

---

## ПРИНЦИП МАХА

Ю.С. Владимиров, И.А. Бабенко

*Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова,  
Институт гравитации и космологии РУДН*

В статье изложены истоки появления принципа Маха, показана роль идей Маха в создании Эйнштейном общей теории относительности, а также указаны основные обсуждавшиеся в XX веке трактовки и проявления принципа Маха. Среди них названы попытки обоснования инерции, принципа причинности, стрелы времени и других физических свойств воздействием окружающего мира (всей Вселенной).

**Ключевые слова:** принцип Маха, инерция, массы, принцип причинности, концепция дальнего действия, реляционная природа пространства-времени, Вселенная.

Даже в простейшем случае, в котором мы как будто занимаемся взаимодействием только двух масс, отвлекаться от остального мира невозможно. Дело именно в том, что природа не начинает с элементов, как мы вынуждены начинать. Для нас во всяком случае счастье то, что мы в состоянии временно отвлечь наш взор от огромного целого и сосредоточиться на отдельных частях его. Но мы не должны упускать из виду, что необходимо впоследствии дополнить и исправить дальнейшими исследованиями то, что мы временно оставили без внимания.

*Э. Мах [31. С. 199]*

### Введение

Назначение данной статьи показать, что на протяжении всего XX века предпринимались попытки исправить дефекты редукционистского подхода к физическому мирозданию и учесть влияние со стороны всего окружающего мира на используемые понятия и закономерности. Об этом размышляли многие видные физики и философы, в частности, Р. Фейнман писал, что «абсолютное вращение» также является понятием, лишенным смысла. Когда мы рассматриваем это понятие как фундаментальное предположение или постулат, оно известно как принцип Маха. Возможно, что эта концепция сама по себе может привести к глубоким физическим результатам, многие из которых могут быть получены на том же самом пути, что и принцип относи-

тельности, связывающий системы отсчета с постоянной относительной скоростью. <...> Принцип Маха глубоко бы изменил законы механики, так как обычная механика предполагает, что неускоренное прямолинейное движение должно быть “естественным” движением в отсутствии сил» [2. С. 132]. В настоящее время созрели предпосылки для решения этой проблемы.

### **Истоки идеи о влиянии окружающего мира на локальные свойства тел**

Идея о влиянии окружающего мира на локальные свойства объектов высказывалась давно, однако в конкретном применении к понятиям механики и физики стала формироваться, пожалуй, в середине XIX века в трудах представителей немецкой физической школы, занимавшей тогда лидирующее положение в мировой физике. Так, в работах В. Вебера, К. Неймана и других отвергалось распространение электрического взаимодействия вне зависимости от существования «излучателя» и «приемника». Предполагалось обязательное наличие как источника, так и поглотителя, то есть принципиально отвергалось излучение источником в пустоту (в никуда).

В ряде работ В. Вебера делался вывод, что «непосредственное взаимодействие двух электрических масс зависит не только от этих масс, но также от присутствия третьего тела» (см. [3. С. 225]), и проводилась аналогия с введенным Берцелиусом понятием «каталитической силы». Тем самым делался важный шаг от традиционного понимания взаимодействия, когда полагалось, что сила зависит только от расстояния между двумя телами.

В работах немецких физиков устанавливались связи с философскими направлениями, в которых утверждалось, что поведение отдельных элементов системы не может быть описано без учета свойств системы в целом. Близкие идеи можно найти в философии Г. Лотце, во взглядах виталистов и др. В дальнейшем в физике эти идеи стали называть проявлениями принципа Маха.

Мировоззрение Эрнста Маха сложилось именно в немецкой физической школе середины XIX века, где во главу угла ставился реляционный подход к природе пространства и к описанию физических взаимодействий в рамках концепции дальнего действия. Представителями этой школы тогда было выдвинуто много интересных идей, значительно опередивших свое время. Эрнст Мах, воспитанный в период расцвета концепции дальнего действия, пронес ее идеологию через всю свою жизнь, и впоследствии именно через его труды научный мир смог познакомиться с реляционной метафизической парадигмой.

