

Продолжение. См. № 17–21/05

Проф. **Б.И.ЛУЧКОВ**, МИФИ, г. Москва

# Элементарная астрофизика и космология

ДЛЯ ШКОЛЬНОГО КУРСА ФИЗИКИ

Учебный план курса

Учебный план курса

№ газеты	Лекция
17	<b>Лекция 1.</b> Наш космический дом: Солнце, планеты, Земля
18	<b>Лекция 2.</b> Энергетика звёзд. Галактики, скопления галактик
19	<b>Лекция 3.</b> Эволюция звёзд – от протозвёзд до Сверхновых. <b>Контрольная работа № 1</b> (срок выполнения – до 15 ноября 2005 г.)
20	<b>Лекция 4.</b> Образование элементов (таблица Менделеева)
21	<b>Лекция 5.</b> Иные миры (экзопланеты, проблема <i>SETI</i> )
22	<b>Лекция 6.</b> Космологические модели. Вселенная Большого Взрыва. <b>Контрольная работа № 2</b> (срок выполнения – до 30 декабря 2005 г.)
23	<b>Лекция 7.</b> Эхо из прошлого – реликтовое излучение. Стандартная модель Вселенной
24	<b>Лекция 8.</b> Нерешённые проблемы: чёрные дыры, тёмная материя, тёмная энергия, антропный принцип, барионная асимметрия мира
<p><b>Итоговая работа.</b> В качестве итоговой работы засчитывается разработка занятий по одной из тем, рассматриваемых в рамках данного курса. На основе этой разработки слушателем должен быть проведён урок (уроки). Краткий отчёт о его (их) проведении в виде конспекта мероприятия на трёх листах А4, фотографий с места событий и справка из учебного заведения (акт о внедрении) должны быть отправлены в Педагогический университет не позднее 28 февраля 2006 г.</p>	

## ЛЕКЦИЯ 6. КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ. ВСЕЛЕННАЯ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА

Никто не обнимет необъятного.  
*Козьма Прутков*

Космология – часть современной астрофизики, занимающаяся исследованием мира в целом. Для обозначения мира наиболее часто используется слово «Вселенная», иногда с добавкой «видимая», подчёркивающей, что за пределами нашей «видимости» может находиться ещё очень большая часть Вселенной. Часто применяется термин «Метагалактика», по своему смыслу – весь ансамбль галактик, что эквивалентно «видимой Вселенной».

Космология – исследование Вселенной в её наиболее крупном масштабе. Другие разделы астрофизики рассматривают отдельные её составляющие: звёзды, межзвёздную среду, галактики. Ясно, что такой глобальный подход требует новых методов исследования и, более того, поиска новых закономерностей, чем те, которые управляют Солнечной системой или Галактикой. Зная, как устроен отдельный кирпич, нельзя ничего сказать о доме, построенном из кирпичей. Из физики звёзд не вывести общие закономерности развития мира.

Космология является фундаментальной наукой, открывающей новые законы природы. По сути, фунда-

ментальных наук, закономерности которых полностью не известны, только две: физика элементарных частиц и космология, одна – для микро-, вторая – для макромира. Именно здесь наука стоит перед **неизвестным**, выяснением чего будет возрастать и сильно изменяться наше понимание мира. Интересно, что эти науки, изучающие совершенно сопоставимые по масштабу явления, начинают сближаться, всё более завися друг от друга. Сейчас происходит их синтез. Без знания физики элементарных частиц не удаётся продвинуться в космологии дальше, к началу мира. В равной мере без новых открытий в космологии невозможно понять природу элементарных частиц: спектр масс, число и свойства взаимодействий. Фундаментальность, возможно, и является тем базисом, на котором эти науки сольются в одно общее направление.

На современном этапе космология есть комплекс идей и подходов, взятых у ряда наук (физика, математика, философия), используемых для построения моделей, описывающих эволюцию Вселенной. Космологические модели должны рассматриваться с позиций общей теории относительности (ОТО), наиболее развитой современной теории гравитации. Однако такой анализ сложен из-за трудностей математического аппарата. Много проще рассматривать модели Вселенной в рамках нерелятивистской (ньютоновской) теории, но она внутренне противоречива и ограничена. И все же

такой «облегченный» подход, как показали *Е.Милл* и *В.Маккри* в 1934 г., даёт качественно правильные результаты. Он и будет использоваться в лекции в сопоставлении с более строгими выводами на основе ОТО.

Основная роль в космологии принадлежит гравитации (ввиду её дальнего действия). Но ядерные и слабые силы тоже очень важны. Будет уделено внимание выводу моделей, анализу взаимодействий частиц. Рассмотрим в историческом плане развитие космологических идей.

### 1. Стационарные модели Вселенной

Представление об окружающем мире появилось на заре цивилизации, но даже во времена античной науки (Египет, Греция, Рим) затрагивало лишь ближайшее окружение Земли – Солнечную систему, – а не всю Вселенную. Первая космологическая модель появилась тогда, когда было осознано (Ньютон, XVIII в.), что звёзды – это далёкие солнца, и их совокупность представляет мир, «данный нам в наблюдениях».

