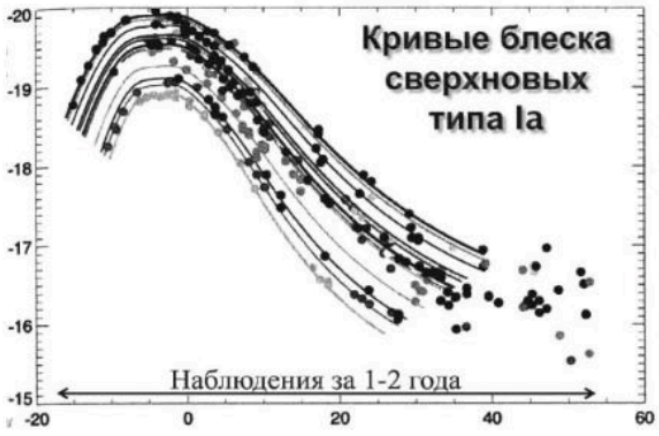


Рис. 10.6. Кривые блеска сверхновых типа $1a$.

Точное значение плотности через две фундаментальные константы нашего мира равно

$$\rho_\Lambda = \frac{\Lambda}{8\pi G} \approx \frac{(0{,}7)3H_0^2}{8\pi G} \approx 10^{-29}\ \text{г/см}^3 \tag{10.15}$$

Большое число номер два N2

Так, была найдена третья компонента нашего мира, сделавшая нашу Вселенную ракетой, летящей со второй космической скоростью, и возникло следующее число:

$$N2 = \frac{\rho_{Pl}}{\rho_\Lambda} \approx \frac{10^{94}\ \text{г/см}^3}{10^{-29}\ \text{г/см}^3_\Lambda} \approx 10^{123} \tag{10.16}$$

$$N2 \approx 10^{123}, \tag{10.17}$$

в то время как в начале XX в. это отношение было равно

$$N1 = 10^{26} \tag{10.18}$$

Ранее мы вывели парадокс, заключавшийся в том, что возраст Вселенной (в которой нет антигравитации) был меньше возраста Звезд. Открытие энергии закрыло этот парадокс.

Теперь мы можем представить, как выглядела правильная история Вселенной.

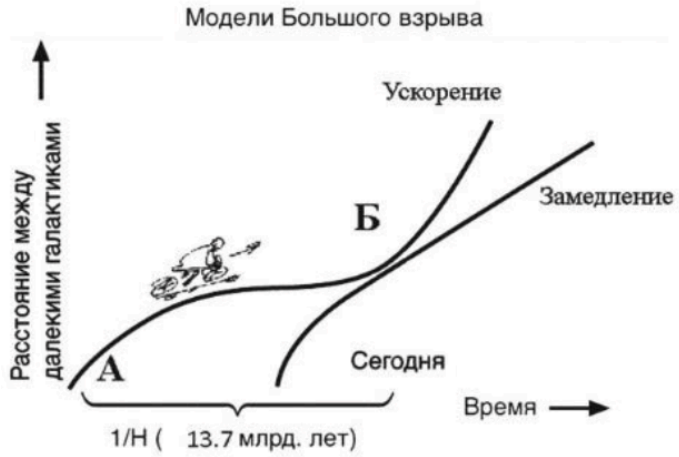


Рис. 10.7. История Вселенной (XXI век): Модели Большого взрыва.

Так что же открыл Хаббл?

Вспомним, что впервые то, что большинство галактик убегают от нас, увидел Слайфер, – с этого момента пошла теория Большого взрыва. Хаббл проанализировал результаты, но что именно он открыл? На рис. (10.8) – скорость удаления галактик в зависимости от расстояния (реальные измерения, выполненные российскими астрономами). Так, до одного Мпк галактики то приближаются, то удаляются, так как они связаны гравитационно. Однако, начиная с одного Мпк они начинают выстраиваться вдоль линии, которая и является законом Хаббла. Это, на самом деле, очень неожиданно, и в целом не предсказывалось, так как не существовало понятия темной энергии. В то время, такое явление носило название парадокса Сэндиджа.

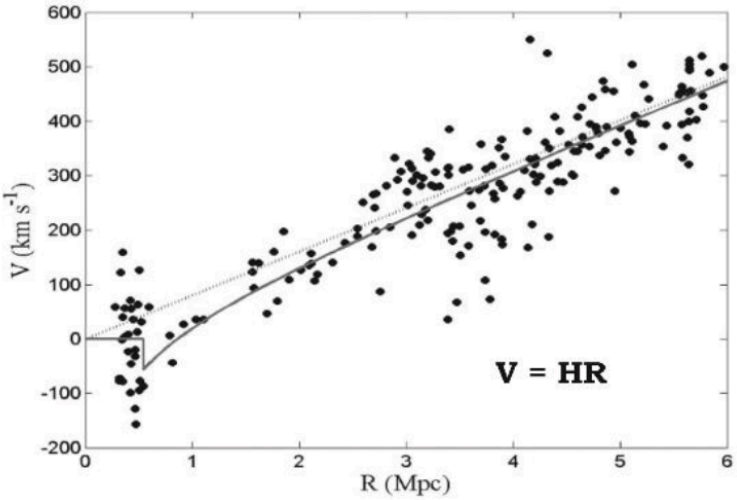


Рис. 10.8. Диаграмма Хаббла.

