

## 9.2. Современные космологические модели Вселенной

Вплоть до начала XX в. никакой глобальной эволюционной теории развития Вселенной не могло существовать, поскольку классическое естествознание ориентировалось преимущественно на изучение статики физических систем. В классической науке господствовала теория стационарного состояния Вселенной. Это не значит, что она игнорировала движения небесных тел: изучались движения планет и комет, описывались звезды, создавались их классификации.

Однако подразумевалось, что в процессе таких движений «все возвращается на круги своя», иными словами, сами такие движения являются неизменными: Луна вращается вокруг Земли по одной и той же орбите, по одним и тем же орбитам вращаются планеты и движутся кометы. Иначе говоря, вопрос об эволюции Вселенной не ставился.

В этом аспекте ньютоновская картина Вселенной оставалась наследницей аристотелевской парадигмы, в которой Космос также полагался неизменным. Однако фундаментальные положения ньютоновской космологии приводили к существенным противоречиям, осмысление которых произошло в виде космологических парадоксов, вытекающих из постулата о бесконечности Вселенной.

**Гравитационный парадокс.** Если Вселенная бесконечна и в ней существует бесконечное число небесных тел, то в соответствии с законом всемирного тяготения Ньютона сила тяготения применительно к любому материальному телу во Вселенной бесконечно велика. В результате Вселенная не может быть вечной, поскольку все вещество Вселенной должно неминуемо сжиматься к центру. Этот парадокс получил название «парадокс Неймана — Зелигера» в честь немецких ученых К. Неймана (1832—1925) и Х. Зелигера (1849—1924). Парадокс вытекает из того, что закон всемирного тяготения не отвечает на вопрос о гравитационном поле, создаваемом бесконечной системой масс.

**Фотометрический парадокс.** Если повсюду в бесконечном пространстве стационарной Вселенной имеются излучающие звезды, то в любом направлении взгляда наблюдателя в луч его зрения должно попасть бесконечное число таких звезд, пусть и слабо светящихся. Однако бесконечная сумма слабо светящихся (или практически невидимых) тел на воображаемом небосводе должна давать ослепительно яркую точку. Поскольку такое должно происходить на любом направлении взгляда наблюдателя, то и вся поверхность неба должна представляться ослепительно яркой, подобной, например, поверхности Солнца (рис. Фотометрический парадокс).

Очевидная аналогия: сколь бы редким ни был лес, но, если он достаточно велик, путник в этом лесу ощущает себя окруженным стеной из деревьев, поскольку в каком бы направлении он ни бросил взгляд, его глаз рано или поздно «наткнется» на какое-либо дерево.

Сформулирован этот парадокс в 1744 г. швейцарским астрономом Ж.-Ф. Л. де Шезо (1718—1751), но иногда называется парадоксом Г. В. Ольберса (1758—1840), который привлек к нему внимание исследователей в 1826 г.

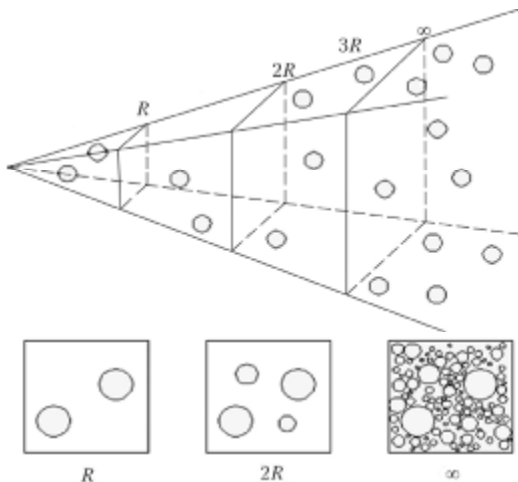


Рис. Фотометрический парадокс

Оба этих парадокса неразрешимы в рамках космологии Ньютона. Они заставили ученых задуматься над следующими вопросами:

- Действительно ли Вселенная является бесконечно древней?
- Не возникла ли она в прошлом и нельзя ли выявить момент такого возникновения?

- Действительно ли Вселенная бесконечна в пространстве?
- Не является ли она пространственно ограниченной и незамкнутой?

Однако в то время, когда были сформулированы космологические парадоксы, наука их разрешить не могла.

Предпосылки их разрешения возникли с созданием ОТО: появился необходимый математический аппарат для описания эволюционирующей Вселенной. Другая группа предпосылок связана с развитием физики микромира. Как выяснилось впоследствии, закономерности микромира и мегамира тесно связаны друг с другом.