#### Стационарная однородная евклидова модель (СОЕ).

В модели, предложенной Ньютоном, Вселенная бесконечна во времени и пространстве, подчинена «плоской» геометрии Евклида и равномерно заполнена звёздами. СОЕ-модель держалась полтора столетия. Было показано, что звёзды группируются в галактики, и структурными единицами («частицами») стали галактики и их скопления. Однородность Вселенной означает, что она равномерно, с одинаковой плотностью во всех частях, заполнена «частицами». Основанием СОЕ служило представление о том, что каждая «частица» испытывает одинаковое гравитационное притяжение со всех сторон ввиду бесконечности и однородности мира. Вселенная – газ невзаимодействующих «частиц». Однако достаточно рано появились сомнения в правоте СОЕ-модели, высказанные в форме парадоксов (противоречий), к которым она неизбежно приводила.

*Фотометрический парадокс* (*Г.-В.Ольберс*, 1826 г.) возник при попытке ответить на вопрос: «Почему ночное небо тёмное?» Свечение неба представляет собой общее излучение всех «частиц»-источников, не затенённое Солнцем, и в бесконечной Вселенной должно быть очень ярким. Проведём простой расчёт. Свет к наблюдателю приходит от источников, окружающих его со всех сторон (рис. 1). Разобьём пространство на сферические слои толщиной настолько малой, что расстояние до источников в каждом слое  $r_i + \delta r$  можно с достаточной точностью считать равным  $r_i$ . Световой поток, приходящий к наблюдателю в телесном угле  $\omega$ , можно записать в виде ряда  $F = \omega \Sigma (F_i N_i) / (4\pi)$ ; сумма берётся от  $i = 1$  до  $i = \infty$ . Парциальные потоки от источников  $i$ -го слоя

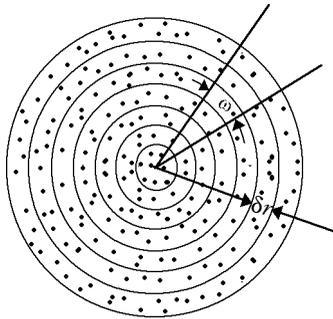


Рис. 1. К выводу парадокса Ольберса

равны  $F_i = L / (4\pi r_i^2)$ , где  $L$  – средняя светимость источников (введение распределения источников по светимости усложняет расчёт, но не изменяет результат), число источников в  $i$ -м слое составит  $N = 4\pi r_i^2 \delta r \cdot n$ ,  $n$  – плотность источников. С ростом  $r_i$  поток  $F_i$  убывает как  $1/r_i^2$ , а число  $N_i$  растёт как  $r_i^2$ , так что произведение  $F_i N_i$  постоянно по всем слоям, и суммарный поток  $F = \omega L n \Sigma \delta r / 4\pi \rightarrow \infty$ . Более подробный анализ показывает, что  $F$  конечная, хотя и достаточно большая, величина. Это следует из того, что ближайший к наблюдателю источник непрозрачен для более далёких на том же луче зрения, и свет будет приходить только от ближайших источников. Но на каждом луче (а их бесконечное число) будет источник с поверхностной яркостью, как у звёзд ( $T \approx 10^4$  К). Следовательно, такую же поверхностную яркость должно иметь всё небо, чего на самом деле не наблюдается. Реальное распределение источников, как видно в телескоп, совсем другое – они занимают малую часть поля зрения. Фотометрический парадокс опровергает СОЕ-модель и является пробным камнем для любой другой космологической модели.

*Гравитационный парадокс* (*Г.Зеелигер*, 1895 г.). Поведение «частиц» определяется решением уравнения Пуассона для скалярного гравитационного потенциала  $\phi$ :  $\Delta \phi = 4\pi r G$ , где  $\Delta$  – лапласиан,  $\rho$  – средняя плотность «частиц»,  $G$  – ньютоновская постоянная гравитации. Потенциал сферического облака «частиц» радиуса  $r_0$  и сила  $F$ , действующие на пробную «частицу» массы  $m$ , расположенную на краю облака, равны:  $\phi = -GM/r_0$ ,  $M = 4\pi r_0^3 \rho / 3$  – полная масса облака;  $F = -m \text{ grad} \phi$ .

В бесконечной Вселенной выбор центра произволен. В зависимости от расположения пробной «частицы» потенциал и сила будут различны:  $\phi = 0$ , когда «частица» в центре облака,  $\phi = -GM/r_0$  – конечная величина, если «частица» находится на радиусе  $r_0$ , и  $\phi = -\infty$  в случае  $r_0 \rightarrow \infty$ . В этом и состоит парадокс: гравитационный потенциал и сила, действующие на пробную «частицу», неопределённые. Для его разрешения надо предположить: либо Вселенная не бесконечна, либо неприменима ньютоновская теория тяготения.

Зеелигер сделал попытку устранить парадокс. Он изменил ньютоновский потенциал так, чтобы на большом расстоянии он не был бесконечным, для чего ввёл в уравнение Пуассона дополнительный член, учитывающий гипотетическое отталкивание «частиц». Новое выражение для потенциала  $\phi_n = \phi e^{-\lambda r}$ , которое совпадает с предыдущим на расстояниях  $r \ll 1/\lambda$  и переходит к постоянному значению  $\phi_n = -4\pi r G / \lambda^2$  на расстояниях  $r \geq 1/\lambda$ . Однако решение Зеелигера, устраняя бесконечность потенциала, не разрешает полностью гравитационного парадокса.

*Термодинамический парадокс.* Если Вселенная бесконечна во времени, все процессы в ней должны прийти к состоянию термодинамического равновесия и вещество должно находиться в состоянии «тепловой смерти». Наблюдаемая активность звёзд и галактик показывает, что ничего похожего в реальной Вселенной не наблюдается.

