

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 желаний 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 α впервые появилась в атомной спектроскопии как отношение магнитной энергии электрона, от которой зависит тон-

*) Попытки объяснить излучение с температурой 3°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.

кая структура линий, к электростатической ($\sim \alpha^2$). Еще важнее тот факт, что отношение электростатической энергии электрона в водородном атоме к энергии покоя электрона порядка α^2 . Константа α равна $1/137$. Именно тот факт, что $\alpha < 1$, позволил последовательно создать нерелятивистскую квантовую теорию атома, являющуюся хоршшим приближением, а уже после этого развить релятивистскую теорию Дирака и затем квантовую электродинамику и теорию перенормировки. Будь $\alpha > 1$ или $\alpha \sim 1$, нерелятивистская теория не могла бы существовать, все этапы теории были бы перемешаны, физика оказалась бы бесконечно труднее! С ситуацией большой безразмерной константы физики столкнулись в сильном взаимодействии и в ядерной физике — и действительно, эти области до сих пор отстают от атомной физики (не в идейном смысле, конечно, а в смысле точности предсказаний).

Возвращаясь к астрофизике и тяготению, убедимся в сходстве α и g : кулоновское взаимодействие двух частиц есть e^2/r , гравитационное взаимодействие Gm^2/r , так что Gm^2 играет ту же роль, что e^2 , и имеет ту же размерность. В § 4 были вычислены значения g для массы протона и массы электрона:

$$g_p = \frac{Gm_p^2}{\hbar c} = 6 \cdot 10^{-39}, \quad g_e = \frac{Gm_e^2}{\hbar c} = 2 \cdot 10^{-45}. \quad (23.11.1)$$

В обоих случаях получаем необычайно малую величину. Естественной мерой является натуральный логарифм:

$$-\ln g_p = 87,9, \quad -\ln g_e = 102,8. \quad (23.11.2)$$

Итак, даже логарифм g сильно отличается от единицы; для двух частиц p и e логарифмы отличаются не сильно. В дальнейшем не будем отличать их, округленно примем

$$g = 10^{-40}, \quad -\ln g = 92. \quad (23.11.3)$$

Среди физиков существует убеждение, что безразмерные величины, существенно отличающиеся от единицы, подлежат объяснению, являются предметом (по крайней мере) качественной теории. Это убеждение наталкивает на мысль, что близость больших безразмерных чисел *) из различных явлений природы указывает на наличие внутренних связей между этими явлениями и может служить маяком, указывающим путь развития науки.

Пример такого подхода дает Ландау: он обращает внимание на то, что $\alpha \sim (\ln g)^{-1}$. Далее подводится идейная основа под это совпадение. В определенном варианте квантовой электродинамики

*) Для краткости будем везде говорить о больших числах, переворачивая малые: $\frac{\hbar c}{e^2} = \alpha^{-1} = 137$, $\frac{\hbar c}{Gm^2} = g^{-1} = 10^{40}$ и т. д.

наблюдаемый заряд элементарной частицы e ограничен неравенством, в которое в знаменателе под логарифмом входит «импульс обрезания» — предельный импульс, при котором еще верна теория.

В этом смысле электродинамика с неограниченными импульсами неполна, незамкнута — она приводит к выводу, что наблюдаемый заряд обязан равняться нулю. В этом контексте соотношение между α и g Ландау истолковывает так, что гравитационные эффекты ограничивают максимальные импульсы; электродинамика в строгом смысле существует лишь при одновременном учете роли тяготения (см. § 5 гл. 21).

В качестве другого примера использования больших чисел, относящегося к астрономии, отметим оценку максимальной массы белого карлика (Ландау—Чандрасекар). Солпитер показал, что предельное число нуклонов в белом карлике по порядку величины равно $N = g_p^{-3/2} \approx 10^{57}$, что соответствует массе Солнца и близко к пределу, вычисленному точно. В этот расчет входит g_p , относящееся к нуклонам (протонам), так как электроны в белых карликах с $M \approx M_\odot$ релятивистские и их масса не должна входить в ответ. В оценке опущены численные множители типа $2, 3, \pi$ и отношения атомного веса к атомному номеру. Однако еще раньше Дирак смело применил идеологию больших чисел к космологии. Конкретно это применение будет рассмотрено ниже. При отсутствии логически замкнутой теории намеки или указания на роль больших чисел неоднозначны.

