

3. ПРИНЦИП МАХА

Причины, по которым Ньютон полагал различными между собой абсолютные и относительные движения, состоят в наличии центробежных сил, направленных от оси движения. Силы эти проявляются в большей или меньшей мере в зависимости от величины абсолютного движения, но не зависят от относительного движения. Для подтверждения своей концепции Ньютон прибегает к помощи эксперимента. Цель эксперимента — выяснение характера вращения. Цилиндрический сосуд подвешивают на длинной нити и вращают его, пока нить не закрутится. Сосуд наполняют водой и приводят в состояние покоя. Под действием мгновенной силы сосуд приводят в круговое движение противоположного направления, предоставляя нити раскручиваться. Вначале во вращении принимает участие только сосуд, так как трение воды о стенки сосуда недостаточно для того, чтобы немедленно сообщить вращение и жидкости. Поверхность воды остается плоской, как и до движения сосуда. Но чем сильнее увлекается вода вращающимися стенками, тем отчетливее выступает действие центробежных сил. Вода гонится вверх по стенкам, пока ее поверхность не примет форму параболоида вращения. Из проведенного эксперимента Ньютон заключает, что вначале, при наибольшем относительном движении, вода не обнаруживала стремления удалиться от оси.

При уменьшении относительного движения воды стало заметно стремление ее удалиться от оси. Относительное вращение стенок сосуда по отношению к воде не сопровождается никакими силами, действующими на воду. В этом случае когда сама вода принимает участие во вращении, центробежные силы становятся заметными. Ньютон полагал, что факт существования центробежных сил является аргументом в пользу абсолютного движения.

Дж. Беркли, субъективный идеалист, уже в ранней своей работе «Опыт новой теории зрения» (1709), как и в ряде позднейших работ, выступил против учения Ньютона о пространстве как вместилище всех природных тел. Для Беркли это было одним из звеньев отказа от объективной реальности. В работе «De Matu» (1721) ему удалось указать на одно слабое звено в графтовке ньютоновского эксперимента с вращающимся ведром. Решающим в доказательстве Ньютона было предположение, что тот же результат должен быть получен и в пустом пространстве. В действительности ведро было вращающимся, а затем покоящимся относительно Земли. Движение ведра только по видимости, а не на самом деле было круговым, так как при этом неизбежно включалось вращение Земли вокруг своей оси, обращение Земли вокруг Солнца и т. д. Беркли заключил, что явления, на которые ссылается Ньютон, указывают на вращение относи-

тельно других тел Вселенной. Базируясь на высказывании Дж. Беркли, Р. Дикке и многие другие ошибочно полагали, что у Беркли мы видим предвосхищение идеи относительности.

В новое время Мах подверг критике ряд положений Ньютона, особенно то из них, в котором Ньютон основывается на различениях относительного и абсолютного движения. «Вряд ли,— пишет Мах,— есть необходимость заметить здесь, что и в приведенных здесь рассуждениях Ньютон изменяет своему намерению исследовать только фактическое. Об абсолютном пространстве и абсолютном движении никто ничего сказать не может, это чисто абстрактные вещи, которые на опыте обнаружены быть не могут. Все наши основные принципы механики представляют собою, как это было уже подробно показано, данные опыта об относительных положениях и движениях тел» [29].

Мах отмечает, что к утверждению, что тело K изменяет свое направление и скорость только под действием другого тела K' , нельзя прийти, если нет налицо других тел A, B, C , относительно которых мы определяем движение тела.

Мах допускает, что движение определено средой, в которой находится тело K , но у него эта среда играет не кинематическую, а динамическую роль.

Вопрос об абсолютном и относительном движении в конце XIX в. привлекал к себе внимание не только историков механики и ученых, занимавшихся анализом принципов механики.

Б. и И. Фридлиндеры предложили опыт для доказательства относительности вращательного движения. Крутильные весы располагают на не слишком далеком расстоянии от большого махового колеса. Расположение должно быть таким, «чтобы точка подвеса подвижной части весов (подвешенного стержня) приходилась более или менее точно на продолжении оси махового колеса; в таком случае, если подвешенный стержень вначале не был параллелен плоскости колеса, то он должен стремиться приблизиться к этому положению и, значит, должен отклониться соответствующим образом. Ибо на каждую материальную частицу, не лежащую на оси вращения, действует центробежная сила, стремясь удалить ее от оси. Ясно, что максимальное удаление будет достигнуто, когда подвешенный стержень станет параллельно колесу» [30]. Это — модификация опыта Ньютона. Крутильные весы занимают в нем место воды, но в отличие от воды они отмечают весьма малые силы. Масса махового колеса заменяет массу сосуда. Опыты такого рода, разумеется, явно недостаточны, ввиду малой массы махового колеса.