Пересчитаем все галактики, находящиеся на расстоянии меньшем 1 Мпк:

$$R < 1\ Mpc = 3 \text{ млн св. л.} \tag{10.19}$$

$$\rho_\Lambda V = M_{\text{вещества}} \tag{10.20}$$

Так, чем больше объем, тем больше энергия вакуума будет побеждать, а значит, побеждает антигравитация: управляет движением галактик и выстраивает их по закону Хаббла. Это т.н. открытие локальной темной энергии.

Песня про темную энергию. Мироздание Глинера.

Свойство темной энергии предположительно простое. Если мы действительно обнаружили постоянную Эйнштейна (антигравитацию, связанную с константой), то ее значение равно

$$\rho_\Lambda = \frac{\Lambda}{8\pi G} = const \tag{10.21}$$

Такую Вселенную, где есть только пустота – и больше ничего (только темная энергия), впервые построил французский физик Де Ситтер в 1920 г.

Опишем Вселенную будущего, в которой победит темная энергия, а остальные энергии исчезнут. У такой Вселенной Де Ситтера через каждую точку проходит множество линий и можно найти такую систему отсчета/поезд «Москва-Ленинград»/велосипед, в которой Вселенная будет стоять на месте – в каждой точке все треугольники будут вечны во времени (вечная Вселенная, описываемая одним числом). Такая Вселенная обладает удивительным свойством, которое впервые заметил Глинер: есть в нее бросить две пробные частицы (частицы, обладающие массой, но настолько малой, что они не меняют саму задачу, а лишь чувствуют силы), то они сразу начнут бегать вдоль прямых линий, убегать друг от друга (подобно открытым Слайфером галактикам) по следующему закону:

$$V = RH = R_0 e^{Ht} \tag{10.22}$$

Глинер считает, что есть некое мироздание, пространство-время, наполненное темной энергией. Если в нем, из-за неких квантовых флуктуаций, вылетят протоны, электроны или атомы водорода, то они тут же начнут расширяться друг от друга так же, как расширяется рожденная Вселенная в момент инфляции. Так, он предлагает, что идет цикл бесконечного рождения.

Вселенная Линде (МГУ)

Такая точка зрения сливается со стохастической моделью Линде. На рис. (10.9) – типичная модель стохастического рождения Вселенной. Так, согласно модели Линде, Вселенная происходит, если скалярное поле флуктуирует и выскакивает из виртуального за счет чистой флуктуации квантов. Тогда оно приобретает следующее уравнение состояния:

$$p = -u \tag{10.23}$$

Таким образом Вселенная начинает экспоненциально разбухать. Аналогично рис. (10.9) может рождаться новые отросточки (бесконечное возникновение разных Вселенных).

Рис. 10.9. Стохастическая мультивселенная Линде напоминает канарский кактус.

Мир, подверженный уравнению Ланжевена, и порождает такие Вселенные:

$$V = F(x) + f(t) \tag{10.24}$$

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Лекция 11. Великое молчание

А дальше? Дальше - Великое Молчание!

Так, мы почти полностью прослушали курс, в котором узнали о том, как рождается Вселенная: сначала вместе с учеными построили неправильную вселенную, а затем текущую, лишенную парадоксов. Вместо них появились компоненты неизвестной природы. Нам осталось рассмотреть парадокс Ферми или, как я его еще можно назвать, Молчание Вселенной. На рис. (11.1) изображена эволюция ее эволюция. Большой взрыв объясняется тем, что скалярное поле расталкивает Вселенную: за время порядка не больше 70-80 планковских времен она раздувается до гигантских размеров. Стадия инфляции позволила выделила Вселенной время на то, чтобы стать одинаковой, в каком направлении на нее ни посмотреть. Жизнь же возникает уже после 5-7 млрд лет, а Солнце – после 6-7 млрд лет (следует понимать, что оно – звезда второго или второго с половиной поколения звезд).