Одно направление заключается в выводе свойств Вселенной из теории тяготения, т. е. в предположении, что величина g является основой космологии.

Однако есть и другая гипотеза — предположение об определенной роли Вселенной в локальных законах. Эта гипотеза называется принципом Маха.

В зародыше принцип Маха содержался в знаменитом вопросе Ньютона: почему во вращающемся теле есть центробежная сила и кориолисовы силы? Возникает дилемма: либо вращение абсолютно, т. е. центробежные силы возникают при вращении относительно «абсолютного» ньютонова пространства, либо играет роль вращение относительно всех остальных масс Вселенной?

Опыт показывает, что вращение тела относительно неподвижных далеких звезд приводит к появлению центробежной силы и сил Кориолиса. Вопрос состоит в том, есть ли эти силы при вращении тела в мире, в котором нет звезд — ни далеких ни близких, нет никакой материи, кроме рассматриваемого тела.

Очевидно, что прямо, экспериментально ответить на этот вопрос нельзя, такого мира нет, опыт навсегда останется воображаемым, мысленным. Тем не менее теоретический вопрос остается. Но в общей теории относительности силы инерции и тяготение тесно связаны между собой (см. об этом в ТТ и ЭЗ, особенно § 10 и приложение

к нему). Не удивительно, что возник вопрос, не зависят ли силы инерции и тяготение от Вселенной как целого.

Но в таком случае величина g , характеризующая тяготение, может зависеть от больших чисел, характеризующих Вселенную как целое. Принцип Маха, возможно, перекликается с проблемой больших чисел в локальной лабораторной физике. Так получился набор вопросов под общим названием «многоликий Мах».

Две постановки вопроса о больших числах рассмотрим последовательно. Начнем с фактической стороны дела. Одно большое число $g^{-1} = 10^{40}$ найдено выше. В качестве числа, характеризующего Вселенную, Дирак рассматривает общее число нуклонов во Вселенной (если Вселенная замкнута!). Он получает его, принимая за радиус отношение $\frac{c}{H} = 10^{28}$ см, критическая плотность 10^{-29} г/см³ соответствует $n = 10^{-5}$ см⁻³ нуклонов, так что

$$N = \frac{4\pi}{3} \left(\frac{c}{H} \right)^3 n = 4 \cdot 10^{79} \approx g^{-2}, \quad (23.11.4)$$

— впечатляющее совпадение, которое Дирак считает слишком хорошим, чтобы быть случайным.

Подставим в (23.11.4) выражение плотности нуклонов, соответствующее критической плотности $\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$. Выражение для плотности нуклонов есть $n_c = \frac{3H^2}{8\pi G m_p}$, откуда

$$N \sim \frac{c^3}{HGm_p}. \quad (23.11.5)$$

Опуская численные множители, после простых выкладок получим другое замечательное соотношение, эквивалентное (23.11.4):

$$\left. \begin{aligned} H \left(\frac{1}{\text{сек}} \right) &= \frac{m_p c^2}{\hbar} \frac{Gm_p^2}{\hbar c} = g \frac{m_p c^2}{\hbar}, \\ T (\text{сек}) &= \frac{1}{H} = \frac{\hbar}{m_p c^2} g^{-1}. \end{aligned} \right\} \quad (23.11.6)$$

Аналогичное соотношение приведено у Станюковича (1965), соотношение (23.11.6) имеется у Гамова (1948, 1968). Совпадение мало изменяется, если вместо \bar{g} взять отношение $\frac{Gm_p^2}{e^2} = 0,8 \cdot 10^{-36}$, как это сделано в первоначальной работе Дирака. Современное изложение см. Дирак (1974).

Гамов называет «темпоном» единицу времени $\frac{\hbar}{m_p c^2} \approx 10^{-24}$ сек, характерную для нуклона. Возраст мира, измеренный в темпонах, $\sim 3 \cdot 10^{41}$ (безразмерное число) напоминает характерную для гравитации величину $g^{-1} = 10^{40}$.

Уточним физические идеи, связанные с этими совпадениями. Само понятие общего числа нуклонов имеет смысл только для замкнутого мира. Вычисление N по формуле (23.11.5) справедливо — хотя бы по порядку величины — тогда, когда горизонт порядка радиуса мира, т. е. возраст составляет долю порядка единицы от полного цикла расширения и сжатия мира. В однородном открытом (гиперболическом) или плоском мире не существует «общего числа барионов» — эта величина бесконечна!