Отношение Эйнштейна к Маху претерпело сложную эволюцию. В 1913 г. Эйнштейн писал Маху: «Глубокоуважаемый коллега! Вероятно, Вы недавно получили мою новую работу об относительности и гравитации, которую я, наконец, закончил после

бесконечных усилий и мучительных сомнений. В будущем году во время солнечного затмения будет проверено, изгибаются ли световые лучи Солнцем, или, другими словами, верно ли основное и фундаментальное предположение об эквивалентности ускоренной системы и гравитационного поля. Если это так, то Ваши вдохновляющие исследования об основах механики — вопреки несправедливой критике Планка — получат блестящее подтверждение. Тогда неизбежным следствием будет то, что инерция проявляется как своего рода взаимодействие тел, вполне в духе Вашей критики ньютоновского эксперимента с вращающимся сосудом. Первое следствие в этом смысле Вы найдете на стр. 6 этой работы. Дальше оказалось:

1. Если ускорить массивную сферическую оболочку S , то, согласно теории, заключенное внутри тело должно испытать ускоряющую силу.

2. Если вращать оболочку S вокруг оси, проходящей через ее центр (вращать относительно неподвижных звезд, т. е. «неподвижной системы»), то внутри оболочки возникает кориолисово поле, т. е. происходит увлечение плоскости маятника Фуко (конечно, с практически неизмеримо малой скоростью...)» [31].

Следствия, согласно которым масса пробного тела должна возрастать при приближении тела к скоплению больших масс и ускорение большой массы должно вызвать одинаково направленное ускорение находящегося вблизи пробного тела, не получены самим Махом. Третье следствие — частичное увлечение инерциальной системы вращающимися массами — имеется лишь в качестве намеков в критике Махом опытов с вращающимся сосудом.

В 1914 г. в статье «Формальные основы общей теории относительности» Эйнштейн рассмотрел вопрос об эквивалентности вращающихся координатных систем. Кинематическая эквивалентность двух систем координат не ограничена случаем, когда системы движутся прямолинейно и равномерно друг относительно друга. Она имеет место и в том случае, когда система координат K' равномерно вращается по отношению к инерциальной системе K . Системы K и K' равноценны. На первый взгляд могло казаться, что эти системы не равноценны, поскольку на массы, покоящиеся во вращающейся системе координат, действуют центробежные силы, в то время как на массы, покоящиеся относительно инерциальной системы K , эти силы не действуют. Эйнштейн обращает внимание на то, что существование рассматриваемых центробежных сил не связано с движением самой системы K . «Центробежные силы, которые действуют в таких условиях на некоторое тело, будут определяться в точности той же мировой постоянной, что и действие на него поля тяжести, так что мы не имеем средств отличить «поле центробежных сил» от поля тяжести» [28, стр. 328].

Поле центробежных сил интерпретируется как гравитационное поле; при этом Эйнштейн ссылается на аналогичную интерпретацию в специальной теории относительности. Пондермоторная сила, действующая на электрическую массу, движущуюся в магнитном поле, истолковывается как действие на эту массу электрического поля, которое с точки зрения движущейся вместе с ней системы отсчета присутствует «в месте расположения заряда».

В 1914 г. Эйнштейн рассматривал, лишь качественно, значение расширенного принципа относительности, распространенного на равномерно вращательное движение. Количественно такая задача еще не была решена. Для решения задачи о вращающихся массах существенную роль сыграла работа Эйнштейна 1916 г., посвященная приближенному интегрированию уравнений поля. На ее основе проведены исследования Тирринга. Уравнения движения принимают вид

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= -\frac{8kM}{3a} \omega \dot{y} + \frac{kM}{3a} \omega^2 x, \\ \ddot{y} &= \frac{8kM}{3a} \omega \dot{x} + \frac{kM}{3a} \omega^2 y, \\ \ddot{z} &= -\frac{2kM}{3a} \omega^2 z.\end{aligned}$$

В 1918 г. Тирринг и Лензе показали, что если в релятивистской теории тяготения, как и в ньютоновской, гравитационное поле покоящегося шара такое же, как поле материальной точки, то это не имеет места в случае вращающегося шара. В работе «О влиянии собственного вращения центрального тела на движение планет и Луны по теории гравитации Эйнштейна» [32] они вычислили возмущения орбит планет и Луны и нашли их очень малыми. Как и в предыдущей работе, но с некоторыми изменениями, были вычислены $g_{\mu\nu}$, затем установлены уравнения движения, вычислены возмущения, вызванные собственным вращением центрального тела, и произведены численные расчеты. Возмущения оказались весьма малыми. В работе «Основы общей теории относительности» в 1916 г. Эйнштейн анализирует основания, подсказывающие расширение постулата относительности. Он отмечает, что классической механике и в не меньшей степени специальной теории относительности «присущ некоторый теоретико-познавательный недостаток, который, пожалуй, впервые был ясно отмечен Э. Махом» [26, стр. 455].