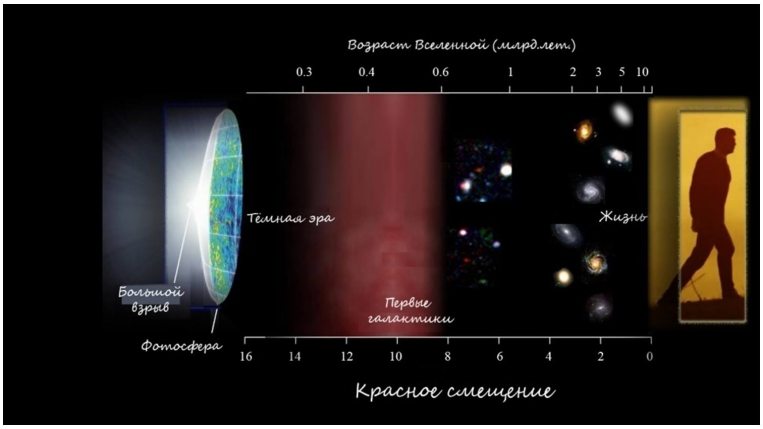


Рис. 11.1. Эволюция Вселенной.

Сколько планет во Вселенной?

Вопрос о том, сколько жизни может быть во Вселенной упирается в вопрос о количестве планет. Примерно 10 лет назад был запущен телескоп WASP (11.2). Он представляет из себя набор маленьких телескопов диаметром 15-20 см. Так, они наводятся на небо и постоянно снимают один и тот же участок неба и ждут, снимая/просматривая около 6000 звезд в месяц – тогда можно будет поймать явление, называемое «транзитом»: так, если есть звезда и вокруг нее есть планета, а планета лежит плоскостью орбиты в луче зрения, то эта планета будет «чиркать» по звезде и уменьшать ее блеск. Планеты, которые открываются таким образом, называются экзопланетами.

Рис. 11.2. Телескоп WASP.

Такой телескоп в начале 2000-х открыл около ста планет. После этого полетел Кеплер и довел число открытых планет до двух тысяч.

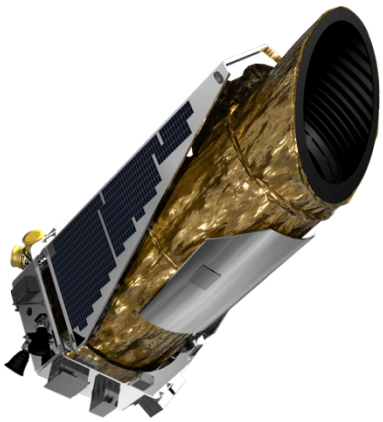


Рис. 11.3. Телескоп Кеплер.

Если этот результат обобщить на всю галактику, то окажется, что в ней находятся миллиарды планет. Великое молчание начинает обостряться.

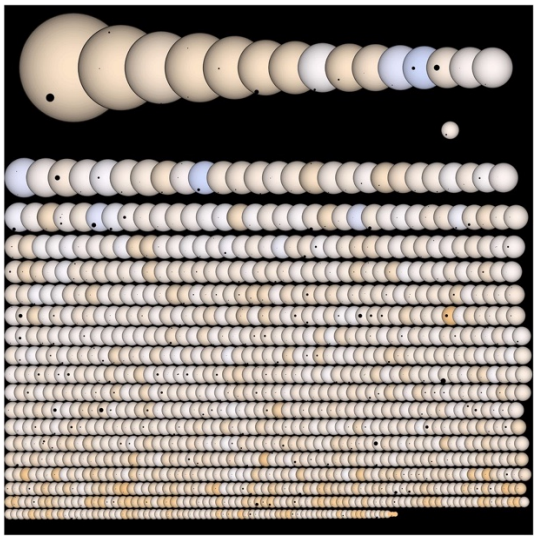


Рис. 11.4. Планеты/звезды Кеплера.

Так, мест для образования жизни в нашей Вселенной и в нашей галактике, в частности, достаточно.

Разум как инфляционный процесс

Рассмотрим, как развивалась наша цивилизация (рис. 11.5). Важно отметить, что никогда еще в истории человечества люди не жили в такой обстановке, что мир менялся за время их жизни.

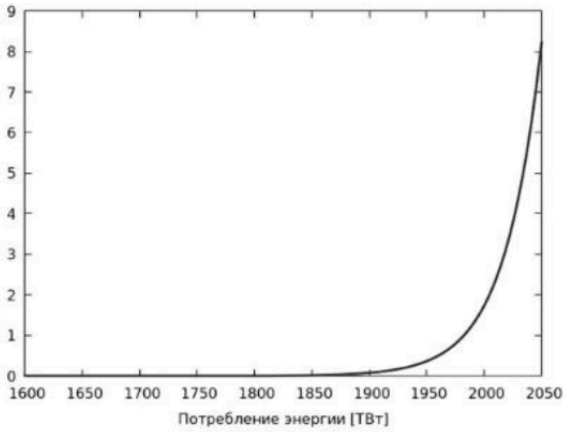


Рис. 11.5. «Золотой Век».