### **Влияние идей Маха на создание общей теории относительности**

Создавая общую теорию относительности, Эйнштейн был уверен, что реализует реляционные идеи Маха. Это проявилось, например, в письме Эйнштейна к Маху от 25 июня 1913 года: «В будущем году во время сол-

нечного затмения будет проверено, изгибаются ли световые лучи Солнцем или, другими словами, верно ли основное 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 будет то, что инерция проявляется как своего рода взаимодействие тел, вполне в духе Вашей критики ньютоновского эксперимента с вращающимся сосудом» (цит. по: [4. С. 262]).

Идеи Маха (немецкой физической школы XIX века) были возведены в ранг принципа именно А. Эйнштейном в 1919 году, когда он написал, что в основаниях общей теории относительности лежат три принципа: ковариантности, эквивалентности и принцип Маха. Смысл последнего он определил следующим образом: «Принцип Маха: G-поле (метрическое поле. – Ю.В.) полностью определено массами тел. Масса и энергия, согласно следствиям специальной теории относительности, представляют собой одно и то же; формально энергия описывается симметричным тензором энергии: это означает, что G-поле обуславливается и определяется тензором энергии материи» [5. С. 613]. В примечании Эйнштейн разъясняет: «Название “принцип Маха” выбрано потому, что этот принцип является обобщением требования Маха, что инерция должна сводиться к взаимодействию тел».

Однако вскоре стало ясно, что в общей теории относительности идеи Маха выполняются в значительно более узком смысле. Их проявления можно усмотреть лишь в том, что метрика становится функцией координат и зависит от распределения окружающей материи. Она находится из уравнений Эйнштейна, содержащих справа тензор энергии-импульса материи. Однако уравнения Эйнштейна допускают и вакуумные решения, то есть в отсутствие материи, что вступает в острое противоречие с идеями реляционного подхода. Эйнштейн же в ту пору уже уверовал в самостоятельный (первичный) характер пространственно-временного континуума, метрические свойства которого описываются его уравнениями, причем настолько, что, вслед за В. Клиффордом [6], стал полагать, что всю наблюдаемую материю можно представить в виде некоторых проявлений искривленности пространства (-времени).

Осознав несовместимость этой точки зрения с реляционной идеологией, Эйнштейн резко изменил свое отношение к идеям Маха: «По мнению Маха, в действительно рациональной теории инертность должна, подобно другим ньютоновским силам, происходить от взаимодействия масс. Это мнение я в принципе считал правильным. Оно неявным образом предполагает, однако, что теория, на которой все основано, должна принадлежать тому же общему типу, как и ньютонова механика: основными понятиями в ней должны служить массы и взаимодействия между ними. Между тем не трудно видеть, что такая попытка не вяжется с духом теории поля» [7. С. 268]. Таким образом, речь зашла об использовании разных метафизических парадигм. Идеология Маха соответствовала реляционной метафизической парадигме, тогда

как созданием общей теории относительности были заложены основы иной метафизической парадигмы – геометрической.

В работах У.И. Франкфурта [8] подробно описана эволюция отношения Эйнштейна к идеям и принципу Маха, приведены интересные факты и цитаты из работ Эйнштейна различных годов, а также процитированы высказывания других авторов по этому вопросу. Как правило, все они отмечали важную роль идей Маха в создании Эйнштейном общей теории относительности.

Далеко не все физики-теоретики были согласны с доводами Эйнштейна против принципа Маха. Так, Мартин Гарднер пишет, что Эйнштейн вынужден был отказаться от принципа Маха, потому что относительность в ОТО не доведена до предела: «Точка зрения, предполагающая существование пространственно-временной метрики даже в отсутствии звезд, в действительности очень близка к старой теории эфира. Вместо неподвижного, невидимого студня, именуемого эфиром, предполагается неподвижная, невидимая структура пространства-времени. Если принять это предположение, то ускорение и вращение приобретают подозрительно абсолютный характер. Однако если явления инерции относительны по отношению к структуре, созданной звездами, то относительность выступает в своем наиболее чистом виде» [9. С. 61].