Если Вселенная бесконечна во времени, все процессы в ней должны прийти к состоянию термодинамического равновесия и вещество должно находиться в состоянии «тепловой смерти». Наблюдаемая активность звёзд и галактик показывает, что ничего похожего в реальной Вселенной не наблюдается.

**Стационарная однородная неевклидова модель (СОНЕ).** СОНЕ-модель предложена Эйнштейном в 1915 г., сразу после создания ОТО: Вселенная стационарна и однородна, но её геометрия неевклидова – мир замкнут, ограничен в пространстве и обладает положительной кривизной («сферический мир» *А.Эйнштейна*). За счёт пространственной ограниченности Вселенной удаётся устранить недостатки СОЕ-модели и сохранить бесконечность Вселенной во времени, отказаться от которой космология долго не могла. Эйнштейн считал, что «небеса делятся от вечности к вечности».

Вместо уравнения Пуассона в ОТО рассматривается система уравнений, связывающая метрический тензор  $g_{ik}$ , определяющий геометрию пространства-времени, с тензором энергии-импульса  $T_{ik}$ , являющимся источником гравитации:

$$R_{ik} - g_{ik} R/2 = 8\pi GT_{ik}/c^4, \quad (1)$$

где  $R_{ik}$  – тензор локальной кривизны,  $R$  – среднее по всем  $i, k$ ;  $i(k) = 0$  – временная координата,  $i(k) = 1, 2, 3$  – три пространственные координаты.

Оказалось, что система (1) не имеет стационарного решения. В случае слабого поля (скалярный потенциал  $\phi \ll c^2$ ) 10 уравнений (1) сводятся к одному, в точности равному уравнению Пуассона в СОЕ-модели, которое, как мы видели, не обладает стационарным решением. Чтобы добиться стационарности, Эйнштейн ввёл дополнительный член в уравнение:

$$R_{ik} - g_{ik} R/2 - \Lambda g_{ik} = 8\pi GT_{ik}/c^4. \quad (2)$$

Добавка  $\Lambda$ -члена аналогична добавке, введённой Зелигером. Чисто математически она приводит к тому, что система (2) имеет стационарное решение. Физический смысл добавки  $\Lambda g_{ik}$  крайне велик: это учёт антигравитации, равномерно распределённой во всём пространстве, что можно представить, как отталкивание тел физическим вакуумом. Введённая Эйнштейном космологическая постоянная  $\Lambda$  очень мала ( $\sim 5 \cdot 10^{-57} \text{ см}^{-2}$ ) и практически не проявляется в масштабе планетных и звёздных систем, динамика которых полностью определяется гравитацией входящих в систему масс. Но в масштабе Метагалактики  $\Lambda g_{ik}$  выступает как вторая, необходимая для равновесия, сила, в результате чего и становится возможным стационарное состояние.

Мир Эйнштейна представляет собой трёхмерную сферу с положительной кривизной пространства (двухмерный аналог – обычная сферическая поверхность). Радиус трёхмерной сферы  $r_{\Sigma} = \Lambda^{-1/2}$  и есть радиус кривизны пространства. Границ у Вселенной нет, как нет её у двухмерной сферической поверхности, но она имеет конечный объём  $V_{\Sigma} = 2\pi^2 r_{\Sigma}^3$ , конечную плотность  $\rho_{\Sigma} = c^2 \Lambda_{\Sigma} / (4\pi G)$  и строго определённую массу  $M_{\Sigma} = \rho_{\Sigma} V_{\Sigma}$ . Так как кривизна пространства до сих пор не установлена, в качестве оценки  $r_{\Sigma}$  можно взять максимальное значение – наблюдательный радиус Вселенной  $r_{\phi} \approx 10^{28}$  см. Тогда  $V_{\Sigma} = 2 \cdot 10^{85} \text{ см}^3$ ,  $\rho_{\Sigma} = 10^{-29} \text{ г/см}^3$ ,  $M_{\Sigma} = 2 \cdot 10^{56} \text{ г}$ , что составляет  $10^{12}$  галактик, массой

нашей Галактики каждая. Такой состав Вселенной не противоречит современным данным. Вследствие ограниченности мира и проявления на больших расстояниях сил антигравитации в нём естественно разрешаются фотометрический и гравитационный парадоксы, но остаётся термодинамический, законность которого для всего мира оспаривалась в то время. Вполне разумный и эстетически приемлемый мир Эйнштейна пришёл в противоречие не с основами ОТО. Его опровергли данные наблюдений. Американский астроном *Э.Хаббл* в 1929 г. открыл красное смещение линий в спектрах далёких галактик, что означает их разлёт и легко объясняется линейным эффектом Доплера. Происходит равномерное увеличение масштаба мира. Вселенная изменяется и должна быть представлена нестационарной моделью. Её предложил *А.Фридман* за несколько лет до экспериментального подтверждения.

## 2. Нестационарные модели Вселенной

*Александр Фридман*, русский физик, математик, метеоролог, в работах 1922–1924 гг. нашёл нестационарное решение уравнения (1), открыв совершенно новый мир – эволюционирующий, ограниченный во времени. Он вступил в полемику с *А.Эйнштейном*, встретившим открытие в штыки. В 1924 г. *А.Фридман* умер от тифа в Петрограде.