$$t{\sim}T = 100 \text{ лет} = 3 * 10^9 \text{с} \quad (11.1)$$

$$N = N_0 e^{t/T} \quad (11.2)$$

Получается, в нашем мире существует три инфляции.

$$\frac{1}{H_0} \gg \frac{1}{H_{\text{цивилизации}}} \gg \frac{1}{H_{\text{инфляции}}} \quad (11.3)$$

Парадокс Ферми и Число N3

$$N1 = \frac{10 \text{ млрд лет}}{10^{-8} \text{ с}} = 5 * 10^{26} \quad (11.4)$$

$$N2 = \frac{\rho_{\text{Планка}}}{\rho_\Lambda} {\sim} 10^{121} \quad (11.5)$$

$$T = \frac{1}{H_0} \approx 10 \text{ млрд лет}; \ \tau = 100 \text{ лет} \quad (11.6)$$

Если взять цивилизацию такой, какая она сейчас, и дать ей развиваться в течение хаббловского времени, то ее мощность выросла бы в

$$N3 = \exp\left(\frac{T}{\tau}\right) \approx 10^{43\,000\,000} \quad (11.7)$$

В 40-е – 50-е годы Ферми работал в Манхэттенском проекте по созданию атомной бомбы, именно в то время и прозвучал парадокс Ферми. Так, он услышал в столовой, как ученые спорили между собой, есть ли жизнь во Вселенной. В ответ на это Ферми сказал, что если бы жизнь и была, то их космические корабли уже давно были бы в солнечной системе, а после обратил внимание на Японию, где удвоение продукции происходило за 10 лет.

Так, если дать нашей цивилизации пожить хотя бы несколько тысяч лет, то ее мощность достигнет мощности, при которой рождалась Вселенная, а значит, она начнет рождать Вселенную.

Решить этот процесс можно, введя некоторое ограничение: либо мы живет в искусственной Вселенной, что противоестественно для естественного ученого, либо принять, что технологические цивилизации живут недолго.

Посчитаем цивилизации

Посмотрим, сколько времени нужно дать цивилизации, чтобы она исчезла из галактики.

$$N_{\text{Цивилизаций}} = pv^*t \tag{11.8}$$

$$v^* = 1 \text{ шт/год} \tag{11.9}$$

– функция Солпитера – скорость образования звезд в нашей галактике, p – доля звезд, порождающих технологические цивилизации типа наших. Звезды образуются в тонком газопылевом диске толщиной h в несколько сотен световых лет и радиусом примерно $R = 30$ тыс. световых лет. Полный объем этого своеобразного инкубатора равен

$$\text{V} = \pi R^2 h \approx 3 * 10^9 \text{ кубических световых лет} \tag{11.10}$$

Среднее расстояние в световых годах между цивилизациями:

$$D = D^* p^{-\frac{1}{4}} = 1000 p^{-\frac{1}{4}} \text{ световых лет} \tag{11.11}$$

Контакта не будет, если время жизни цивилизации меньше, чем

$$t < t^* p^{-\frac{1}{4}} = 1000 p^{-\frac{1}{4}} \text{ лет} \tag{11.12}$$

Через сколько лет мы научимся порождать искусственные Вселенные?

Посчитаем, через сколько цивилизация достигнет максимальной мощности в природе:

$$E_{max} = Mc^2 \tag{11.13}$$

$$t_{min} = R_g/c \tag{11.14}$$

$$L_{max} = \frac{E_{max}}{t_{min}} = \frac{c^5}{G} \approx 2{,}4 * 10^{52} \text{ Вт} \tag{11.15}$$

$$L_{pl} = \frac{E_{pl}}{t_{pl}} = \frac{c^5}{G} \approx 2{,}4 * 10^{52} \text{ Вт} \tag{11.16}$$

$$L_0 e^{\frac{t}{\tau}} = \frac{c^5}{G} \rightarrow \tag{11.17}$$

$$t_{max} = 100 \ln\left(\frac{L_{max}}{L_0}\right) \text{ лет} \approx 6000 \text{ лет} \tag{11.18}$$

Простая Вселенная

Рассмотрим первую гипотезу, согласно которой цивилизации долго не живут и подумаем, что может прекратить ее развитие. Мы знаем, что механика Ньютона вошла как некая часть механики Эйнштейна, а механика движения тел Эйнштейна вошла как часть квантовой механики; затем возникла теория гравитации Эйнштейна. Сейчас же все ждут теорию квантовой гравитации. Действительно ли так будет повторяться или Вселенная достаточно проста, чтобы через «пару таких Эйнштейнов» все закончилось? Похожа ли Вселенная на матрешку (чем больше знаний, тем больше граница с непознанным)? Простой мир маловероятен, но возможен.

