

сы изотропного расширения. Согласно Грищуку, рождение гравитонов путем обратного влияния на метрику переводит изотропное произвольное расширение на рельсы изотропного расширения с  $R=0$ ,  $P=\epsilon/3$  и лишь после этого эффективно выключается. Это соображение накладывает существенное ограничение на уравнение состояния при учете фактического, известного из наблюдений, состояния Вселенной. В частности, изложенная выше в данном параграфе картина холодного предельно жесткого барионного газа существенно меняется. Уравнение состояния  $P=\epsilon=n^2m^2$  приводит к обильному рождению гравитонов, которое прекратится лишь после того, как удельная энтропия достигнет значения  $S = \frac{n_g}{n_B} \cong (Gm^2)^{-1/2} = 10^{18}$ , что резко превышает наблюдаемое значение ( $\sim 10^9$ ).

Если же уравнение состояния не является предельно жестким, то при  $P=\epsilon/3$  (начиная с самой сингулярности) рождения гравитонов вовсе нет. При  $P<\epsilon/3$  — например, в модели Хаг едорна (см. § 2 этой главы) — роль гравитонов порядка единицы вблизи сингулярности, но затем, по мере расширения, роль гравитонов уменьшается и становится гораздо меньше единицы, когда кончается адронный период. Таким образом, соображения Грищука специфически исключают только жесткое уравнение состояния.

Является ли это исключение окончательным? В работе Грищука отмечается существование таких модификаций ОТО (совпадающих со стандартной ОТО вне сингулярности), при которых рождение гравитонов в изотропном случае запрещено. В связи с тем, что вопрос поставлен лишь очень недавно и до конца еще не выяснен, мы ограничимся здесь сказанным.

## § 10. Теория стационарной Вселенной

Один из способов решения проблемы сингулярности заключается в том, чтобы избавиться от сингулярности вовсе. Доказательство существования сингулярности основано на предположении об уравнении состояния вещества, заполняющего Вселенную. Вводя гипотетическое поле с отрицательной плотностью энергии, можно избежать космологической сингулярности\*). Теория такого рода — теория стационарной Вселенной (СВ) или, на языке авторов, «Steady State Theory» — была разработана Хойлом (1948) и Бонди и Голдом (1948). В течение двух десятилетий значительная часть теоретических и наблюдательных работ была посвящена проверке, развитию и критике теории стационарной Вселенной.

\*) Выводы, касающиеся коллапса изолированных тел большой массы и плотности (например, звезд, исчерпавших горючее), при этом сохраняются.

Уже по этой причине необходимо изложить ее содержание и современные взгляды на нее.

В теории СВ принимается метрика ( $c=1$ )

$$ds^2 = dt^2 - e^{2Ht} (dx^2 + dy^2 + dz^2). \quad (23.10.1)$$

Из формулы видно, что пространство (сечение  $t = \text{const}$ ) является плоским, Вселенная однородна и изотропна — можно смещаться по координатам  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и поворачиваться в этом пространстве. Эти свойства СВ-модели являются общими с моделью Фридмана.

Новым свойством, специфичным для СВ, является группа сдвига по времени. Все свойства метрики одинаковы в любой момент  $t$ . Заменяя  $t$  на  $t + \tau$ , необходимо лишь переопределить координаты:

$$x' = e^{H\tau} x, \quad y' = e^{H\tau} y, \quad z' = e^{H\tau} z. \quad (23.10.2)$$

Метрика СВ описывает расширение Вселенной, красное смещение спектральных линий; значение постоянной Хаббла равно  $H$  — коэффициенту в показателе  $e^{2Ht}$ ; при этом  $H$  оказывается постоянной величиной, не меняющейся в ходе эволюции \*). Однородность Вселенной, т. е. группу пространственных сдвигов, Бонди и Голд (1948) называют «космологическим принципом». Обобщая этот термин, Бонди называет «совершенным космологическим принципом» полную группу сдвигов по пространству и времени, характерную для метрики СВ.

С помощью уравнений ОТО найдем тот тензор энергии-импульса, ту правую часть уравнений, которая необходима для того, чтобы имело место (23.10.1) с  $H = \text{const}$ . В соответствии с общими формулами раздела I получим

$$\frac{1}{2} H^2 = \frac{4\pi G \epsilon}{3c^2}, \quad H^2 = -\frac{4\pi G}{3c^2} (\epsilon + 3P), \quad (23.10.3)$$

откуда следует, в частности,  $P = -\epsilon$ . В величины  $\epsilon$  и  $P$  здесь входит космологическая постоянная, если она отлична от нуля:

$\epsilon_\Lambda = \frac{c^4}{8\pi G} \Lambda$ ,  $P_\Lambda = -\frac{c^4}{8\pi G} \Lambda$ . Метрика СВ является как раз точным решением для пустого мира с положительной космологической постоянной  $\Lambda = \frac{3H^2}{c^2}$  (см. об этом гл. 4).