Очевидно, с отказом от стационарности мира нет явной необходимости в силах антигравитации. Появились разные классы фридмановских решений: с  $\Lambda = 0$  (мир без антигравитации) и с  $\Lambda \neq 0$  (мир с антигравитацией), причём космологическая постоянная может быть отлична от  $\Lambda_{\Sigma}$ .

**Нестационарные однородные модели без антигравитации.** Вселенная изменяется во времени, однородна и в общем случае неевклидова. В таких предположениях существуют несколько решений, отличающихся сценариями развития. Все они – фридмановские, т.к. впервые их «увидел» *А.Фридман*.

Существенное значение в нестационарных моделях играет однородность и изотропия Вселенной. Однородность отсутствует в малых масштабах (звёзды, галактики, скопления галактик) и хорошо согласуется с наблюдениями, начиная с  $r > 10^{26}$  см. Для таких расстояний галактики и скопления галактик равномерно покрывают весь небесный свод. Можно заключить, что изотропной и однородной Вселенная была на всех этапах своего развития, а неоднородность в малом масштабе возникла в определённый момент в результате флуктуаций плотности и гравитационной неустойчивости вещества. Единственным видом нестационарности, совместимым с однородностью, может быть лишь радиальное изменение – равномерное расширение (сжатие) мира. Двухмерная аналогия – растяжение поверхности шара (рис. 2), на котором точки *A* и *B* будут разлетаться со скоростью  $v_{AB} = Hr_{AB}$ ,  $H$  – коэффициент, не зависящий от координат.

В ньютоновском приближении найдём нестационарные сценарии мира, для чего рассмотрим сферу, равномерно с плотностью  $\rho$  заполненную «частицами» (рис. 3). Запишем уравнение для силы, действующей

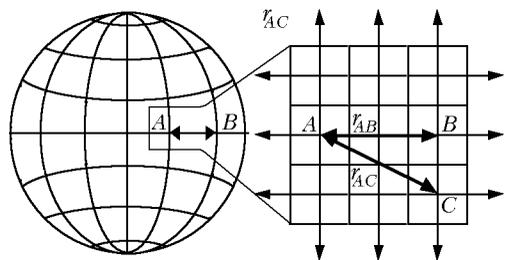


Рис. 2. Двухмерная аналогия расширяющейся Вселенной на пробную «частицу» А, находящуюся на радиусе  $r$ :

$$m_{\text{н}} \frac{d^2 r}{dt^2} = - \frac{m_{\text{т}} G M}{r^2}, \quad (3)$$

где  $m_{\text{н}}$ ,  $m_{\text{т}}$  – инертная и тяготеющая массы пробной «частицы»;  $M = 4\pi r^3 \rho / 3$  – суммарная масса «частиц», притяжение которых испытывает А. Согласно принципу эквивалентности ОТО обе массы (вызывавшие так много споров до Эйнштейна) тождественны и могут быть в уравнении (3) сокращены. Современные эксперименты подтверждают равенство  $m_{\text{н}} = m_{\text{т}}$  с точностью до слабых сил ( $10^{-12}$ ). Правая и левая части уравнения (3) линейны по  $r$ , замена  $r$  на  $ar$  не изменяет уравнения. На этом основании под  $r$  следует понимать масштабный фактор (а не радиус мира, условно представленный сферическим «облаком» на рис. 3). Задача – проинтегрировать уравнение (3) и получить зависимость масштабного фактора от времени.

Так как  $\rho \sim 1/r^3$ ,  $\rho r^3 = \text{const} = \rho_0$ . Первое интегрирование даёт

$$\left( \frac{dr}{dt} \right)^2 \cdot \frac{1}{2} = -k + \frac{4\pi\rho_0 G}{3r}, \quad (4)$$

где  $k$  – постоянная интегрирования, зависящая от начальных условий образования «облака». Можно показать, что  $-k = (E_{\text{кин}} + E_{\text{пот}})/m = E_{\text{пол}}/m$  – мера полной энергии пробной «частицы» при  $t = 0$ . В точном решении ОТО  $k$  – начальная кривизна пространства.

Дальнейшее решение зависит от значения  $k$ .

**Плоская Вселенная ( $k = 0$ ).** Полная энергия пробной «частицы» равна нулю. Кинетическая энергия полностью компенсируется потенциальной энергией при-

тяжения «облака». В этом случае

$$\left( \frac{dr}{dt} \right)^2 = \frac{8\pi\rho_0 G}{3r}. \quad (5)$$

Скорость изменения масштабного фактора уменьшается с расширением мира и на бесконечном радиусе равняется 0. Проинтегрировав выражение (5), получаем временную зависимость масштабного фактора (рис. 4, кривая 1):

$$r = (6\pi G \rho_0)^{1/3} t^{2/3}. \quad (6)$$

Это модель плоского мира, или модель Эйнштейна–де Ситтера (1932 г.). Термин *плоский мир* отражает тот факт, что в этом частном случае мир (трёхмерный, а вовсе не плоский) описывается евклидовой геометрией на плоскости: кривизна пространства нулевая и сумма углов треугольника  $\Sigma\varphi = 0$ . Скорость расширения мира получим, подставив в (5)  $\rho_0 = \rho r^3 \rightarrow v^2 = (dr/dt)^2 = (8\pi G \rho / 3) r^2$ . Это тот же закон линейного расширения – следствие однородности и изотропии мира, коэффициент  $H^2 = 8\pi G \rho / 3$ . В этой модели плотность вещества однозначно связана с  $H$ , её называют *критической*:

$$\rho_{\text{к}} \neq \frac{3H^2}{8\pi G}. \quad (7)$$

В плоской Вселенной  $\rho \sim 1/t^2$ . При  $t = 0$  плотность бесконечна (сингулярное состояние, из которого «вышел» мир). Возможно, это математическая абстракция, связанная с тем, что классическая ОТО применена к малым  $r$  и  $t$ . Как считают, бесконечности удастся избежать при учёте квантовых эффектов в будущей квантовой теории гравитации.