Миллион лет средневековья. Нетривиальный прогресс.

Если же мир развивается и усложняется, то всегда найдутся ученые, которые смогут построить нетривиальный прогресс. Представим себе реку: у нее может быть стационарное и нестационарное течение. В стационарном течении заброшенный рыбаком поплавок всегда ведет себя одинаково. Нестационарное состояние сродни паводку, который может смыть этот поплавок. Нетривиальный прогресс рассматривает реку, в одной части которой может быть стационарное, а в другой – нестационарное течение.

Парадокс Циолковского

В XIX веке, когда жил Константин Эдуардович Циолковский, Вселенная была бесконечная, как и ее возраст – в уравнениях Ньютона не было ее начала и конца.

$$N3 = e^{\infty} = \infty \tag{11.19}$$

Циолковский понимал, что раз Вселенная бесконечно долго существует, то в ней каждый последний атом и электрон разумны, так как за бесконечное время рано или поздно появится это разумное вещество. Однако затем появились работы Слайфера и Хаббла, которые доказали, что Вселенная не вечная. Тогда остается вопрос о том, что было, когда самой Вселенной не было. Если ее не было, то и формула Циолковского не действует, а существа или разума не существует.

А что такое время?

Однако вдруг это время «без Вселенной» напоминает настоящее? Представим, что мы находимся на Земле, а мимо пролетает корабль со скоростью V с двумя зеркалами и зайчиком, бегающим между ними. Если бы мы сидели на корабле, то зайчик возвращался бы через время два расстояния между зеркалами, деленных на скорость света. Однако мы сидим на Земле, несущейся со скоростью 30 км/с, а Солнце - 200 км/с вокруг центра, галактика - 500 км/с. Значит, где-то есть наблюдатели, для которых зайчик летит как на рис. (11.7). Так, если сидеть на корабле, то секунда будет одна, а если снаружи – то секунда будет гораздо длиннее и будет казаться, что время на космическом корабле течет медленнее.

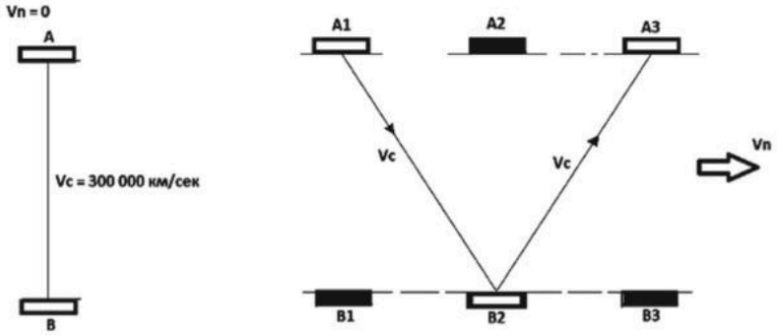


Рис. 11.6. Опыт Эйнштейна.

Так, нет никакого времени и смысла говорить бесконечно живет Вселенная или нет, ведь это зависит от системы отсчета. Однако, такое время Эйнштейна нехорошее: так как мир

Ньютона/Эйнштейна/квантовой механики так же обратим, как и формула Ньютоновского движения (второй закон):

$$\text{a} = \frac{F}{m} \tag{11.20}$$

$$-a = -\frac{F}{m} \tag{11.21}$$

Реальный же мир не такой. Время Эйнштейна течет по-разному, но не описывает настоящее, так как нельзя вернуться назад той же дорогой - об этом нам рассказывает термодинамика.

Энтропия растет как сорняк на грядке, а остается прекрасной незнакомкой

Если взять следующее выражение из термодинамики,

$$I + S = const, \tag{11.22}$$

то станет понятно, что энтропия – это обратная величина информации. Тогда мы понимаем, почему, если энтропия растет, вернуться назад невозможно (т.к. информация уменьшается, а значит мы забываем дорогу назад). Поэтому построить машину времени достаточно проблематично.

Великое молчание будущего

Тем не менее, в будущем можно придумать машину времени, где элементарная частица из квантовой механики совершит следующую петлю:

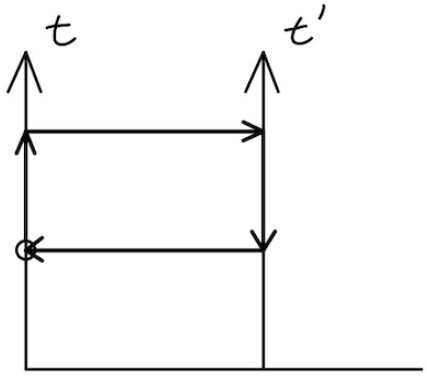


Рис. 11.7. Путешествия во времени Новикова.