В замкнутом мире можно предположить, что соотношение для N имеет какой-то физический смысл и (с постоянным коэффициентом порядка единицы) имеет место всегда.

Соотношение между N и H с течением времени изменяется (N постоянно, H меняется; отношение возраста мира к темпу лишь по порядку величины равно g^{-1} , коэффициент меняется по мере изменения H).

Однако возможна и другая интерпретация, и для плоского мира она является единственно возможной, если поверить в соотношение (23.11.6) как закон природы. Величина H в плоском мире не постоянна, $H = \frac{2}{3T}$. Справа стоят так называемые физические константы G, \hbar, c, m_p . Значит (по мнению ряда авторов), по крайней мере одна из них в действительности не постоянна! Надо подчеркнуть, что такое предположение требует откровенного отказа от современной физической теории*). В пользу такой концепции нет никаких других аргументов, кроме упомянутого совпадения.

Возможна переменность G , и ее следствия широко обсуждались. Из формулы следует, что $5 \cdot 10^9$ лет**) тому назад G было в 1,5—2 раза больше. При сохранении момента вращательного движения Земли вокруг Солнца большому G соответствует меньшее (в 1,5—2 раза) расстояние Земли от Солнца. По теории внутреннего строения звезд светимость Солнца также зависит от G , притом весьма сильно — приблизительно как G^7 . Таким образом, количество солнечного тепла, падающее на единицу поверхности Земли, в теории с переменным G меняется, как G^9 .

Геологические и палеонтологические данные решительно противоречат этому. Кроме того, непосредственные радиолокационные наблюдения движения планет Солнечной системы, проведен-

*) Дирак (1937) в первой своей работе совершенно четко формулирует отказ от общей теории относительности. Но в таком случае за попытку объяснить «большие числа» приходится платить ценой отказа от ясной теоретической интерпретации принципа эквивалентности и от всех других достижений ОТО.

Радиоастрономы обещают в ближайшие несколько лет проверить непосредственно, изменяется ли G так, как это предсказывают Дирак, Дикке и др. В настоящее время нет реальных причин для сомнения в ортодоксальной ОТО. О последних результатах см. Шапиро (1972). Точность измерений еще недостаточна для категорических выводов.

**) Примерный возраст Солнечной системы, возраст Земли.

ные Шапиро (1972), дают для верхнего возможного предела $\frac{\dot{G}}{G} = (4 \pm 2) \cdot 10^{-11} \text{ лет}^{-1}$.

Наконец, существует попытка прочесть формулу для H так: современная эпоха, жизнь, человек, цивилизация и сама возможность изучения природы и писания формул и книг (в том числе и данной) появляются лишь тогда, когда H падает до величины порядка $g^{-1} m_p c^2 / \hbar$. В горячей Вселенной образование галактик и звезд происходит лишь после рекомбинации протонов и электронов, т. е. после окончания радиационно-доминированной стадии. Действительно, этот момент (при $\Omega=1$) соответствует космологическому времени $t=5 \cdot 10^{12} \text{ сек}$. Выраженный в темпонах возраст равен $5 \cdot 10^{36}$, что также еще не сильно отличается от g^{-1} , или g_p^{-1} , или от $\frac{e^2}{G m_p^2} = 1,25 \cdot 10^{36}$; на это совпадение указал Гамов.

Такое утверждение вполне совместимо с обычной физикой, с законами природы, в которых G , \hbar , c , заряды и массы частиц являются константами. Соотношение (23.11.6) в действительности представляет собой утверждение, относящееся к удельной энтропии вещества, заполняющего горячую Вселенную. Но удельная энтропия есть локальная величина, ее можно определить и в открытом и в замкнутом мире (в отличие от общего числа барионов N). Таким образом, соотношение (23.11.6) выгодно отличается от соотношения (23.11.5).