**Замкнутая Вселенная ( $k > 0$ ).** Полная энергия пробной «частицы» отрицательная; кинетическая энергия разлёта меньше модуля потенциальной энергии. Мир гравитационно связан. Расширение не будет беспредельным, как в плоской модели. Предельное значение масштабного фактора получим из (4), положив  $dr/dt = 0 \rightarrow r_{\text{max}} = 4\pi G \rho_0 / (3k)$ . Чем больше  $k$ , тем меньше  $r_{\text{max}}$ , тем сильнее связан мир.

Выполнив второе интегрирование, получим зависимость масштабного фактора от времени, которое в этом случае описывается уравнением циклоиды – кривой,

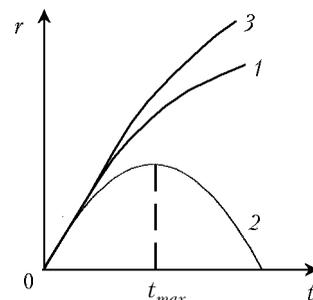


Рис. 4. Зависимость масштабного фактора от времени в плоской (1), замкнутой (2) и открытой (3) моделях

достигающей максимума через время  $t_{max}$  (см. рис. 4, кривая 2). Для  $t > t_{max}$  мир сжимается: «частицы»-галактики сближаются, линии излучения смещаются в синюю часть спектра. Восходящая ( $t < t_{max}$ ) и нисходящая ( $t > t_{max}$ ) ветви циклоиды симметричны. Через время  $t = 2t_{max}$  мир снова вернётся в исходную сингулярность. Из неё мир может опять расширяться, циклы расширение–сжатие бесконечны (в прошлом и будущем). Модель «пульсирующей Вселенной» интересна тем, что в ней не возникает вопроса: «Что было до сингулярности?» Однако сингулярность не объясняется в ОТО, и «пульсирующая модель» не получила развития.

Причина замкнутости мира – в торможении разлёта галактик их гравитационным притяжением. Критерий модели:  $\rho > \rho_{кр}$ . Такому условию удовлетворяет целое семейство решений с разными  $k$ , расположенных ниже кривой  $r(t)$  плоской Вселенной.

Геометрия замкнутой Вселенной неевклидова, с положительной кривизной пространства (геометрия трёхмерной сферы). Теорема о сумме углов треугольника имеет вид

$$\Sigma\varphi = \pi + SC, \quad (8)$$

где  $S$  – площадь треугольника,  $C = 1/R_{кр}^2$  – кривизна пространства.

**Открытая Вселенная** ( $k < 0$ ). Полная энергия пробной «частицы» положительна, кинетическая энергия превышает энергию гравитационного притяжения. Мир не связан, причём скорость разлёта имеет конечную величину даже на бесконечном радиусе:  $dr/dt = (-2k)^{1/2} > 0$ . Критерий открытой Вселенной:  $\rho < \rho_{кр}$ . Зависимость масштабного фактора от времени (см. рис. 4, кривая 3):  $r \sim t^{2/3}$  для малых  $t$ ,  $r \sim t$  для больших  $t$ .

Геометрия открытой Вселенной – трёхмерный гиперболоид, неевклидово пространство с отрицательной кривизной ( $R_{кр}$  мнимый). Двухмерный аналог – поверхность седловины. Сумма углов треугольника, согласно формуле (8), меньше  $\pi$ .

Три класса фридмановских моделей (замкнутая, плоская, открытая) – результат действия только одной силы – гравитации – при разной плотности вещества. Мир замкнут, когда доминирует гравитационное притяжение, мир открыт, если доминирует энергия разлёта. Пограничный между этими двумя семействами вариант – единственная модель плоской Вселенной, когда эти факторы равны.

**Модель Горячей Вселенной.** Горячая Вселенная (ГВ) была предложена Георгием Гамовым в 1946 г. В отличие от фридмановских моделей, где вещество даже в сингулярности холодное, ГВ предполагает, что в момент рождения плотность и температура вещества бесконечны. Гамов назвал такое рождение мира Большим Взрывом (*Big Bang*). К уравнению движения пробной «частицы» добавляется уравнение энергии облака «частиц» под воздействием давления излучения. Совместное решение уравне-

ний приводит к тем же трём вариантам (замкнутому, плоскому и открытому) ГВ с несколько отличной временной зависимостью масштабного фактора ( $r \sim t^{1/2}$ ) и температуры поля излучения ( $T \sim t^{-1/2}$ ) в плоском варианте. ГВ описывает начальные этапы развития Вселенной, когда энергия излучения превышала энергию вещества, и плавно переходит к фридмановским моделям при изменении соотношения энергий, неизбежном в расширяющемся мире.

ГВ – реальный факт. Её веское доказательство – открытие теплового реликтового излучения. Дополнительное свидетельство – космологический синтез гелия (см. лекцию 4), результат которого хорошо согласуется с наблюдаемой распространённостью гелия (25% по массе) и водорода (73%).