Далее Гарднер отмечал, что все старые доводы XVIII и XIX веков о существовании «пространства» или «эфира» независимо от вещества высказываются и сейчас, но теперь спорят о пространственно-временной структуре («метрическое поле») космоса. Заметим, что сам Эрнст Мах критически относился к представлению об абсолютном движении через эфир. Ознакомившись с публикациями опыта Майкельсона, он сразу же заключил, что представления об эфире надо отбросить.

### **Трактовки и проявления принципа Маха**

Несмотря на отказ Эйнштейна от принципа Маха, он продолжал обсуждаться в течение всего XX века многими видными представителями мирового физического сообщества. При этом выяснилось, что имеется множество трактовок этого принципа.

#### ***1. Обоснование инерции посредством принципа Маха***

В своей первоначальной форме принцип Маха сводился к утверждению, что понятие «ускорение» лишено физического смысла, если мы не указываем материального объекта, относительно которого оно происходит и что инертные свойства определяются распределением массы-энергии во всем пространстве.

Как уже отмечалось, Эйнштейн трактовал принцип Маха как обусловленность инертных масс распределением всей материи Вселенной. Это наи-

более распространенное понимание принципа Маха. Эта трактовка поддерживалась многими авторитетными авторами. Так, С. Вайнберг в своей книге пишет: «Таким образом, мы сталкиваемся с неизбежным выбором: необходимо либо допустить существование ньютоновского пространства-времени, которое определяет инерциальные системы и относительно которых реперные галактики покоятся, либо верить, как и Мах, в то, что инерция обусловлена взаимодействием с ускоренной массой всей Вселенной. И если Мах прав, то ускорение, сообщаемое частице любой заданной силой, должно зависеть не только от существования фиксированных звезд, но также, очень слабо, и от распределения материи в непосредственной близости от частиц» [10. С. 31].

П. Девис также обсуждал принцип Маха в трактовке Вселенной как источнике понятия инерции и ставил вопрос о возможности экспериментального подтверждения этого принципа в окрестности Земли. Для этой цели он предлагал использовать опыты с гироскопом на околоземной орбите [11. С. 236–237].

Дж. Нарликар писал, что для Маха «Ньютоновская концепция инерции и ее измерение в единицах массы были для него неудовлетворительными. Если масса – количество материи в теле, то как понимать ее измерение? Для Маха масса и инерция были не внутренними свойствами тела, а следствиями существования во Вселенной, содержащей другую материю. Для того, чтобы измерить массу, необходимо использовать соотношение  $F = m a$ , то есть измерить силу и поделить ее на производимое ею ускорение. Но 2-й закон Ньютона сам зависит от использования абсолютного пространства, которое теперь идентифицируется с фоновым пространством далекой материи. Таким образом, согласно идее Маха, масса как-то определяется далекой материей» [12. С. 500].

Для реализации принципа Маха в такой его формулировке Ф. Хойл и Дж. Нарликар в большой серии работ (1964–1979) развили специальную теорию (см. [13]), названную ими теорией прямого межчастичного гравитационного взаимодействия, однако ее правильнее было бы назвать специальным вариантом теории прямого межчастичного скалярного взаимодействия на фоне искривленного пространства-времени общей теории относительности.

Можно процитировать множество других авторов, обсуждавших принцип Маха в эйнштейновской трактовке, однако ограничение лишь ею существенно сужает понимание Махом влияния окружающего мира на локальные свойства объектов, отраженное в приведенном эпиграфе. Предлагается более расширенная трактовка принципа Маха как обусловленность локальных свойств физических систем глобальными свойствами окружающего мира. В течение XX века обсуждался ряд аспектов такого влияния. Перечислим наиболее существенные из них.