Такие модели основываются на ОТО А. Эйнштейна, согласно которой метрика пространства и времени определяется распределением гравитационных масс во Вселенной. Основное уравнение тяготения, введенное А. Эйнштейном в ОТО, имеет не одно, а несколько решений, что обусловило формирование различных космологических моделей Вселенной.

**Первая** такая модель была создана самим А. Эйнштейном в 1917 г. В ней Вселенная была представлена в виде четырехмерной сферы, объем которой конечен, но поверхность безгранична. (Аналогия: муха, ползущая по поверхности глобуса, нигде не найдет его границ.) Вселенная А. Эйнштейна содержала хотя и большое, но ограниченное число звезд, поэтому космологические парадоксы к ней неприменимы в принципе. Вместе с тем он сохранил принцип стационарности Вселенной и ее неизменности во времени.

История физики полна парадоксов. Десятью годами раньше А. Эйнштейн сумел сделать чрезвычайно смелые выводы из открытия М. Планка (сам Планк в 1911 г. стремился опровергнуть собственное открытие). Однако в данном случае Эйнштейн не поверил собственным математическим выкладкам. Из его уравнений вытекало, что Вселенная расширяется, но астрономия того времени была уверена в стабильности и неизменности Вселенной. Поэтому А. Эйнштейн искусственно ввел в уравнения ОТО так называемый лямбда-член, характеризующий, по его мнению, дополнительную силу отталкивания на больших расстояниях, которая могла бы обеспечить стационарность Вселенной.

**Вторая** модель принадлежит голландскому астроному В. де Ситтеру и также является решением уравнений тяготения. Найденное им в 1917 г. решение существовало бы даже в случае Вселенной, свободной от любой материи. Но если же в такой Вселенной появлялись массы, то возникало космическое отталкивание между этими массами, которое стремилось удалить их друг от друга и растворить всю систему.

**Третью** модель разработал в 1922 г. русский исследователь А. А. Фридман (1888—1925), он получил решения уравнений Эйнштейна, описывающих Вселенную с изменяющимся пространством. Его модель характеризовала Вселенную как однородную и изотропную, однако предложенные им решения допускали три варианта кривизны вещества во Вселенной: она могла быть либо нулевой, либо положительной, либо отрицательной.

- Если во Вселенной средняя плотность вещества и излучения равна некоторой критической величине ( $\rho = 10^{29}$  г/см<sup>3</sup>), то мировое пространство является евклидовым, а сама Вселенная находится в состоянии неограниченного расширения от первоначального точечного состояния.

- Если плотность меньше критической, пространство имеет характеристики геометрии Лобачевского (оно искривлено подобно поверхности седла), а Вселенная неограниченно расширяется.

- Если же плотность больше критической, то пространство становится римановым, расширившись до некоторого предела, начинает сжиматься вплоть до первоначального точечного состояния. Пространство этой Вселенной искривляется, замыкаясь на себя и образуя сферу.

Решение Фридмана для случая Вселенной с отрицательной кривизной было опубликовано в авторитетном журнале *Zeitschrift für Physik* в 1922 и 1924 гг. Это решение было вначале отрицательно воспринято Эйнштейном, но затем он признал правоту Фридмана.

Какое из трех решений Фридмана является истинным? Казалось бы, установить это просто: для вычисления средней плотности Вселенной надо ее массу разделить на ее объем. Однако ни объем, ни масса Вселенной не известны, неизвестна поэтому и средняя плотность вещества во Вселенной. Поэтому практически невозможно установить, какая модель Фридмана является наиболее близкой к характеристикам реальной Вселенной.

В 1929 г. американский астроном Э. П. Хаббл (1889—1953) установил, что свет, идущий от далеких галактик, смещается в сторону красного конца спектра («красное смещение»). Объяснить его космологический смысл помогает эффект Доплера (по имени австрийского ученого К. А. Доплера, 1803—1853) — изменение частоты и длины волн, регистрируемых приемником, вызванное движением их источника и (или) приемника.



К эффекту Доплера: увеличение частоты колебаний при приближении источника колебаний к наблюдателю

Если машина с включенной сиреной будет приближаться к наблюдателю, то частота звуковых волн увеличится (длина волны сократится), и наблюдатель услышит более высокий тон, а когда машина будет отдаляться, то наблюдатель услышит более низкий тон (длина волны увеличится).