Согласно Новикову, пока машина времени не придумана – к нам никто прийти не может, но как только она будет изобретена, то с того времени к нам и будут приходить люди. На практике нечто похожее уже было сделано в квантовой механике: представим, что существует два фотона. Если что-то сделать с фотоном в будущем, то в прошлом он перевернет свою поляризацию. Это связано с тем, что в квантовой механике есть допущение о том, что все элементарные частицы одинаковы.

Бесконечно сложный мир

Ранее мы говорили о реке и стационарной-нестационарной Вселенной. Так, Линде придумал стационарную Вселенную. Она напоминает кактус, который мы рассматривали в прошлой лекции, однако отличается тем, что она обитаема (кактус

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

цветет). Так, такая модель серьезно рассматривается, а Вселенная снова стала стационарной. В ней снова будет выполняться парадокс Циолковского.

Любимая философская теория: а существует ли такая последняя теория, после которой Вселенная будет познана? Все-таки, простая схема с матрешкой не подходит, ведь что за уравнение, описывающее все и вся, в котором нет создателя этого уравнения? Более вероятен бесконечно сложный мир, непознаваемый, нежели познаваемый. Простой мир можно сделать только искусственно, невозможно познать часть настоящего мира, не познав его полностью.

Что есть Сверхразум, и что есть будущая наука о бесконечно сложном Мире? Может ли вообще человеческий разум создать хотя бы примитивную модель, теорию, концепцию бесконечно сложного непознаваемого по частям объекта? В рамках современной науки – вряд ли.

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Лекция 12. "Что делать?"

Введение

Мы узнали, зачем нужна темная энергия, темная материя, Великое молчание. Что же делать дальше, после того как мы узнали, в какой Вселенной живем? Нас не много, тех, кто однажды вышел в степь широкую и увидел на небосклоне Вселенную. Небосвод, будто старинный театральный занавес перед началом спектакля еще не поднялся и скрывает великую тайну бытия. Мы с тревогой ждем начала этого прекрасного спектакля, яркого, блистающего, наполненного фантастическими событиями. Иначе, отчего сквозь продырявленное звездами бездонное черное полотно, оттуда, с той неизведанной, скрытой стороны, пробивается к нам таинственный мерцающий ее отблеск.

Гравитационные волны открыты!

Гравитационные волны 1916 г. были предсказаны Альбертом Эйнштейном сразу после того, как он открыл общую теорию относительности и написал уравнение гравитации. Так, если есть система двух масс, и одна вращается вокруг другой, то эта двойная система излучает следующее количество энергии на единицу времени:

$$L = \frac{32}{5}\frac{G^4}{c^5}\frac{M_1^2 M_2^2 (M_1+M_2)}{A^5} \tag{12.1}$$

$$M(m_1, m_2) - (m_1 + m_2)\left(\frac{m_1}{m_2} + \frac{m_2}{m_1}\right)^{-\frac{3}{5}} = m_2(1+q\,)(q+q^{-1})^{-\frac{3}{5}} \tag{12.2}$$

Так, двойные звезды обязательно являются источником гравитационных волн.

Как поймать гравитационные волны?

Для того, чтобы поймать грав-волну, необходимо измерить расстояния между предметами. На рис. (12.1) стрелочками показаны силы, прикладываемые гравитационной волной, к предметам, расположенным на ее пути.

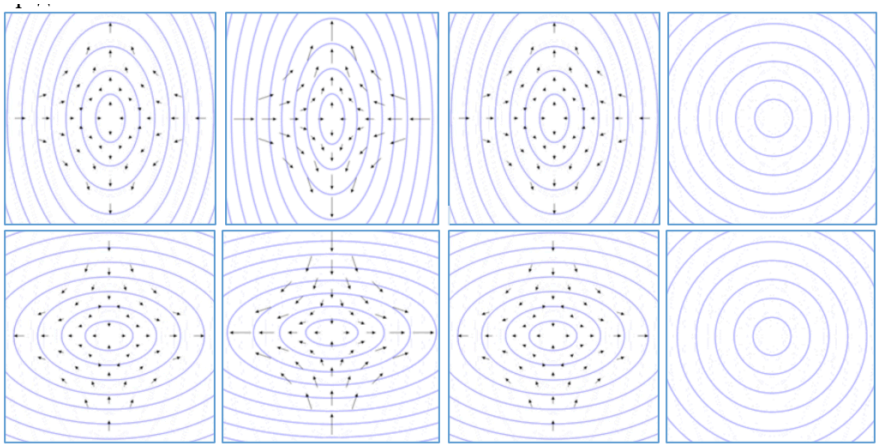


Рис. 12.1. Гравитационная волна.