Эйнштейн поясняет это на примере. Два жидких тела одинаковой величины и одинакового состава находятся в пространстве на столь большом расстоянии друг от друга и от других масс, что принимаются во внимание лишь гравитационные силы

взаимодействия частей одного и того же тела. Каждая масса, рассматриваемая наблюдателем, покоящимся относительно другой массы, вращается вокруг линии, соединяющей массы, с постоянной угловой скоростью. Относительное движение обеих масс можно установить. Поверхности обоих тел S_1 и S_2 измерены с помощью покоящихся относительно этих тел масштабов. Оказалось, что поверхность S_1 представляет собой сферу, а поверхность S_2 — эллипсоид вращения.

«Механика Ньютона не дает удовлетворительного ответа на этот вопрос. Она говорит следующее. Законы механики справедливы для пространства R_1 , относительно которого тело S_1 находится в покое, но несправедливы для пространства R_2 , относительно которого находится в покое тело S_2 . Однако галилеево пространство R_1 (и движение по отношению к нему), которое при этом вводится, является фиктивной причиной, а не наблюдаемым фактом. Таким образом, ясно, что механика Ньютона в рассматриваемом случае удовлетворяет требованию причинности не по существу, но лишь кажущимся образом, возлагая ответственность за наблюдаемое различное поведение тел S_1 и S_2 на фиктивную причину — пространство R_1 » [26, стр. 455]. В 1921 г. в широко известной работе «Сущность теории относительности» Эйнштейн рассматривает три эффекта, которых можно ожидать, если принцип Маха справедлив. Первый эффект:

«Инерция тела должна возрастать по мере скопления весомых масс вблизи него».

Для доказательства Эйнштейн обращается к уравнению движения

$$\frac{d^2 x_\mu}{ds^2} + \Gamma_{\alpha\beta}^\mu \frac{dx_\alpha}{ds} \frac{dx_\beta}{ds} = 0 \quad (1)$$

и к выражениям

$$\gamma_{\mu\nu} = -\frac{\kappa}{2\pi} \int \frac{T_{\mu\nu}(x_0, y_0, z_0, t-r)}{r} dV_0, \quad (2)$$

$$ds = \sqrt{g_{44}} dl = \left(1 - \frac{\gamma_{44}}{2}\right) dl,$$

γ_{44} — величина первого порядка малости. Во втором слагаемом уравнения (1) оставляют лишь члены, линейные по скорости. Уравнение (1) сперва преобразовывают к виду:

$$\frac{d}{dl} \left[\left(1 + \frac{\gamma_{44}}{2}\right) \frac{dx_\mu}{dl} \right] = -\Gamma_{\alpha\beta}^\mu \frac{dx_\alpha}{dl} \frac{dx_\beta}{dl} \left(1 + \frac{\gamma_{44}}{2}\right), \quad (1a)$$

а (2) — в указанном приближении

$$-\gamma_{11} = -\gamma_{22} = -\gamma_{33} = \gamma_{44} = \frac{\kappa}{4\pi} \int \frac{\sigma dV_0}{r}, \quad (2a)$$

$$\gamma_{4\alpha} = -\frac{i\kappa}{2} \int \frac{\sigma \frac{dx_\alpha}{ds} dV_0}{r}, \quad \gamma_{\alpha\beta} = 0,$$

где μ , α и β — только пространственные индексы. В уравнении (1а) заменяют $1 + \frac{\gamma_{44}}{2}$ на 1, а $\Gamma_{\alpha\beta}^{\mu}$ на $\begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \mu \end{bmatrix}$:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} 44 \\ \mu \end{bmatrix} &= -\frac{1}{2} \frac{\partial \gamma_{44}}{\partial x_{\mu}} + \frac{\partial \mu_{4\mu}}{\partial x_4}, & \begin{bmatrix} \alpha & 4 \\ \mu \end{bmatrix} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \gamma_{4\mu}}{\partial x_{\alpha}} - \frac{\partial \gamma_{4\alpha}}{\partial x_{\mu}} \right) \\ & & \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \mu \end{bmatrix} &= 0. \end{aligned}$$