**Нестационарные модели с антигравитацией.** Космологическая постоянная  $\Lambda \neq 0$ . Антигравитация вакуума проявляется как взаимодействие, зависящее не от масс материальных объектов (вещества, излучения), а только от расстояния. Отталкивание линейно растёт с расстоянием, т.е. пропорционально слою вакуума между объектами. Ввиду очень малой, до сих пор точно не известной  $\Lambda$ , антигравитация не проявляется в масштабах планетарных и звёздных систем. Так, ускорение отталкивания Земли от Солнца из-за вакуума, заполняющего 1 а.е. =  $1,5 \cdot 10^{13}$  см, на 23 порядка меньше, чем ускорение, вызванное притяжением Солнца. Звёздные скопления, галактики не замечают антигравитации. Только на космологических расстояниях ( $r > 10^{26}$  см) противодействующие силы – антигравитации вакуума и притяжения – становятся сопоставимыми.

### 3. Модель стационарной Вселенной (СВ)

Эта последняя из великих космологических моделей была выдвинута Ф.Хойлом, Г.Бонди и Р.Гоулдом в 1948 г. Авторы исходили из обобщённого космологического принципа, согласно которому Вселенная однородна относительно сдвигов во времени и в пространстве. Мир стационарен, но не статичен (как у Ньютона и Эйнштейна). Расширение Вселенной, открытое Хабблом, в рамках СВ во все времена было таким, как мы его наблюдаем сейчас. Это значит, что коэффициент  $H$  в законе Хаббла  $dr/dt = Hr$  – постоянная, не зависящая от времени. Интегрируя это уравнение, получаем для масштабного фактора  $r = e^{Ht}$  и для плотности вещества  $\rho \sim r^{-3} \sim e^{-3Ht}$ . В СВ плотность постоянна, поэтому уменьшение  $\rho$ , вызванное расширением мира, должно «компенсироваться» образованием нового вещества:  $d\rho/dt = -3H\rho + D = 0$ , где  $D$  – скорость «творения» вещества. Источники нового вещества неизвестны, оно может образовываться равномерно во всем пространстве или в «особых точках» (например, в квазарах). Можно думать, что новое вещество «втекает» из другого мира, с которым наш мир находится в контакте. Скорость образования вещества легко оценить:  $d\rho/dt = 0 \rightarrow D = 3H\rho \approx 1$  пара нуклон-антинуклон/(км<sup>3</sup>·год) для известных  $H$  и  $\rho$ . Предполагается, что вещество образуется с соблюдением законов сохранения электрического, барионного и других зарядов, но, есте-

ственно, с нарушением закона сохранения энергии (мир – не изолированная система). Величина  $D$  мала и не может быть определена путём прямого эксперимента, но в масштабе всей Вселенной должна приводить к достаточно заметным эффектам.

Модель СВ необычна, на первый взгляд, «безумна»: согласно ей происходит саморождение вещества и не сохраняется энергия. В то же время она поражает изяществом и глубиной, осуществляя синтез стационарного мира Эйнштейна с данными наблюдений. Вещество втекает из другого мира и разлетается на бесконечность в результате антигравитации вакуума ( $\Lambda = 2\Lambda_3$ ). В целом у мира нет истории – он одинаков во все времена. Но местная эволюция – образование новых звёзд и галактик – постоянно происходит, т.к. новое вещество даёт пищу для их развития. Такому миру не грозит тепловая смерть. Удачно разрешаются и другие парадоксы. В целом СВ логически не противоречива, а эстетически даже привлекательна.

И всё же она должна быть отброшена. Ей противостоят наблюдения, определённо указывающие на изменение мира: тепловое реликтовое излучение, температура которого вблизи квазара в несколько раз больше, чем у Земли, концентрация и светимость радиогалактик в разные эпохи и другие данные, подтверждающие нестационарность мира.

#### 4. Кинематика Вселенной (наблюдения)

Итак, есть ряд конкурирующих моделей. Но Вселенная только одна. Какую модель она выбрала? Обратимся к результатам астрономических наблюдений, чтобы из числа возможных выбрать единственную, соответствующую нашему миру. Найдя её, будем знать не только прошлое Вселенной, но и то, что ждёт нас в будущем.

*Космологическое красное смещение.* Скорость галактики по лучу зрения наблюдателя выражается через параметр

$$Z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}, \quad (9)$$

где  $\lambda$ ,  $\lambda_0$  – длины волн принятой и испущенной линии излучения в спектре галактики.  $Z$  связано с эффектом Доплера – изменением частоты излучения движущегося источника. Если источник удаляется от наблюдателя,  $\lambda > \lambda_0$  и  $Z > 0$  (красное смещение), если приближается,  $\lambda < \lambda_0$  и  $Z < 0$  (синее смещение).  $Z = 0$  для неподвижного источника.

В начале XX в. спектральный анализ вошёл в астрофизику и его стали применять для слабо светящихся галактик. В 1917 г. американский астроном *В. Слайфер* указал на преобладание галактик с красным смещением. Окончательно, на большой статистике, этот факт установил *Э. Хаббл* в 1929 г., завершив измерения на самом большом в мире телескопе (обсерватория Маунт-Вилсон). За исключением нескольких с  $Z < 0$ , все галактики показали красное смещение, т.е.

удалялись от нас. Это – выдающийся результат: Вселенная расширяется, мы живём в нестационарном мире.