Поскольку красный цвет соответствует наибольшей длине волны светового спектра, то красное смещение свидетельствовало об удалении галактик от наблюдателя.

Хаббл установил эмпирический закон Хаббла: скорость удаления галактики  $V$  прямо пропорциональна расстоянию до нее, т.е.  $V = Hr$ , где  $H$  - постоянная Хаббла.

Обратной величиной постоянной Хаббла выступает возраст Вселенной. В зависимости от принятой ныне величины постоянной Хаббла этот возраст составляет около 15 млрд лет (чаще всего в литературе указывают 13,7 млрд лет). Таким образом, расширение Вселенной считается ныне научно установленным фактом.

Общая черта рассмотренных космологических моделей — представление о нестационарном, изотропном и однородном характере Вселенной.

**Нестационарность:** Вселенная не может находиться в статическом, неизменном состоянии, а должна либо расширяться, либо сжиматься.

**Изотропность'**, во Вселенной не существует каких-либо выделенных точек и направлений, а ее свойства не зависят от направления.

**Однородность'**, вещество во Вселенной в среднем распределено равномерно.

Эти утверждения нередко называют космологическими постулатами. Сюда добавляют также суждение об отсутствии во Вселенной сил, препятствующих силам тяготения. При таких предположениях космологические модели оказываются наиболее простыми.

**Проблема происхождения и эволюции Вселенной.**

В 1927 г. бельгийский аббат и ученый Ж. Леметр (1894—1966) ввел понятие сингулярности, т.е. сверхплотного состояния (от лат. *singularis* — единственный) для обозначения начала Вселенной. Из расширения Вселенной следует, что в будущем ее объем будет больше нынешнего. Но каким был ее объем в прошлом? Безусловно, меньше

нынешнего, а удаляясь в прошлое все дальше и дальше, неизбежно приходим к точке сингулярности.

Согласно теоретическим расчетам Ж. Леметра в сингулярном состоянии Вселенная представляла собой микрообъект радиусом 10-12 см (сопоставимо с размером ядра атома) и с плотностью — 1096 г/см<sup>3</sup>. От этого состояния Вселенная перешла к расширению в результате Большого взрыва.

Американский исследователь Г. А. Гамов (1904—1968) предложил «космологию Большого взрыва». Такая модель «горячей» Вселенной, разработанная на основе анализа ядерных реакций, протекавших в самом начале расширения Вселенной, была названа стандартной в том смысле, что все другие теоретические модели обладают гораздо меньшими объяснительными возможностями.

### **Информация к размышлению**

В стандартной гипотезе образования Вселенной много еще неясного и спорного. Остается нерешенным вопрос о структуре и состоянии материи первоначальной Вселенной.

По этой причине наряду со стандартной была предложена также гипотеза пульсирующей Вселенной: в ходе своей эволюции Вселенная подвергается периодическому расширению и сжатию. По мнению ее защитников, гипотеза удовлетворительно объясняет наличие гигантского количества фотонов во Вселенной во время циклов ее расширения и сжатия. Однако никаких эмпирических фактов, свидетельствующих о сжатии Вселенной, пока не обнаружено.

В пользу стандартной модели «Большого взрыва» свидетельствуют следующие аргументы:

- эмпирические факты о непрерывном «разбегании» галактик;

- открытие в 1965 г. американскими астрофизиками А. А. Пензиасом (р. 1933) и Р. В. Вильсоном (р. 1936) микроволнового излучения, названного впоследствии реликтовым. Это излучение с температурой около 3 °К, возникшее с началом эры фотонов (примерно через 400 тыс. лет после Большого взрыва), предсказано в рамках теории А. Гамова;

- постулат о разрушении симметрий между микрочастицами (фермионами), с одной стороны, и силами, действующими между ними (бозонами), — с другой;

- в 2000 г. в лаборатории Центра европейских ядерных исследований в Женеве получено новое состояние материи — кварк-глюонная плазма. Предполагается, что в таком состоянии Вселенная пребывала первые 10 мкс после Большого взрыва.

По поводу состояния Вселенной до взрыва существуют лишь некоторые предположения, в частности, кварковая модель. Именно кварки, предположительно, составляли строительный материал для будущих микрочастиц. Эволюция Вселенной после взрыва связана с чрезвычайно высокой начальной температурой вещества. Падение температуры в процессе расширения Вселенной содействовало формированию космологических структур, а также образованию химических элементов.

Для наглядности начальную стадию эволюции Вселенной делят на «эры».