Из уравнения (1а) Эйнштейн получает:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [(1 + \bar{\sigma}) \underline{v}] &= \text{grad } \bar{\sigma} + \frac{\partial \mathfrak{M}}{\partial t} + [\text{rot } \mathfrak{M}, \underline{v}], \\ \bar{\sigma} &= \frac{\kappa}{8\pi} \int \frac{\sigma dV_0}{r}, \\ \mathfrak{M} &= \frac{\kappa}{2} \int \frac{\sigma \frac{dx_{\alpha}}{dt} dV_0}{r}. \end{aligned} \quad (3)$$

Из уравнений (3) Эйнштейн делает вывод о правильности первого предположения. «Инертная масса пропорциональна $1 + \bar{\sigma}$ и поэтому возрастает по мере приближения весомых масс к нашему «пробному телу» [28, стр. 77].

Эйнштейн полагал, что этот эффект учитывается аппаратом теории относительности. Это утверждение критически рассмотрел Брэнс [33]. Р. Дикке писал, что форма уравнений, которыми оперировал Эйнштейн, связана с определенной системой координат.

Второй эффект: «Тело должно испытывать ускоряющую силу, когда близлежащие массы ускоряются; эта сила по направлению должна совпадать с направлением ускорения» [28, стр. 77]. Наглядно это можно представить, если тело помещено внутри массивной сферы. Сфера подвергается внезапному ускорению. Ускорение это подобно ускорению Вселенной относительно рассматриваемого тела. На тело должна действовать сила инерции, как следствие принципа Маха [34, стр. 223—224].

Эйнштейн на основе уравнения (3) писал: «Ускоряющиеся массы оказывают индукционное действие на пробное тело в направлении ускорения, что описывается членом $\partial \mathfrak{M} / \partial t$ » [28, стр. 77].

Третий эффект: «Вращающееся полое тело должно создавать внутри себя поле «кориолисовых сил», стремящееся отклонить движущиеся тела в направлении вращения, а также создавать радиальное поле центробежных сил» [28, стр. 76].

Р. Дикке поясняет это положение следующим путем. Вращение полый сферической оболочки соответствует в неко-

тором смысле вращению Вселенной относительно «неподвижной» системы координат. С точки зрения принципа Маха это эквивалентно вращению координатной системы относительно неподвижной Вселенной. Тирринг и Тирринг и Лензе рассмотрели подробно этот эффект. Этот эффект вследствие малости постоянной κ нельзя наблюдать на опыте, но Эйнштейн полагал, что он существует. «Существование этих эффектов является сильным аргументом в пользу идей Маха об относительности всех инерциальных воздействий. Последовательно проводя эту точку зрения до конца, мы должны ожидать, что вся инерция, т. е. все поле $g_{\mu\nu}$, определяется в первую очередь распределением материи во Вселенной, а не граничными условиями на бесконечности» [28, стр. 77]. В дальнейшем многие исследователи обратили основное внимание на роль граничных условий.

В 1921 г. в речи в Королевском колледже (Лондон) Эйнштейн вновь указывает на свое согласие с некоторыми аспектами маховской трактовки инерции. Отметив, что общая теория относительности обязана своим существованием прежде всего опытному факту численного равенства инертной и тяжелой массы, которого нельзя было интерпретировать в пределах классической механики, Эйнштейн указывает на вторую причину, способствовавшую созданию общей теории относительности. Рассматривая движение с описательной точки зрения, мы должны отметить, что оно существует лишь как относительное движение предметов по отношению друг к другу. У Ньютона же введено физическое пространство, по отношению к которому существует ускорение.

«Хотя,— пишет Эйнштейн,— это специально введенное понятие абсолютного пространства логически корректно, оно тем не менее кажется неудовлетворительным. Поэтому Эрнст Мах пытался изменить уравнения механики так, чтобы инерция тел сводилась к движению их не по отношению к абсолютному пространству, а по отношению к совокупности всех остальных весомых тел. При существовавшем тогда уровне знаний попытка Маха была заведомо обречена на неудачу. Однако постановка проблемы представляется вполне разумной. С особой силой эти рассуждения звучат в общей теории относительности, так как в последней физические свойства пространства определяются весомой материей» [28, стр. 111].

Эйнштейн полагает, что проблема может быть решена в общей теории относительности, лишь исходя из представления о пространственно замкнутом мире. Эта уверенность Эйнштейна в существовании замкнутого мира в дальнейшем сильно поколебалась.