Численно соотношение (23.11.6) эквивалентно (разумеется, приближенно) соотношению $s = \frac{n_\gamma}{n_B} = \left(\frac{G m^2}{\hbar c} \right)^{-1/4} = g^{-1/4}$. Последнее

было получено Зельдовичем и Новиковым (19676) как вывод из схемы, предпосылки которой в настоящее время представляются маловероятными; однако как эмпирическая формула утверждение остается верным. В теории с космологической постоянной, отличной от нуля (гл. 4), можно предположить, не нарушая принципа постоянства констант, что $\epsilon_\Lambda \approx \frac{m^0 G c^4}{\hbar^4}$. В модели Леметра — Петросяна —

Солпитера — Шкловского — Кардашева (см. § 2 гл. 4) при $\epsilon_\Lambda < 0$ получается период замедленного расширения. Возраст Вселенной в этот момент и характерное время последующего расширения удовлетворяют соотношению (23.11.6) [Зельдович (1968)]. Однако в последние годы не подтвердились те исходные наблюдательные данные (концентрация квазаров при $z=1,95$), на которых основывались авторы, возрождавшие модель с задержкой расширения и $\Lambda \neq 0$.

Вернемся к многоликому принципу Маха.

Суть этого принципа состоит в следующем: инерция тела определяется его взаимодействием (гравитационно-инерционным) с другими телами Вселенной. Этот принцип сыграл большую эвристиче-

скую роль в создании Эйнштейном ОТО. Но после создания теории относительности выяснилось, что принцип Маха в ней не содержится! Рассмотрим вопрос несколько подробнее.

Что значит утверждение: инерция определяется взаимодействием с другими телами? Прямолинейный ответ на этот вопрос состоит в следующем: инертная масса тела, т. е. мера его сопротивляемости действующей силе, определяется его взаимодействием с другими телами. Если бы этих тел не было, то не было бы инертной массы у пробного тела. С другой стороны, «инерция тела должна возрастать по мере скопления весомых масс вблизи него» [Эйнштейн (1966)].

Оба последних утверждения не выполняются в теории относительности. Во-первых, в пустом пространстве справедлива СТО, где тела обладают инерцией, где во вращающейся системе есть силы Кориолиса и центробежные силы. Во-вторых, одна и та же сила, например сила сжатой пружины, всегда сообщает данному телу одинаковое ускорение, независимо от близости тяжелых масс или отсутствия их. Значит, инерция тела не возрастает «по мере скопления весомых масс вблизи него». Противоположное утверждение Эйнштейна связано с ошибочной интерпретацией полученной им формулы [на эту ошибку указывали Бранс (1962), Дикке (1962)]. С этой точки зрения, каждое подтверждение теории относительности есть удар по принципу Маха.

Иначе обстоит дело с некоторыми другими физическими идеями, которые иногда связывают с принципом Маха. Так, Эйнштейн [(1966)] пишет, что, с точки зрения Маха, следует ожидать, что «тело должно испытывать ускоряющую силу, когда близлежащие массы ускоряются; эта сила по направлению должна совпадать с направлением ускорения».

Вращающееся полое тело должно создавать внутри себя «кориолисово поле сил, стремящееся отклонить движущиеся тела в направлении вращения...».

Оба эффекта имеют место в ОТО (см. ТТ и ЭЗ). Но они не связаны с изменением инертных свойств тела, а описывают изменение инерциальной системы отсчета при движении тяготеющих масс. Иначе говоря, масса пробного тела остается неизменной, но инерциальная система отсчета будет разная в зависимости от наличия и движения окружающих тел. Принципиально эти эффекты, указанные Эйнштейном, того же характера, что и изменение инерциальной системы в присутствии неподвижной тяготеющей массы (скажем, вблизи невращающейся планеты). Инерциальная система свободно падает в поле тяготения массы, в то время как в отсутствие массы она совпадала с инерциальной системой на бесконечности. Очевидно, такое изменение инерциальной системы никак не связано с изменением инерциальных свойств тела, которые являются мерой сопротивления тела ускоряющим (негравитационным) силам.

Итак, принципа Маха в ОТО нет. Поэтому нельзя согласиться с теми, кто ОТО считает теорией, подтверждающей принцип Маха. Впрочем, поскольку уравнения ОТО считаются верными, спор становится схоластическим, любые предсказания об исходе того или иного реального или мысленного опыта не меняются от того, какие слова «приговаривают» авторы расчетов*).

Другая точка зрения на принцип Маха более радикальна. Придерживающиеся ее авторы считают ОТО неверной или неполной именно потому, что в ОТО не учтено в явном виде (а не только через влияние на метрику) воздействие далеких масс на инерцию и тяготение. Эти авторы считают существование решения для пустого пространства (ср. выше) недостатком ОТО, который будущая теория сможет преодолеть.