## ***2. Принцип Маха и принцип причинности***

Реляционные взгляды Маха включают в себя описание взаимодействий между материальными объектами на основе концепции дальнего действия. Такая теория, называемая теорией прямого межчастичного взаимодействия, развивалась в работах Фоккера [14], Р. Фейнмана [15], Ф. Хойла и Дж. Нарликара [13] и ряда других авторов. В ней, по определению, взаимодействие между любыми двумя электрическими зарядами (или массами) является наполовину запаздывающим и наполовину опережающим, причем исключить ненаблюдаемые на опыте опережающие взаимодействия волевым образом, как это фактически делается в теории поля, не представлялось возможным. В итоге получилось так, что эта теория была эквивалентна теории поля Максвелла–Лоренца лишь при описании статических и стационарных электромагнитных явлений.

И только в 1945 году Р. Фейнман и Дж. Уилер показали [15], что эту трудность в теории электромагнитного взаимодействия можно преодолеть, если сделать следующий шаг к целостному восприятию мира, то есть если учесть вклады во взаимодействия между любыми двумя зарядами со стороны всех других зарядов Вселенной – своеобразный «отклик Вселенной» на процесс «излучения» (на акт взаимодействия). Методика корректного учета отклика Вселенной составила важную часть всей теории прямого межчастичного взаимодействия, названной Фейнманом и Уилером теорией поглотителя. Она основана на трех постулатах:

- 1) ускоренный заряд в пустом пространстве «не излучает»;
- 2) силы, действующие на любую частицу, складываются из вкладов взаимодействий со всеми другими частицами Вселенной;
- 3) эти взаимодействия являются наполовину опережающими и наполовину запаздывающими, эквивалентными соответствующим половинам решений Лиенара–Вихерта уравнений Максвелла.

В упомянутой работе 1945 года было показано, что если во Вселенной имеется достаточно большое число заряженных частиц, то суммарное воздействие их на частицу-приемник излучения полностью компенсирует опережающее взаимодействие от источника. Кроме того, опережающая часть того же суммарного воздействия, суммируясь с запаздывающим воздействием источника на приемник, приводит к наблюдаемому на опыте запаздывающему взаимодействию.

При получении данных результатов был сделан ряд упрощающих допущений, как-то: предположение о малой плотности зарядов в поглотителе, допущение о равномерности их распределения; считалось, что эти заряды свободные и т. д. Возникает естественный вопрос: а не изменятся ли результаты в более общих случаях? Фейнман подробно проанализировал этот вопрос и показал, что полученные результаты не зависят от подобных обобщений, – существенно лишь предположение о достаточно большом количестве зарядов в поглотителе, то есть «абсолютность» поглотителя.

Данный результат, полученный в работе Дж. Уилера и Р. Фейнмана, многие авторы называют классическим. Он несомненно является одной из важнейших реализаций принципа Маха.

### ***3. Принцип Маха и стрела времени***

Заметим, что приведенные рассуждения Фейнмана и Уилера не однозначны. Неявно был использован существенный постулат, что любое воздействие (излучение) от источника будет поглощено окружающей материей Вселенной, а воздействие на заряд  $j$  со стороны источников из прошлого практически равно нулю. Всю изложенную схему рассуждений можно перевернуть. Для этого достаточно постулировать, что в будущем отсутствуют возможные поглотители, тогда как в прошлом имеется достаточно много источников (постулат «абсолютного излучателя»). В этом случае суммарное запаздывающее воздействие от заряда  $i$  на заряд  $j$  (с учетом отклика Вселенной) обращается в нуль, а опережающее воздействие удваивается. Следовательно, для выбора одной из указанных схем рассуждений необходимы дополнительные соображения. Фактически здесь встает проблема обоснования направления, то есть «стрелы времени» (по образному выражению А. Эддингтона), – направленности всей эволюции физического мира в будущее. В работах Фейнмана и Уилера были использованы термодинамические соображения, однако рядом авторов для этой цели стали привлекаться свойства космологических моделей. Полагалось, что стрела времени определяется фактом расширения Вселенной. Это означает, что на гипотетических этапах сжатия Вселенной все будет обстоять наоборот.