Первым такой эксперимент предложил американский физик Джозеф Вебер, однако он оказался неудачным. В 1962 г. Михаил Герценштейн, Григорий Пустовойт и Владимир

Брагинский предложили, что лучше всего использовать интерферометр Макельсона (рис. 10.1).

Машина сценариев - искусственная Вселенная

Под моделью искусственной Вселенной понималась Вселенная без темной материи/энергии, но с двойными звездами, - в ней можно было увидеть все стадии эволюции, включая самые поздние. Зачерненная область на рис. (12.2), - рассчитанная на основе современной теории эволюции двойных звезд область вероятной частоты регистрации. Область велика – много неизвестных параметров, но на везде значительно выше частоты детектирования сигнала от сливающихся нейтронных звезд (полоса $NS + NS$). Диаграмма показывает, что первыми будут открыты сливающиеся черные дыры.

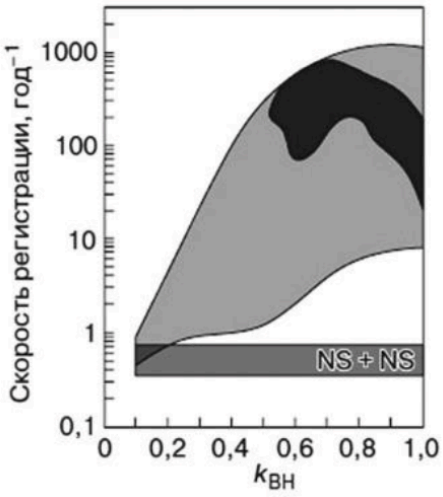


Рис. 12.2. Ожидаемая скорость регистрации гравитационно-волновых всплесков от слияния нейтронных звезд и черных дыр в зависимости от неизвестного пока параметра k_{BH} – доли вещества звезды, уходящего в черную дыру в момент ее образования.

На рис. (12.3) – тот самый интерферометр, схема которого изображена на рис. (10.1).

Рис. 12.3. Детектор обсерватории LIGO в Ханфорде, штат Вашингтон (другой – в Ливингстоне, штат Луизиана).

Первые наблюдения были начаты в 1995-96 г., а реальный результат был получен через 20 лет, в 2015 г.

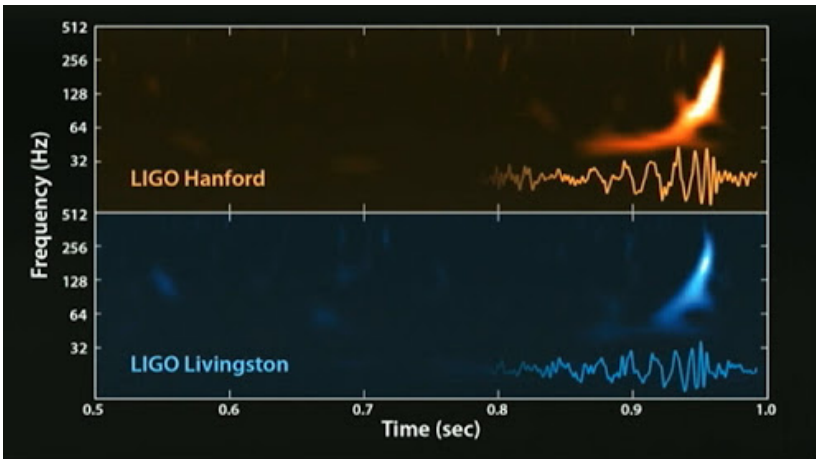


Рис. 12.4. Частота гравитационных волн. Результаты наблюдений.

Что такое гамма-лучи?

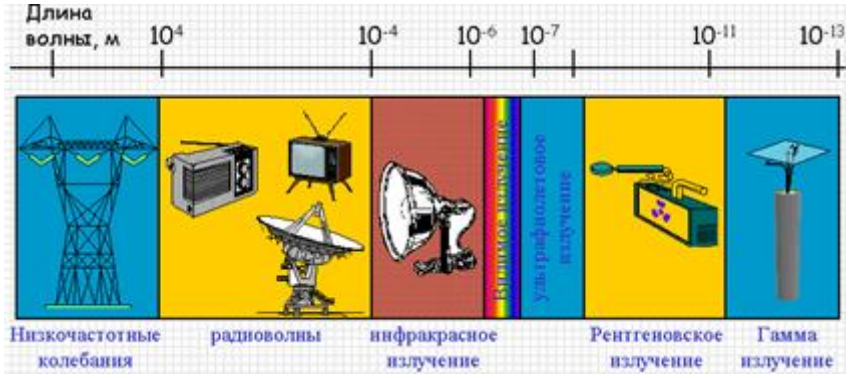


Рис. 12.5. Шкала электромагнитных волн.