### **Начальное состояние Вселенной.**

Первоначальная плотность сингулярного состояния вещества Вселенной составляла 1093 г/см<sup>3</sup>, а ее первоначальный размер — 10<sup>-33</sup> см.

### **Большого взрыва.**

В результате Большого взрыва 13,7 млрд лет тому назад образовалась не только материя, но и само пространство-время. Выделяют планковский момент — время 10~43 с после Большого взрыва, до которого существовала суперсимметрия — объединение всех физических взаимодействий. После него отделяется гравитационное взаимодействие, через 10<sup>-36</sup> с разделяются сильное и электрослабое взаимодействия, а еще через 10<sup>-10</sup> с электрослабое объединение разделяется на электромагнитное и слабое взаимодействия, и начинается эра адронов.

**Эра адронов** (рождение и аннигиляция адронов и лептонов).

Ее продолжительность —  $10 \cdot 10^{-10}$  с, температура —  $10^{15}$ — $10^{12}$  °К, плотность —  $10^{14}$  г/см<sup>3</sup>. В условиях сверхвысоких температур энергии у-квантов (фотонов) хватало на порождение пар: частица — античастица. Существовали нуклоны, мюоны, электроны и нейтрино различных типов, а также античастицы. В термодинамическом равновесии с веществом находилось электромагнитное излучение — фотоны. В силу огромной плотности вещества Вселенная была непрозрачна для фотонов.

Существовала симметрия между веществом и излучением, обусловленная их взаимопревращением, а также симметрия между веществом и антивеществом. В дальнейшем вещественный мир некоторым, пока неизвестным способом, оказался изолированным от антивещественного. Если бы этого не произошло, все вещество превратилось бы в излучение.

В конце эры аннигилируют нуклоны и антинуклоны. Нуклонов было на одну миллиардную часть больше, и они составили необходимый материал для ядер будущих атомов.

**Эра лептонов** (рождение и аннигиляция лептонов). Ее продолжительность — 10 с, температура —  $10^{10}$  °К, плотность —  $10^4$  г/см<sup>3</sup>. Лептоны аннигилировали в парах «частица-античастица»: мюон-антимюон, электрон-позитрон, при этом происходило образование нейтрино. Взаимодействие фотонов приводило к образованию пары электрон-позитрон, которая, в свою очередь, превращалась в фотоны:  $e^- + e^+ \rightarrow \gamma \gamma$ .

После аннигиляции тяжелых частиц их энергия перешла к более легким частицам. Энергия, освобождавшаяся после аннигиляции легких частиц, повышала температуру излучения. В конце эры за счет слияния протонов и нейтронов формируются ядра гелия. При падении температуры до  $10^{10}$  °К падает и энергия фотонов, которой становится недостаточно для образования пары «электрон-позитрон».

**Фотонная эра** (эра радиации) — преобладание излучения над веществом.

Продолжительность — 10 с — 104 лет. Фотоны составляют основную долю массы-энергии Вселенной. К концу эры температура падает с  $10^{10}$

до  $3000$  °К, плотность — с  $10^4$  г/см<sup>3</sup> до  $10^{-21}$  г/см<sup>3</sup>. Лептоны за счет аннигиляции превращались в излучение: лептоны + антилептоны  $\rightarrow$  у-кванты. Вселенная практически полностью состоит из фотонов и нейтрино, а плотность фотонов на много порядков превосходит плотность частиц, обладавших массой.

Примерно через 10 тыс. лет после Большого взрыва суммарная энергия вещества начинает превосходить суммарную энергию излучения. На смену радиационной эре приходит эра вещества. При температуре  $3000$  °К протоны и электроны объединяются в атомы водорода. На место плазмы приходят нейтральные атомы, прекращается взаимодействие излучения и вещества. Одно из первых следствий такого прекращения — образование звезд.

Вселенная становится прозрачной для излучения. Примерно через 300 тыс. лет после Большого взрыва возникает микроволновое излучение, которое ныне называют реликтовым. Поскольку плотность вещества снижается до  $10^{-20}$  г/см<sup>3</sup>, постольку фотоны реликтового излучения свободно двигаются в расширяющейся Вселенной.

Примерно через 1 мин после Большого взрыва Вселенная остыла настолько, что при столкновении протона и нейтрона стали образовываться ядра дейтерия, а при соударении двух ядер дейтерия — ядра гелия. Примерно за 3 ч до 25% вещества Вселенной за счет дозвездного синтеза превратилось в гелий.