---

\*) Метрику Фридмана — Леметра можно записать в виде, схожем с (23.10.1), заменяя  $Ht$  на  $\int H(t) dt$ . Сингулярность решения Фридмана проявляется, в частности, в том, что  $H \rightarrow \infty$  при некоем  $t$ , которое можно выбрать за нуль в отличие от СВ.

Однако авторы СВ предлагают свою теорию для описания реальной, наблюдаемой, «нашей» Вселенной, содержащей материю, звезды, барионы, реликтовое излучение.

Так как для обычной материи, плотность которой не менее  $3 \cdot 10^{-21} \text{ г/см}^3$ ,  $P_{\text{вещ}} \ll \epsilon_{\text{вещ}}$ , то в составе тензора энергии-импульса должно быть поле («С-поле»), у которого  $P_C = -\epsilon_{\text{вещ}} - \epsilon_C$ . Такое поле нарушает одно из предположений, лежащих в основе теорем о необходимости сингулярности [см. (22.1.7)]; формально именно поэтому становится возможным решение без сингулярности в прошлом и будущем.

Важнейший момент заключается в том, что авторы СВ требуют истинной, физической, а не только метрической и геометрической стационарности. Они не ограничиваются заданием метрики (23.10.1).

По теории СВ необходимо, чтобы вечно, от  $t = -\infty$ , сохранялась одна и та же средняя плотность вещества  $\rho_{\text{вещ}}$  и (добавлено после 1965 г.) реликтового излучения  $\rho_{\text{рел}}$ . Если рождения барионов не происходит, то для плотности  $\rho_{\text{вещ}}$  имеет место уравнение

$$\frac{d\rho_{\text{вещ}}}{dt} = -3H\rho_{\text{вещ}}, \quad \rho_{\text{вещ}} = e^{-3Ht} \text{ const}, \quad (23.10.4)$$

что несовместимо с идеологией СВ. Авторы делают добавочное предположение о рождении барионов из С-поля:

$$\frac{d\rho_{\text{вещ}}}{dt} = -3H\rho_{\text{вещ}} + A, \quad \frac{d\epsilon_C}{dt} = -C^2 A - 3H(\epsilon_C + P_C). \quad (23.10.5)$$

Подобрав подходящее  $A = 3H\rho_{\text{вещ}}$ , можно тождественно удовлетворить обоим условиям стационарности,  $\frac{d\rho_{\text{вещ}}}{dt} = 0$ ,  $\frac{d\epsilon_C}{dt} = 0$ , при учете связи  $P_C$  и  $\epsilon_C$ , следующей из уравнений ОТО \*). Однако при этом пришлось ввести неизвестный ранее процесс рождения вещества из С-поля. Теория СВ по этой причине называют также теорией непрерывного творения материи. Конкретный вид члена  $A$  и его зависимость от  $\epsilon_C$ ,  $\rho_{\text{вещ}}$  или других величин остаются неопределенными: можно положить  $A = B\epsilon_C$  и считать  $\epsilon_C$  не зависящим от координат. В этом случае рождение происходит равномерно по всему пространству; в работе Хойла и Нарликара (1963) авторы полагают  $A = B\epsilon_C\rho_{\text{вещ}}$ , рождение происходит преимущественно там, где уже велика плотность вещества. Независимо от этого ответственным за рождение является С-поле, член описывающий рождение должен входить с плюсом в уравнение для вещества и с минусом в уравнение для энергии С-поля, иначе нельзя совместить решение с уравнениями ОТО \*\*).

\*) Плотность излучения  $\rho_{\text{изл}} \ll \rho_{\text{вещ}}$ , учет  $\rho_{\text{изл}}$  не изменит сути дела.

\*\*) Глубокая причина заключается в том, что уравнения ОТО содержат в себе закон сохранения энергии.

Сначала теория СВ попала в руки (точнее, была создана руками) астрономов и проверке подвергались космологические выводы. Совершенный космологический принцип является весьма жестким утверждением: средняя плотность галактик, средняя их светимость, число и свойства радиоисточников и т. п. должны быть неизменными, в далеком прошлом они должны быть такими же, как в настоящее время.