В 1922 г. в статье «Замечание к работе Франца Селети «К космологической системе»» Эйнштейн опять обращается

к принципу Маха. Селети (Selety, Franz) обсудил вопрос о возможности бесконечной Вселенной, в которой не имеет места парадокс Зеелигера. В этой модели Вселенной нет бесконечно больших градиентов потенциалов, а средние скорости звезд малы. Галактики образуют системы. В каждую следующую ступень системы предыдущей входят как составные части.

Возражая против взглядов Селети, Эйнштейн указывает, что в «молекулярном иерархическом мире» так же, как и в «островном мире», не выполняется постулат Маха, «согласно которому инерция отдельного тела должна быть обусловлена совокупностью всех остальных тел в том же смысле, в каком это относится к гравитации. Трудно понять, каким образом Селети сумел бы устранить этот недостаток своей системы. Этот недостаток усугубляется тем, что в общей теории относительности, даже не касаясь космологических проблем, можно показать, что тела ведут себя в первом приближении так, как этого следует ожидать в соответствии с идеей Маха...» [28, стр. 113].

В 1923 г. в докладе «Основные идеи и проблемы теории относительности» Эйнштейн указывает, что уже Ньютон осознал неудовлетворительность закона инерции тем, что в нем нет указания на реальную причину физического выделения состояний движения инерциальных систем по сравнению со всеми другими состояниями движения. «В то время как за гравитационные свойства материальной точки ответственными считаются наблюдаемые материальные тела, для инерционных свойств материальной точки указывается не какая-либо материальная причина, а фиктивная (абсолютное пространство, или инерциальный эфир). Это хотя и не является логически недопустимым, но оставляет чувство неудовлетворенности. По этой причине Э. Мах требовал видоизменения закона инерции в том смысле, что инерцию следовало бы понимать как сопротивление тел ускорению по отношению друг к другу, а не по отношению к «пространству». При таком понимании следует ожидать, что ускоренные тела одинаково ускоряюще действуют на другие тела (ускорительная индукция)» [28, стр. 126—127].

Общая теория относительности, устраняющая разграничение между эффектами тяготения и инерции еще более подкрепляет требование материальной причины инерции. «В пользу требования Маха,— пишет далее Эйнштейн,— говорит еще и то, что, согласно уравнениям поля тяготения, ускорительная индукция действительно существует хотя и является столь слабым эффектом, что возможность непрямого обнаружения с помощью механических опытов исключена» [28, стр. 156]. В этой работе Эйнштейн одновременно вносит и критический момент в отношении принципа Маха. Для выполнения постулата Маха в уравнении поля приходится вводить член, не основанный на опытных

данных и не обусловленный логически остальными членами уравнений поля.

В 1924 г. Эйнштейн высказался более категорически в отношении Маха. «Мы видим,— пишет Эйнштейн,— что для Ньютона «пространство» было чем-то физически реальным. Это ясно понимал Мах, который первым после Ньютона подверг глубокому анализу основания механики. Он пытался избежать гипотезы об «эфире механики», сводя инерцию к непосредственному взаимодействию рассматриваемой массы со всеми остальными массами Вселенной. Хотя эта идея логически и возможна, но в наши дни она как теория взаимодействия уже не может рассматриваться всерьез. Механический эфир, названный Ньютоном «абсолютным пространством», должен оставаться для нас физически реальным» [28, стр. 156].

Критическое отношение к принципу Маха усилилось после 1924 г. На протяжении многих лет Эйнштейн не подвергает его дальнейшему анализу. В 1933 г. в статье «Некоторые замечания о возникновении общей теории относительности» Эйнштейн писал, что к началу его работ над созданием общей теории относительности была известна мысль Маха, что инерция есть сопротивление не столько ускорению самому по себе, сколько ускорению по отношению к массам Вселенной. Хотя эта мысль и казалась ему привлекательной, она не предлагала никакой приемлемой основы для новой теории. В 1949 г. в «Творческой автобиографии» Эйнштейн не критикует Маха, повествовательно излагает его идеи и показывает несовместимость их с духом теории поля. «По мнению Маха, в действительно рациональной теории инертность должна, подобно другим ньютоновским силам, происходить от взаимодействия масс. Это мнение я долгое время считал в принципе правильным. Оно неявным образом предполагает, однако, что теория, на которой все основано, должна принадлежать тому же общему типу, как и ньютонова, основными понятиями в ней должны служить массы и взаимодействия между ними. Между тем нетрудно видеть, что такая попытка решения не вяжется с духом теории поля» [32].