Спор с будущей теорией всегда затруднителен, он подвергает испытанию чувство юмора и порядочность спорящих. Опасно оказаться в роли критика Латунского, выступающего со статьей «Ударим по пилатчине» и громящего ненапечатанный роман Мастера**).

И все же не для нападения на нерожденные теории, а в защиту ОТО следует отметить факты, неблагоприятные для критиков ОТО.

ОТО не встречается ни с экспериментальными опровержениями, ни с логическими трудностями. Поэтому нет реальных объективных побудительных причин для замены ее «более маховской теорией».

Если же обратиться ко Вселенной, в которой мы живем, то в ней фактически далекие звезды и реликтовое излучение выделяют в каждой точке одну «покоящуюся» (в среднем относительно материи) систему координат. Не только вращение, но и поступательное движение относительно далеких звезд может быть обнаружено и измерено, хотя на локальные законы природы они и не влияют! В покоящейся системе мы во всех направлениях наблюдаем изотропное красное смещение света далеких галактик, температура радиопона во всех направлениях равна $2,7^\circ\text{K}$. В равномерно поступательно движущейся системе в направлении движения мы наблюдали бы анизотропию красного смещения галактик, температура фона была бы выше $2,7^\circ\text{K}$ (а в противоположном направлении — ниже).

Таким образом система, связанная с реликтовым излучением, с общей массой далекого вещества, действительно физически преимущественна и она инерциальна в каждой точке. Может быть, это как-то можно трактовать в духе подтверждения принципа Маха? Мы думаем, что этого делать нельзя. Прямолинейное применение принципа Маха в такой редакции ведет к следующему. Раз выделена преимущественная система, то даже движение по инерции по отношению к ней (а не обязательно с ускорением или вращением) должно вести к отличию в новой системе локальных

*) М. Булгаков, Мастер и Маргарита.

**) О принципе Маха см. также Уилер (1964), Мизнер, Торн, Уилер (1973).

физических законов от законов в системе преимущественной. Но этого нет — законы физики инвариантны относительно преобразований Лоренца, т. е. относительно перехода к движущейся системе. Таким образом, принцип Маха (если бы он оказался верным) должен был бы вернуть нас не только к Ньютону, но и, вероятно, к Аристотелю — во Вселенной можно было бы определить абсолютный покой. Если опыт показывает лоренц-инвариантность законов природы (а это так!), то он прямо указывает на независимость законов от влияния далеких тел. Тем самым подрывается привлекательность объяснения частной группы явлений влиянием далеких тел.

Резюмируя, мы не считаем вероятным радикальный пересмотр ОТО в направлении идей Маха. Проблему больших чисел мы считаем реальной лишь в формулировке, связывающей локальные свойства и не требующей переменности физических величин (констант). Теория Бранса — Дикке, в которой вводится специальное скалярное поле, осуществляющее воздействие далекого вещества, будет рассмотрена в § 15 этой главы.

§ 12. ОТО и структура (топология) мира как целого

Вопрос о структуре мира как целого является одной из важнейших проблем, лежащих на грани между естественными науками и философией. Этот вопрос получил новый смысл, новое содержание в начале века в связи с созданием теории относительности.

До этого считалось самоочевидным, что пространство является евклидовым трехмерным, а время является независимой переменной. Специальная теория относительности изменила это наивное (с сегодняшней точки зрения) убеждение, пространство и время оказались объединенными в единое 4-мерное многообразие. Конкретным выражением этого объединения явилось установление закона преобразования координат и времени при переходе к движущейся системе координат. Эти преобразования были найдены Пуанкаре из условия инвариантности уравнений Максвелла для электромагнитного поля. Принято говорить о преобразованиях Лоренца, учитывая заслуги Лоренца в развитии теории электронов и электромагнетизма. Бессмертный вклад Эйнштейна, в силу которого именно он по справедливости является творцом теории относительности, заключается в осознании универсальности связи пространства и времени. Эйнштейн понял, что речь идет не о свойствах одного частного поля (электромагнитного), а об общих свойствах всей природы, всех частиц и полей. Не случайно, что только Эйнштейн, исходя из законов ОТО, высказал идею эквивалентности массы и энергии ($E = mc^2$) и без колебаний применил это соотношение к атомным ядрам, несмотря на отсутствие конкретной теории ядерных сил.