Если посмотреть на небо в гамма-диапазоне, то оно постоянно вспыхивает. Такие вспышки называют гамма-всплесками. Сам гамма-эксперимент устроен следующим образом:

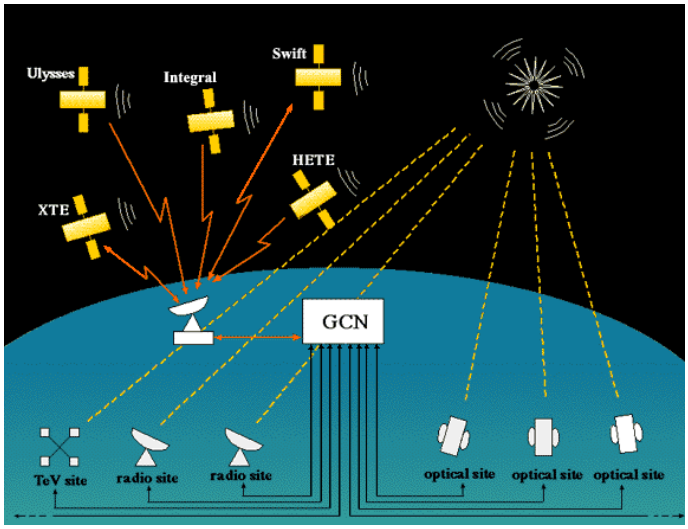


Рис. 12.7. Global Astrophysical Experiment (GCN).

17 августа 2017 года телескопы запечатлели столкновение нейтронных звезд, а значит, электромагнитное излучение стало возможным.

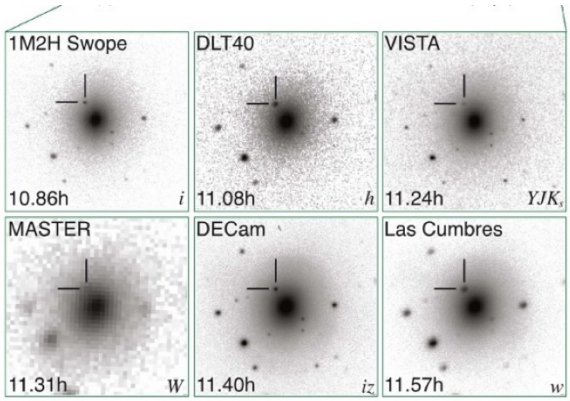


Рис. 12.8. Оптическая вспышка, запечатленная шестью телескопами.

Русский Космический проект

Николай Федорович Федоров впервые заявил о том, что перед восстановленным во всей полноте человечеством лежит путь к освоению всего космического пространства, в котором человек играет важнейшую роль носителя Разума, является той силой, которая противостоит разрушению и тепловой смерти Вселенной, которая неизбежно наступит, если человек откажется от своей роли проводника Божественных Энергий в тварный мир. Идеи Федорова и позже вдохновляли создателей русской космонавтики. Его труды, изданные после смерти мыслителя в 1903 г. последователями, В. А. Кожевниковым и Н. П. Петерсоном под названием «Философия общего дела» внимательно читал С. П. Королев.

Идея Федорова передалась К. Э. Циолковскому: «многие думают, что я хлопочу о ракете и беспокоюсь о судьбе из-а самой ракеты. Это было бы глубочайшей ошибкой. Ракеты для меня только способ, только метод проникновения в глубину космоса, но отнюдь не самоцель. Не доросшие до такого понимания вещей люли говорят о том, чего не существует, что делает меня каким-то однобоким техником, а не мыслителем так думают, к сожалению, многие, кто говорит или пишет о ракетном корабле».

Супертелескопы

Важнее всего в астрономии XXI века – открытие жизни во Вселенной. Для этого нужны не просто телескопы, а супертелескопы.

(GTC)	(TMT)	(E-ELT)	(GTS)
Большой Канарский	**Тридцатиметровый**	**Европейский**	**Супертелескоп**
Телескоп	**Телескоп**	**Чрезвычайно большой телескоп**	**«Гагарин»**
Диаметр зеркала: 10м	Диаметр зеркала: 10м	Диаметр зеркала: 10м	Диаметр зеркала: 10м
(построено в Испании)	(строится США)	(строится Европой)	Россия

Рис. 12.9. Проекты телескопов.

Великие космические свершения первой половины XXI века

Такие свершения включают в себя:

- Полет человека на Марс: (сверх) тяжелая ракета
- Открытие жизни во Вселенной (ESA, USA, телескоп «Гагарин»)
- Открытие космологических гравитационных волн (LISA): «что было, когда ничего не было?»
- Открытие природы антигравитации: темная энергия
- Система предупреждения космических угроз: глобальные наземные и космические сети

ФИЗИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ
МГУ ИМЕНИ
М.В. ЛОМОНОСОВА

teach-in

ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