Принцип Маха, как мы знаем, имеет несколько аспектов, неадекватных друг другу. В первоначальной своей форме принцип сводился к утверждению, что понятие «ускорение» лишено физического смысла, если мы не указываем материального объекта, относительно которого оно происходит и что распределение массы-энергии во всем пространстве определяет собой инертные свойства. Уиллер прибегал к принципу Маха для получения необходимых для уравнений поля Эйнштейна граничных условий. Это приводило к модификации не уравнений поля Эйнштейна, а самого принципа Маха. «Принцип Маха,— пишет Дж. Уиллер,— а также идея Римана о том, что геометрия пространства соответствует физике и играет в ней существенную роль, это два

глубоких русла мысли, которые Эйнштейн объединил с помощью своего мощного принципа эквивалентности, получив в результате геометрическое описание тяготения и движения.

...В ходе своих исследований Эйнштейн принял, что гравитация сама является тем взаимодействием, благодаря которому (согласно Маху) один объект влияет на инертные свойства другого» [36, стр. 469]. Приобретает значение радиационная часть взаимодействия, пропорциональная ускорению, статическая же компонента гравитационной силы, обратно пропорциональная квадрату расстояния, несущественна. Это приводит к новой формулировке принципа Маха, согласно которой геометрия пространства — времени и инертные свойства любой бесконечно малой пробной частицы определяются распределением энергии и потоком энергии сразу во всем пространстве.

Уиллер приводит третью формулировку принципа Маха. Принцип Маха есть принцип отбора, он указывает на граничные условия, позволяющие отбросить физически неприемлимые решения уравнений Эйнштейна.

В соответствии с этой формулировкой сравниваются граничные условия в электростатике и в теории тяготения. Подробно анализируется ряд вопросов, связанных с третьей формулировкой принципа Маха (асимптотически плоская геометрия как предельный случай замкнутого пространства и другие).

Уиллер выдвигает ряд возражений против принципа Маха:

1. Принципиально неверно выражать решение $g_{\mu\nu}$ в виде линейной суперпозиции воздействий, обусловленных различными областями пространства, поскольку уравнения поля Эйнштейна нелинейны.

2. Изменение метрики в локально лоренцовой системе, вызванное изменением полного тензора энергии-импульса-натяжений $\delta T_{\mu\nu}$, имеет вид: $h_{\mu\nu} = g_{\mu\nu} - \hat{g}_{\mu\nu}$, $h = \hat{g}^{\mu\nu} \cdot h_{\mu\nu}$, $g_{\mu\nu}$ и $\hat{g}_{\mu\nu}$ — компоненты новой и старой метрик,

$$h_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \hat{g}_{\mu\nu} h = \frac{8\pi G}{c^4} \int \frac{|\delta T_{\mu\nu}|_{\text{зон}}}{r} d^3x.$$

Величина же $\frac{1}{r}$ в беспорядочно искривленном пространстве не может быть достаточно определенной величиной.

3. Сложно судить о предельном вкладе $T_{\mu\nu}$ в инертные свойства, поскольку система могла находиться в то время в особом состоянии.

4. Имеет ли смысл говорить о том, что геометрия определяется распределением массы — энергии и потоком энергии, ибо поскольку не задана геометрия, нельзя судить о том, где находится одна масса или распределение масс.

5. «Стоит ли нарушать логическую красоту теории относительности, примешивая к ней такую неопределенную и математически

неоформленную вещь, как принцип Маха? К чему все эти попытки выразить на точном языке XX века обтрепанную идею XIX столетия, которую пора выбросить раз и навсегда» [36, стр. 471].

Выдвинуты и другие критические мотивы в отношении принципа Маха. Многие авторы детально рассматривали космологический аспект принципа Маха. Необходимо отметить, что методическое изложение теории относительности на протяжении почти 50 лет не было связано с изложением принципа Маха. В последние годы появился ряд работ, трактующих вопросы анизотропии инертной массы.

Поскольку, согласно принципу Маха, инертная масса любого тела определяется всей материей во Вселенной, можно ожидать, что неравномерное распределение масс в Галактике должно привести к некоторой анизотропии инертной массы. В 1958 г. Коккони и Салпитер провели анализ возможностей экспериментального подтверждения этого эффекта [37]. По их расчетам, отношение $\Delta m/m$ (Δm — изменение массы вследствие анизотропии) должно быть порядка 10^{-7} — 10^{-11} .

Для определения такой величины можно воспользоваться эффектом Зеемана, эффектом Мессбауера, ядерным магнитным резонансом.