### ***4. Обоснование силы радиационного трения***

Другой принципиально важный результат, следующий из учета поглотителя, состоит в том, что сам «излучающий» источник  $i$  получает дополнительное воздействие в виде силы радиационного трения. Таким образом, в теории прямого межчастичного электромагнитного взаимодействия автоматически возникает сила радиационного трения, которая оказывается обусловленной воздействием на «излучающую» частицу со стороны всех частиц окружающей Вселенной.

Следует вспомнить, сколько усилий было затрачено на объяснение силы радиационного трения в рамках традиционной теории поля (в теоретико-полевой парадигме), причем там до сих пор не устранены все трудности.

### ***5. Принцип Маха как граничные условия в ОТО***

Дж. Уилер пытался реализовать принцип Маха в рамках геометрической (эйнштейновской) парадигмы. Он писал: «Принцип Маха, 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» [16]. Следуя по этому пути рассуждений, Уилер пришел к специфической формулировке принципа Маха: «Принцип Маха есть принцип отбора, он указывает на граничные условия, позволяющие отбросить физически неприемлемые решения уравнения Эйнштейна» [16]. Но он же выдвинул ряд возражений против данного понимания принципа и в конце концов фактически отказался от него: «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» [16].

### **6. Принцип Маха и квантовая механика**

Р. Фейнман в своих «Фейнмановских лекциях по гравитации» неоднократно обращался к принципу Маха. Наибольший интерес представляет его понимание принципа Маха в связи с проблемами квантовой механики: «Утверждение принципа Маха для квантовой теории включает в себя новые эффекты, так как мы не можем говорить о прямолинейных траекториях; мы увидим, что надлежащее утверждение включает в себя до некоторой степени развитие понятия “время”. У Маха была проблема, связанная с тем, как частица “знает”, что она ускоряется. Мах думал, что это обусловлено влиянием распределения удаленных масс, таким влиянием, что ускорение относительно них требует сил. С появлением квантовой механики новый “абсолют” стал определим; абсолютный масштаб длины и времени» [2. С. 132–133].

Фейнман сосредоточивает внимание на происхождении понятия длин. Обсуждая процесс столкновения двух фотонов, он ставит вопрос: «Как фотоны знают, каковы их длины волн в абсолютных единицах с тем, чтобы решить, образовывать ли им пары?» Другими словами, можно сказать, что Фейнман фактически ставил вопрос о происхождении понятия метрики – той проблемы, над которой размышлял еще Б. Риман, написав «или то реальное, что создает идею пространства, образует дискретное многообразие, или же нужно пытаться объяснить возникновение метрических отношений чем-то внешним – силами связи, действующими на это реальное» [17].

Обсуждая этот вопрос, Фейнман дает на него следующий ответ: «Каждый объем пространства должен содержать естественную меру размера (или времени). Принимая философию Маха, мы могли бы сказать, что вышесказанное есть нонсенс, что размер не есть абсолют, если нет ничего, с чем можно было бы его сравнить. Это могло бы быть влияние “туманностей”, которое определяет масштаб времени в каждой точке пространства. Скажем,

комптоновская длина волны относительно размера Вселенной зависит от того, как много “туманностей” находится в ней. Если они частично удалены, то масштаб длины должен был бы предположительно меняться» [2. С. 133].

К сожалению, эти рассуждения Фейнмана не были увязаны с его интерпретацией квантовой механики методом континуального интегрирования и рядом других положений квантовой теории, что стало возможным сделать лишь в последнее время (см. [18]).

### ***7. Принцип Маха и теория элементарных частиц***

Во время приезда в нашу страну в 1971 году Дж.А. Уилер в беседе с теоретиками МГУ поднял вопрос: почему все электроны мира обладают одинаковыми электрическими зарядами независимо от места и способа наблюдения? Он сам же и дал ответ на этот вопрос, написав на стене кафедры теоретической физики над ранее написанным изречением Нильса Бора слова: «Не может быть физики элементарных частиц, имеющей дело лишь с частицами». И расписался: «Ученик Н. Бора». Из этой фразы и из содержания беседы следовало, что Уилер имел в виду влияние всех частиц мира на отдельные взаимодействующие частицы.