*Закон Хаббла.* Из данных наблюдений Хаббл вывел закон зависимости скорости галактик от расстояния  $dr/dt = Hr$ , точно соответствующий тому, что было получено теоретически Фридманом несколькими годами ранее. Линейность закона установлена до расстояний, доступных в то время ( $r \sim 2$  Мпк).

Закон Хаббла не означает выделенности земного наблюдателя. Точно такой же вид разлетающихся галактик предстанет наблюдателю в любой точке мира. Скорости галактик не ложатся строго на линейную зависимость. Кроме общего изменения масштаба, что отражает закон Хаббла, галактики имеют собственные (пекулярные) скорости, которые равны отклонениям  $\delta v$  от прямой. Именно пекулярные скорости дают синее смещение близких галактик. Эти скорости не велики, с увеличением  $r$  их влияние уменьшается, и все далёкие галактики показывают красное смещение. Расширение масштаба мира не проявляется в размерах связанных систем – галактик, их скоплений. Закон Хаббла строго выполняется только для скоплений, принимаемых как точечные «частицы». Это хорошо видно по скоростям членов Сверхскопления в Деве, в состав которого

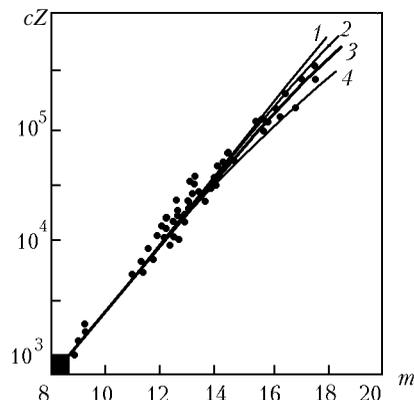


Рис. 5. Зависимость красного смещения от блеска для далёких галактик:

■ – область, исследованная Хабблом (1 –  $\rho = 10 \rho_{кр}$ ); 2 –  $\rho = 5 \rho_{кр}$ ; 3 –  $\rho = 2 \rho_{кр}$ ; 4 – модель СВ

входит и Млечный Путь.

В настоящее время закон Хаббла продолжен до предельно далёких расстояний ( $r \sim 10^{28}$  см). На рис. 5 показан его современный вид – зависимость  $cZ$  от звёздной величины (блеска) галактики. Чем дальше галактика, тем больше её величина. Теория предсказывает отклонение от линейного закона, в основном связанное с тем, что скорость удаления не может превышать скорость света. Приведённые кривые 1–4 – результаты расчёта для разных вариантов. Как видно, пока нельзя сделать выбор в пользу какой-либо одной.

Постоянная Хаббла  $H$  не строгая константа. В моделях Фридмана она зависит от времени ( $H \sim t^{-1}$  в плоской Вселенной), но для нашей эпохи ( $t \sim 10^{10}$  лет) практически постоянна. Постоянная Хаббла – один из важнейших параметров мира, от которого зависит выбор модели. Сейчас  $H = 70$  км/(с · Мпк). Величина  $\tau = 1/H = 1,5 \cdot 10^{10}$  лет –

приблизительный возраст Вселенной.

Закон Хаббла можно «обратить» – по измеренному  $Z$  и величине  $H$  определить  $r$  и  $t$  далёкой галактики. Для  $Z \ll 1$  ( $v \ll c$ , нерелятивизм) получаем

$$r = cZ/H = R_{\phi} Z, \quad (10)$$

где  $R_{\phi} = c\tau = 2 \cdot 10^{28}$  см – фотометрический радиус мира (горизонт видимости).

Для  $Z \geq 1$  ( $v \approx c$ , релятивизм) получаем

$$r = R_{\psi} \frac{(Z+1)^2 - 1}{(Z+1)^2 + 1}, \quad t \approx \tau - \frac{r}{c}. \quad (11)$$

Параметр красного смещения далёких объектов неограниченно растёт. В пределе они находятся на фотометрическом радиусе: при  $Z \rightarrow \infty \lim r = R_{\phi}$ . Заглянуть за  $R_{\phi}$  нельзя – этому противоречит конечность скорости света. Из (11) следует, что наблюдение далёких объектов означает переход к малым космологическим временам, к ранним этапам развития Вселенной.

*Возраст Вселенной.* Хаббловское время  $\tau = 1/H$  даёт верхний предел возраста Вселенной  $t_b$ , т.к. не учитывает гравитационное торможение разлёта. В разных вариантах фридмановской модели  $t_b$  имеет разное значение:

– плоская Вселенная:  $r = Ct^{2/3}$ ,

$$t_b = \frac{2\tau}{3} = 10^{10} \text{ ЛЕ}$$

– замкнутая Вселенная:  $t_b < 10^{10}$  лет;

– открытая Вселенная:  $1,5 \cdot 10^{10} > t_b > 10^{10}$  лет.

Возраст звёзд и Галактики не должен превышать  $t_b$ , что даёт возможность выбора модели. Возраст старых звёзд в шаровых скоплениях, определённый по диаграмме Г–Р, составляет  $t_{зв} = (0,7 \div 1,3) \cdot 10^{10}$  лет. Возраст Галактики, который находился по соотношению изотопов урана и тория в наше время и теории их синтеза в звёздах, не столь надёжен:  $t_{Г} = 1,5 \cdot 10^{10}$  лет. Из сравнения с  $t_b$  видно, что предпочтительна открытая модель. Однако всё может измениться, если  $\Lambda \neq 0$ . К тому же тест по времени жизни  $t_b$  обладает недостатком: Вселенная слишком молода, наше время близко к «началу», в результате чего её возрасты в разных вариантах мало отличаются друг от друга.