Представляется интересным замечание В. Л. Гинзбурга [38], что теоретически вопрос необходимо решать в рамках общей теории относительности, хотя Дикке [34, стр. 224] утверждает, что здесь эффект анизотропии отсутствует.

В опытах Белтрана и Робинзона [39] и Гарвея, Кемпера и Ли [40] эффект Зеемана исследовался методом электронного парамагнитного резонанса. Исследованию подвергались атомы кислорода в основном состоянии $3P_2$ и хлора в основном состоянии $2P_{3/2}$. Так как на разных подуровнях направление движения электрона в атоме относительно внешнего магнитного поля различно, то в случае зависимости массы от направления энергии перехода между подуровнями также будет зависеть от анизотропии массы.

$$\Delta E = -\frac{\Delta m}{m} \bar{T} P,$$

где \bar{T} — средняя кинетическая энергия электрона, а P — некоторый коэффициент, определяемый спином и ориентацией магнитного поля относительно центра галактики. Если, например, в отсутствии анизотропии состоянию $P_{3/2}$ соответствует одна зеемановская линия, то анизотропия приводит к образованию триплета или, если эффект слишком слаб, к уширению линии

$$\Delta W = \frac{4}{5} \frac{\Delta m}{m} \bar{T}.$$

Исследовалась зависимость частоты зеемановского перехода от относительной ориентации магнитного поля и направления на центр галактики. В опытах Куша и Хьюза [41] в качестве эталона частоты применялся эталон с пучком атомов цезия типа «атомихрон», работающий на переходе, не подверженном никакому влиянию анизотропии массы. В пределах ошибок измерений не было обнаружено никакого изменения частоты зеемановского перехода. Для количественных оценок верхнего предела возможного значения $\Delta m/m$ необходимо сделать определенные предположения. Электронную систему хлора можно рассматривать как дырку, движущуюся в кулоновском поле ядра и электронов. Тогда, по данным опыта, $\Delta m/m < 10^{-10}$.

Редфорд и Хьюз [42] наблюдали изменение разности энергии двух зеемановских переходов у кислорода в состоянии $3P_2$ при таком направлении на центр галактики, когда влияние анизотропии массы должно быть максимальным. Из их данных также следует, что $\Delta m/m < 10^{-10}$.

У Белтрана и Робинсона и Гарвея, Кемпера и Ли в качестве эталона частоты применялись генераторы, стабилизированные кварцем. Существовало опасение, что их частота сама подвержена влиянию анизотропии массы. Эссен [43] исследовал постоянство частоты генератора, сравнивая ее с частотой упомянутого эталона «атомихрон» с цезиевым пучком. Хотя в течение суток ориентация кристалла меняется относительно направления на центр галактики, никакого изменения частоты обнаружено не было, причем верхний предел для $\Delta m/m$ составлял 10^{-9} .

Высокая чувствительность опытов на основе парамагнитного резонанса обусловлена тем, что наблюдаются зеемановские переходы с высоким разрешением по энергии, а разность зеемановских уровней намного меньше полной энергии связи электронов, тогда как анизотропия массы приводит к значительному изменению кинетической энергии электрона. Поэтому становится возможным экспериментально выявить даже весьма малую относительную анизотропию массы.

Коккони и Салпитер [44] обратили внимание на то, что еще большая чувствительность в определении эффектов, связанных с анизотропией инерции, достижима при исследовании энергетических уровней ядра, так как кинетическая энергия нуклона примерно в 10^6 раз больше, чем у электрона в атоме. В частности, высокое разрешение по энергии может обеспечить эффект Мессбауера, поскольку с его помощью может быть получена очень узкая линия γ -излучения (10^{-5} — 10^{-8} эв). Необходимо сравнить форму линий перехода в Fe^{57} , у которого резонансное поглощение γ -лучей с энергией 14 кэв хорошо изучено, при одинаковой ориентации атомных спинов излучателя и поглотителя и изменения их расположения относительно направления к центру га-

лактики. Формула сдвига уровней остается прежней, но теперь переход, если исходить из оболочечной модели ядра, обусловлен движением нуклона, а не электрона. Если пренебрегать магнитным моментом основного состояния по сравнению с магнитным моментом возбужденного состояния, у которого полный момент $3/2$, то наблюдаемый спектр будет состоять из центральной линии с тремя симметричными равноотстоящими спутниками. При наличии анизотропии массы, в этом случае первый спутник расщепляется, образуя симметричный триплет, а второй — симметричный дублет. Остальные линии остаются простыми. Если же магнитные поля излучателя и поглотителя перпендикулярны, то главная линия также дает симметричный дублет. Максимальный эффект должен получиться, когда магнитные поля параллельны или перпендикулярны направлению к центру галактики.