О необходимости учета глобальных свойств Вселенной при построении физики элементарных частиц ныне пишут многие известные физики. Так, Брайн Грин, исследователь в области теории струн, в своей книге «Элегантная Вселенная» пишет: «...мы вынуждены бороться со столкновением парадигм, когда пытаемся представить себе Вселенную, которая есть, но в которой каким-то образом не используются понятия пространства и времени. Тем не менее, вероятно, что нам придется привыкнуть к таким понятиям и осознать их смысл еще до того, как мы сможем полностью оценить теорию струн. Причина состоит в том, что современная формулировка теории струн заранее предполагает существование пространства и времени, в котором струны движутся и вибрируют... Такой вывод, однако, подобен оценке творческих способностей художницы, которую для этого заставляют раскрашивать детские “раскраски”» [19. С. 244]. Но самое примечательное состоит в том, что для решения задач физики микромира Грин предлагает привлечь идеи Лейбница и Маха: «Несмотря на то, что точка зрения Ньютона, поддержанная его тремя экспериментально проверенными законами движения, господствовала в течение более двух сотен лет, концепция Лейбница, развитая австрийским физиком Эрнестом Махом, гораздо ближе к современной картине. Как мы видели, специальная и общая теория относительности Эйнштейна решительно устранили понятие абсолютного и универсального пространства и времени. Однако можно спросить, является ли геометрическая модель пространства-времени, играющая центральную роль в общей теории относительности и теории струн, всего лишь удобной формулировкой для описания пространственных и временных отношений между раз-

личными событиями, или необходимо считать что-то, когда говорим о нашем нахождении внутри ткани пространства-времени?» [19. С. 243].

Далее Грин пишет, что «нахождение корректного математического аппарата для формулировки теории струн без обращения к изначальным понятиям пространства и времени является одной из наиболее важных задач, с которыми сталкиваются теоретики. Разобравшись в том, как возникает пространство и время, мы могли бы сделать огромный шаг к ответу на ключевой вопрос, какая геометрическая структура возникает на самом деле» [19].

### **8. Принцип Маха как альтернатива механизма Хиггса**

Известно, что в современной физике микромира, формулируемой в рамках теоретико-полевой парадигмы, массы элементарных частиц вводятся на основе механизма Хиггса, который самым существенным образом опирается на понятие вакуума, то есть полагается, что понятие массы обусловлено исключительно локальными обстоятельствами. Но это противоречит идеологии реляционной парадигмы.

В связи с этим приведем соображения, высказанные Г. Вейлем: «Таким образом, масса элементарных частиц, видимо, носит менее изначальный и универсальный характер, чем их заряд. Заряд находится в таком отношении к электрическому полю, как масса – к гравитационному. Сила отталкивания двух электронов составляет в естественных единицах величину  $\epsilon/r^2$ , где безразмерное число  $\epsilon$  равно примерно  $10^{-41}$ . Оно является еще более загадочным, чем постоянная  $\alpha$  (постоянная тонкой структуры)». Далее Вейль напоминает значение числа Эддингтона  $N$ , равное порядка  $10^{80}$ , и продолжает: «Таким образом, мистический числовой фактор  $\epsilon = 10^{-41}$  оказывается связанным с числом  $N$  (которое можно принять как случайное) зависимостью типа  $\epsilon = 1/N^{1/2}$ . Если сказанное принять всерьез, то отсюда следует, что сила притяжения двух частиц зависит от величины общей массы Вселенной! Эта идея является не столь уж странной, какой она кажется на первый взгляд. Э. Мах давным-давно попытался представить инерционную массу тела как результирующую всех масс, находящихся во Вселенной. Теория гравитации Эйнштейна не удовлетворяет постулату Маха, хотя последний исторически и сыграл определенную роль в разработке этой теории. Постулат Маха все еще ждет своей теории (не будет ли это статистическая теория гравитации, на которую вроде бы указывает квадратный корень в законе  $\epsilon = 1/N^{1/2}$ ?). Итак, единственное, что мы можем пока сказать, – это то, что устройство мира зиждется на двух безразмерных числовых величинах  $\alpha$  и  $\epsilon$ , в тайну которых мы пока не проникли» [20. С. 348–349].