*Средняя плотность материи.* Величина постоянной Хаббла, известная из прямых наблюдений  $v$  и  $r$  галактик, определяет критическую плотность  $\rho_{кр} = 3H^2/(8\pi G) = 10^{-29}$  г/см<sup>3</sup>. Для выбора модели надо измерить среднюю плотность вещества в мире и сравнить её с  $\rho_{кр}$ . Средняя плотность  $\rho_{ср}$  находится по измерению удельной светимости  $L$  участков неба, в которых нет близких ярких источников. Предполагая, что свечение создано далёкими галактиками, яркость которых слишком низка, чтобы выделить их над общим фоном, можно записать:  $\rho_{ср} = L\Sigma_i (M/L)_i$ , где  $\delta$  и  $M/L$  – доля и отноше-

ние масса/светимость разных типов галактик (нерегулярные, спиральные, линзовидные, эллиптические). При этом предполагается, что далёкие (невидимые) галактики такие же, как наблюдаемые на близких расстояниях. В результате наблюдений многих групп получили:  $L = 2,2 \cdot 10^{-10} L_{\odot}/\text{пк}^3$  и  $\rho_{ср} = 5 \cdot 10^{-31}$  г/см<sup>3</sup> =  $0,05\rho_{кр}$ , откуда, казалось, следует выбор открытой модели. На самом деле полученная оценка средней плотности материи – всего лишь нижняя граница, т.к. относится к светящейся материи. В мире достаточно много несветящихся (или слабо светящихся) форм вещества – чёрные дыры, нейтронные звёзды, облака холодного газа, потоки нейтрино. В дополнение к этим известным формам существует тёмная материя (ТМ), природа которой не известна.

Приведённые тесты не дали точного выбора модели Вселенной. Решение «проблемы мира» несколько неожиданно взяло на себя реликтовое излучение. Сейчас «проблема» практически решена.

#### Вопросы и задания для самоконтроля

1. Какие наблюдательные данные противоречат СОЕ-модели?
2. Как разрешается фотометрический парадокс в нестационарной космологии?
3. Почему был отвергнут стационарный мир Эйнштейна?
4. Перечислите варианты нестационарной модели Фридмана.
5. Что утверждает закон Хаббла?
6. Чем объясняется красное смещение линий в спектрах далёких галактик?

#### Литература

- Пиблс П. Физическая космология. – М.: Мир, 1975.  
Силк Дж. Большой Взрыв. – М.: Мир, 1982.  
Новиков И.Д. Эволюция Вселенной. – М.: Наука, 1990.  
Луцков Б., Июдин А. Ядерные реакции и космология. – М.: МИФИ, 1982.

#### КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 2

1. Составьте таблицу этапов термоядерного синтеза элементов в звёздах (колонки: стадия звезды, температура, реакции синтеза, интервал масс ядер). (За каждый правильно описанный этап – 0,5 балла.)
2. В каких земных условиях можно экспериментально исследовать  $s$ - и  $r$ -процессы? (2 балла.)
3. Определите временной интервал, за который были образованы ядра дейтерия и гелия (космологический синтез гелия). (2 балла.)
4. Перечислите методы поиска экзопланет. (3 балла.)
5. Почему на криогенном спутнике Юпитера Европа может существовать океан жидкой воды? (3 балла.)
6. Как изменяется масштаб мира в моделях Фридмана? (2 балла.)
7. Какой параметр красного смещения имеют близкие и далёкие галактики? (2 балла.)
8. Что доказывает правоту модели Горячей Вселенной (3 балла.)

**КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 2**

к курсу Б.И.Лучкова «Элементарная астрофизика и космология для школьного курса физики»

Контрольная работа должна быть отправлена до 30 декабря 2005 г. по адресу: ул. Киевская, д. 24, г. Москва, 121165, Педагогический университет «Первое сентября».

Фамилия	<input type="text"/>
Имя	<input type="text"/>
Отчество	<input type="text"/>
Идентификатор (указан в вашей персональной карточке)	<input type="text"/>

Если у вас есть вопросы или замечания по курсу в целом, то запишите их в поле «Комментарии».

Комментарии

---



---



---



---

**Уважаемые слушатели курсов повышения квалификации!**

Контрольная работа включает 8 заданий по материалу трёх последних пройденных лекций проф. Б.И.Лучкова «Элементарная астрофизика и космология для школьного курса физики», требующих как качественного, достаточно краткого ответа, так и решения численных задач.

Оценка контрольной работы производится по системе «зачёт/незачёт». Для получения зачёта необходимо набрать не менее 10 баллов («стоимость» каждой задачи указана в её условии).

Если вы приложите к заданию конспект одной из работ, указанной в списках рекомендуемой литературы трёх лекций, это принесёт вам дополнительный балл, который также будет учтён при подведении итогов вашего обучения.

**Требования к оформлению конспекта**

Объём конспекта должен составлять не более трёх страниц формата А4 (1800 знаков на странице) и представлен в машинописном (компьютерном) варианте. В заглавной части следует указать автора, название работы, выходные данные, количество страниц.

**Требования к оформлению задания**

Контрольную работу следует выполнять на листах формата А4. Просим выслать контрольную работу вместе с заполненным бланком или его ксерокопией.