**Звездная эра** длится до сих пор. Вследствие разделения вещества и излучения образовались неоднородности в распределении вещества, что привело к образованию галактик и сверхгалактик. В звездную эру начинается процесс образования протозвезд и протогалактик. Вещество, из которого зарождались первые звезды, состояло в основном из водорода (75%) и гелия (25%). Затем начинается формирование структуры Метагалактики, и этот этап развития Вселенной продолжается и в настоящее время

Американский физик А. Гут в 1981 г. выдвинул инфляционную модель Вселенной, которая раскрывала состояние Вселенной до взрыва. Ее развивали российские астрофизики А. Старобинский, А. Линде, В. Муханов и другие. Согласно этой модели Вселенная возникла из первоначального вакуума, который обладал огромной энергией, но находился в неустойчивом (возбужденном, или ложном) состоянии. В этом вакууме господствовали космические силы отталкивания, которые «раздували» занимаемое им пространство, а выделившаяся при этом энергия быстро нагревала Вселенную.

Огромное повышение температуры и давления в процессе быстрого расширения возбужденного вакуума привело к взрыву сверхгорячей материи. После взрыва резко понижаются температура и давление, и в дальнейшем расширение Вселенной происходило по сценарию стандартной модели. Время, отведенное этой эпохе, составляет от  $10^{35}$  до  $10^{-32}$  с.

Наибольшая трудность возникает при объяснении причин эволюции Вселенной. Выделяются две группы концепций: самоорганизация и креационизм.

**Концепция самоорганизации** считает материальную Вселенную единственной реальностью. Эволюция Вселенной рассматривается как процесс самоорганизации, т.е. самопроизвольного становления все более сложных структур. Порядок порождается динамичным хаосом, а вопрос о цели космической эволюции не ставится, поскольку не имеет смысла.

**Концепция креационизма** (творения) связывает эволюцию Вселенной с реализацией программы, которая была сформулирована «реальностью более высокого порядка», чем материальный мир (в конечном итоге - Богом). Сторонники креационизма в качестве одного из аргументов привлекают антропный принцип.

Антропный принцип (АП) фиксирует тот факт, что конкретное существование «нашей» Вселенной определяется численными значениями фундаментальных физических констант. В их числе: постоянная Планка, гравитационная постоянная, константы взаимодействия и т.д. Изменение этих констант на ничтожно малую величину принципиально изменило бы формы и способы существования Вселенной, а это сделало бы невозможным ее существование как сложной упорядоченной структуры. Первыми идею принципа высказали советские исследователи: физик А. Л. Зельманов (1913—1987) в 1955 г. и историк науки Г. М. Идлис (1928—2010) в 1957 г., Б. Картер (р. 1942) в 1973 г. сформулировал сильный и слабый варианты АП. В монографии Дж. Д. Барроу и Ф. Дж. Типлера «Антропный космологический принцип» (1986) признан приоритет Г. М. Идлиса

#### **Разновидности АП:**

- слабый: во Вселенной могут встречаться разные значения мировых констант, но их значения, резко отличные от известных, не наблюдаются потому, что там, где они есть, не может быть человека-наблюдателя;

- сильный: Вселенная должна иметь свойства, позволяющие развиться разумной жизни. Его вариант — Антропный принцип участия (АПУ), сформулированный в 1983 г. Дж. Уилером: наблюдатели необходимы для обретения Вселенной бытия.

Очевидно существенное различие этих формулировок:

- сильный АП относится к Вселенной на всех этапах ее эволюции;
- слабый АП касается только тех ее регионов и тех периодов, когда в ней теоретически может появиться разумная жизнь.

Формулировка АП опирается на предположение, что наблюдаемые в наше время законы природы не являются единственными реально существующими (или существовавшими), что должны быть реальные Вселенные с иными законами.

Согласно сильному АП Вселенная планировалась и развивалась с изначальным учетом того, что в ней появится жизнь и ее венец — человек. Отсюда рядом исследователей делается вывод: физическая структура Вселенной запрограммирована, а конечная цель космической

эволюции якобы заключается в появлении человека во Вселенной в соответствии с замыслами Творца.

С сожалением приходится отметить, что в некоторых современных учебниках идея креационизма рассматривается в рамках концепций естествознания[4]. Однако эта идея связана с миром сверхъестественного и поэтому выходит за рамки естествознания, изучающего естественные законы мира. К тому же антропный принцип поясняет, почему появление человека стало возможным, но ни в коей мере не может служить доказательством запрограммированности такого появления.