### **9. Принцип Маха и гипотеза Дирака о связи фундаментальных констант**

К принципу Маха имеет самое прямое отношение гипотеза П.А.М. Дирака о связи микро- и макро-фундаментальных физических констант и об их совместном изменении. Здесь имеется в виду замеченная Дираком связь между фундаментальными константами, характеризующими, с одной стороны, элементарные частицы и, с другой стороны, глобальные свойства Вселенной (ее размер, скорость расширения). Он сопоставил две безразмерные константы. Первая из них определяется отношением электростатического и гравитационного взаимодействия электрона и протона в атоме  $e^2/Gm_em_p$ , равным примерно  $2 \cdot 10^{39}$ , где  $e$  – заряд электрона,  $G$  – ньютонова гравитационная постоянная,  $m_e$  и  $m_p$  – соответственно массы электрона и протона. Вторая безразмерная величина определяется отношением принятого ныне возраста Вселенной ко времени прохода светом размера классического электрона  $t = 7 \cdot 10^{39} e^2 / m_e c^3$ , где  $c$  – скорость света. Эти две величины близки друг к другу. Приравняв эти величины друг другу, Дирак высказал гипотезу об изменении гравитационной постоянной обратно пропорционально времени, выраженному в атомных единицах [21. С. 178–181]. Однако из этих рассуждений можно сделать и иные выводы, в частности, о связи микро-констант с характеристикой всей Вселенной, в данном случае с ныне принятыми представлениями о возрасте Вселенной.

Об удивительных корреляциях характеристик микрочастиц и свойств Вселенной писал и Р. Фейнман: «Имеются некоторые числовые совпадения, которые мы можем упомянуть здесь для того, чтобы навести на мысль о том, как “естественные” масштабы длины могут быть в некотором смысле извлечены из космологии. Такое совпадение не содержит в себе “теорию”, как таковую, оно просто используется для того, чтобы проиллюстрировать связь, которая могла бы быть в конце концов предсказана подробной теорией» [2. С. 134].

Ряд любопытных соотношений, связывающих микро-константы и характеристики Вселенной, указывался и анализировался в работах А. Эддингтона [22], Г.А. Гамова, К.П. Станюковича [23] и других авторов.

### **10. Принцип Маха и магнитные поля астрофизических объектов**

Уже в начале XX века ряд авторов (Сузерленд [24], Блеккет [25]) высказывали гипотезу о том, что происхождение магнитных полей астрофизических объектов можно объяснить, если допустить, что электрические заряды элементарных частиц несколько отличаются друг от друга, причем это отличие определяется значениями их масс. Это означает, что электрические заряды протона и электрона слегка отличаются друг от друга. Такое отличие может быть столь ничтожным, что современными экспериментальными методами его невозможно заметить в лабораторных условиях. Однако для

больших масс (для астрофизических объектов), когда главные значения электрических зарядов частиц двух знаков компенсируются, «массовый вклад» в электромагнитное взаимодействие может оказаться существенным.

Очевидно, что у реальных астрофизических объектов дополнительный электрический заряд будет компенсироваться поглощенными заряженными частицами противоположного знака, так что результирующее электрическое поле будет отсутствовать, однако для вращающихся астрофизических объектов следует ожидать некое эффективное магнитное поле, складывающееся из двух частей: 1) из первичного магнитного поля дополнительного (объемного) электрического заряда, обусловленного массой, и 2) вторичного магнитного поля, создаваемого поглощенными (вблизи поверхности) зарядами. Эти два магнитных поля частично компенсируют друг друга, однако в общем случае не полностью. Результирующее магнитное поле должно определяться распределением поглощенных зарядов.