Предсказывается определенная кривая  $\log N - \log S$  для числа радиоисточников. Оказалось, что предсказанная зависимость не согласуется с наблюдениями (см. § 8 гл. 3). В теорию СВ нельзя ввести функцию эволюции источников для согласования с наблюдениями — отдельные источники эволюционируют, но Вселенная в целом, в среднем, стационарна! Теория СВ предсказывает параметр ускорения  $q_0 = -1$ , что также не согласуется с наблюдениями (см. § 9 гл. 3).

Точность наблюдений невелика, статистическая обработка сложна, поэтому споры вокруг наблюдений продолжают. Однако, как нам кажется, главные и непреодолимые трудности теории СВ выявляются при попытке конкретизировать на уровне элементарных частиц и теории поля те гипотезы, которые приходится вводить.

Дифференциальное уравнение для  $\frac{d\rho_{\text{вещь}}}{dt}$  может относиться к средней плотности, но рождение каждого отдельного бариона представляет собой микроскопический взрыв. Если рождаются пары барион — антибарион, то должна происходить в определенной доле случаев аннигиляция раньше, чем какой-либо механизм пространственно разделит барионы от антибарионов.

Аннигиляционное излучение специально искали и не нашли на уровне в 1000 раз ниже того, который соответствует полной аннигиляции.

Рождение барионов (без антибарионов) означало бы нарушение сохранения барионного заряда. Следовательно, по общим принципам, возможен и обратный процесс превращения барионов в  $S$ -поле. Такой процесс наблюдался бы как радиоактивный распад ядер, стабильных в обычном смысле \*). Как уже упоминалось, такой процесс не обнаружен, несмотря на специальные поиски.

Реликтовое излучение и его равновесный планковский спектр естественно объясняются в эволюционной космологии. В стадии радиационно-доминированной плотной плазмы происходит установление равновесия. В теории СВ, прозрачной для радиоволн вплоть

---

\*) Отметим также, что гипотеза спонтанного излучения частиц нуклонами в переменном гравитационном поле Метагалактики выдвигалась Станюковичем (1965). Здесь мы ограничимся ссылкой на обсуждение этой концепции — см. Зельдович и Смородинский (1966а, б) и Станюкович (1966а).

до очень большого красного смещения порядка  $z \sim 100$ , спектр реликтового излучения не поддается объяснению \*).

По совокупности наблюдательных данных и теоретических соображений теория стационарной Вселенной может считаться опровергнутой.

Надо отдать должное интеллектуальной смелости ее авторов; дискуссии вокруг теории СВ были полезны и способствовали общему подъему космологии.

## § 11. Принцип Маха и совпадения больших чисел физики и космологии

Отношения между астрономией и физикой сложны и многообразны, в том числе и в психологическом аспекте. Астроном с удовольствием применяет новинки физики (экспериментальной и теоретической) для своей науки — от спектрального анализа до счетчиков фотонов, от классической механики до квантовой физики. И вместе с тем в астрономах зреют гроздья — не гнева, но желания реванша, конечно, — ничто так не ценится астрономами, как возможность активно вмешаться в физику. Не брать у физиков, а дать им нечто новое! На этом пути у астрономии есть великолепные достижения, примерами могут служить закон тяготения, определение скорости света и многое другое. Попытки продвинуться в том же направлении и дать астрономическое объяснение важнейшим физическим величинам и явлениям продолжают и до сих пор. Авторы их заслуживают глубокого уважения уже за смелость постановки задачи. Здесь мы рассмотрим две связанные между собой идеи — принцип Маха и связь константы тяготения со свойствами Вселенной как целого. Космология является той областью, в которой одновременно играют роль законы тяготения, квантовой механики и теории элементарных частиц, как это мы уже подробно обсуждали в § 4 этой главы. Напомним, что из констант  $G$ ,  $\hbar$ ,  $c$  и массы покоя элементарной частицы можно составить безразмерную величину  $g = \frac{Gm^2}{\hbar c}$ . Эта величина составлена по образу и подобию безразмерной величины, характеризующей электромагнитное взаимодействие, — так называемой постоянной тонкой структуры  $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c}$ , где  $e$  — элементарный заряд.

Величина  $\alpha$  впервые появилась в атомной спектроскопии как отношение магнитной энергии электрона, от которой зависит тон-

\*) Попытки объяснить излучение с температурой  $3^\circ\text{K}$  конденсацией твердого водорода не выдерживают критики; в соответствующей работе Хойл и Нарликар (1963) не рассматривают оптических свойств кристаллов водорода, резко отличающихся от свойств черного тела. Для превращения энергии в излучение с планковским спектром нужно многократное рассеяние или поглощение и переизлучение. Авторы СВ не решили этот вопрос.