Если для ориентации магнитных полей не приняты меры и они расположены хаотически, то анизотропия приводит только к уширению линий. Анализ результатов опытов по мессбауеровскому смещению, например Паунда и Ребки, позволяет считать, что уширение не превышает 10^{-8} эв.

Группа Шервина [45] проверяла, обусловлено ли уширение центральной линии при хаотическом расположении ядер излучателя и поглотителя галактическими эффектами. С этой целью измерялась ширина мессбауеровской линии как при хаотическом расположении доменов, так и в магнитном поле, когда атомарные магнитные поля в излучателе и поглотителе были параллельны. Во втором случае галактическое смещение уровней в обоих образцах должно было быть одинаковым и уширение, обусловленное анизотропией масс, должно было исчезнуть. Наблюдения, проводившиеся в течение суток, не выявили значительной разницы между обоими случаями. Однако при таком методе достоверность данных ограничивалась тем обстоятельством, что хотя домены были параллельны, направления внутренних магнитных полей ядер могли быть различными, а следовательно, анизотропия масс могла все-таки вызвать некоторое уширение. Тем не менее эта первая серия опытов вполне определенно показала, что основная часть дополнительного уширения не связана с эффектом анизотропии.

Во второй серии опытов поглотитель помещался в магнитное поле, ориентированное по направлению север — юг, а излучатель — в магнитное поле, направленное под углом 45° к горизонту. Поэтому в течение звездного дня, за который центр галактики делает один полный оборот вокруг линии, параллельной земной оси, ориентация магнитных полей относительно направления на центр галактики меняется и разница смещений уровней вследствие анизотропии инерции должна также меняться, проходя через максимум и минимум. Опыты, проводившиеся в

течение 10 дней, привели к выводу, что при $E=14,4$ кэв $\Delta E/E < 10^{-13}$. По величине $\Delta E/E$ можно оценить и $\Delta m/m$, но только при определенных предположениях о кинетической энергии и коэффициенте P . Если принять, что в данном случае $\bar{T}=10$ Мэв и $P=1/5$, то $\Delta m/m < 5 \cdot 10^{-16}$.

Но принятые предположения не совсем точны, поскольку для ядер Fe^{57} , используемого в опытах с эффектом Мессбауера, оболочечная модель дает не совсем правильные результаты. Кроме того, малое время жизни ядер в возбужденном состоянии дает сравнительно большую неопределенность в определении частоты. Поэтому, по Хьюзу [46], лучшие условия осуществляются при обычном ядерном магнитном резонансе. Хьюз, Робинзон и Белтран проводили эксперимент с ядерным магнитным резонансом на Li^7 , для ядра которого оболочечная модель дает более надежные результаты.

В магнитном поле Li^7 имеет четыре равноотстоящих при отсутствии анизотропии энергетических уровня, а следовательно, лишь одну резонансную частоту. Под влиянием анизотропии должен либо появиться триплет резонансных линий, либо должно наблюдаться уширение линии. Фактически наблюдалась лишь одна линия шириной 1,2 гц, обусловленная отчасти неоднородностью магнитного поля, а отчасти временем тепловой релаксации, связанным с магнитным дипольным взаимодействием ядер Li^7 между собой, причем в течение звездного дня ширина менялась мало. Принимая $\bar{T}=10$ Мэв, авторы оценили верхний предел анизотропии из своих опытов $\Delta m/m < 10^{-22}$.

Наконец, Дривер [47], исследуя прецессию ядер Li^7 в магнитном поле Земли, установил верхний предел $5 \cdot 10^{-23}$.

При теоретической интерпретации всей описанной группы опытов сталкиваются различные точки зрения. В рамках представлений Коккони и Салпитера можно считать, что никакой анизотропии массы не существует. На той же основе Вебер [48] рассматривает проведенные опыты как сильное подтверждение современной формулировки общей теории относительности и отрицания принципа Маха в его сильном варианте. По Дикке [49], анизотропия, вытекающая из принципа Маха, действительно существует, но она не наблюдаема ввиду того, что все поля и частицы подвергнуты ей в равной степени. К этому же сводятся и возражения Эпштейна [50], считающего, что учет анизотропии в члене потенциальной энергии полностью ликвидирует наблюдаемые эффекты.

4. ЭЙНШТЕЙН О ПРОСТРАНСТВЕ И ВРЕМЕНИ

В 1905 г. Эйнштейн опубликовал свою первую и основную работу по специальной теории относительности, коренным образом видоизменившую господствовавшие в классической физике пред-