Однако для серьезного отношения к этой гипотезе не хватало теоретического обоснования различия электрических зарядов элементарных частиц с разными массами. В наших работах было показано [18; 26], что в рамках реляционной концепции Лейбница–Маха строится совместная теория прямого электромагнитного и гравитационного взаимодействий, самым непосредственным образом учитывающая принцип Маха. При этом, в частности, получается обоснование чрезвычайно малого отличия электрических зарядов частиц в зависимости от их масс.

Этот подход позволяет под новым углом зрения взглянуть на такие известные явления, как изменения полярности дипольного момента Солнца и Земли, дрейф магнитного полюса Земли, отклонение магнитного полюса от географического и ряд других.

### Заключение

Список изложенных трактовок и проявлений принципа Маха можно было бы продолжить. О многоликости этого принципа писал известный американский физик-теоретик Р. Дикке: «Итак, мы видели, что у принципа Маха много лиц – почти столько же, сколько было исследователей, рассматривающих принцип Маха. Будучи основан на глубоких философских идеях, этот принцип является интуитивным, и его трудно возвысить (или, если угодно, низвести) до уровня количественной теории. Но то, что самого Эйнштейна к его чрезвычайно изящной теории гравитации привели соображения, вытекающие из этого принципа, говорит о многом. Принцип Маха еще может быть очень полезным для физиков будущего» [27].

Как нам представляется, в последнее время сложились условия для построения физической теории, естественным образом реализующей принцип Маха. Для этого понадобилось, прежде всего, осознать, что принцип Маха является лишь одной из трех составляющих реляционной концепции Лейбница–Маха, включающей в себя, во-первых, реляционное понимание приро-

ды пространства-времени, во-вторых, описание взаимодействий в рамках концепции дальнего действия и только, в-третьих, принцип Маха. Без первых двух составляющих реализовать принцип Маха вряд ли удастся, о чем свидетельствуют перечисленные выше гипотезы и обсуждения проявлений этого принципа (см. предыдущую статью в данном журнале).

Кроме того, необходим был адекватный математический аппарат, начала которого были заложены в работах по теории физических структур Ю.И. Кулакова [28; 29] и Г.Г. Михайличенко [30]. Обобщение этой теории в виде теории бинарных систем комплексных отношений минимальных рангов [18; 31] позволило реализовать большую часть из изложенных выше проявлений принципа Маха. Более того, оказалось, что в рамках этой теории некоторые из обсуждавшихся проявлений принципа Маха имеют принципиально иное звучание. Прежде всего, это относится к обоснованию принципа причинности, стрелы времени, фейнмановской интерпретации квантовой механики и некоторых других.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Мах Э.* Механика. Историко-критический очерк ее развития. – Ижевск: Ижевская республиканская типография, 2000.
2. *Фейнман Р.Ф., Моринго Ф.Б., Вагнер У.Г.* Фейнмановские лекции по гравитации. – М.: Янус-К, 2000.
3. *Булюбаши Б.В.* Электродинамика дальнего действия // Физика XIX–XX вв. в общенаучном и социокультурном аспектах (Физика XIX в.). – М.: Наука, 1995. – С. 221–250.
4. *Хёнль Г.* К истории принципа Маха // Эйнштейновский сборник. 1968. – М.: Наука, 1968. – С. 258–284.
5. *Эйнштейн А.* Принципиальное содержание общей теории относительности // Собр. науч. трудов. – Т. 1. – М.: Наука, 1965. – С. 613–615.
6. *Клифффорд В.* О пространственной природе материи // Альберт Эйнштейн и теория гравитации. – М.: Мир, 1979. – С. 36–37.
7. *Эйнштейн А.* Автобиографические заметки // Собр. науч. трудов. – Т. 4. – М.: Наука, 1967. – С. 259–294.
8. *Франкфурт У.И.* Специальная и общая теория относительности, исторические очерки. – М.: Наука, 1968.
9. *Гарднер М.* Теория относительности для миллионов. – М.: Атомиздат, 1967.
10. *Вейнберг С.* Гравитация и космология. – М.: Мир, 1975.
11. *Девис П.* Суперсила / пер. с англ.; под ред. и с предисл. Е.М. Лейкина. – М.: Мир, 1989.
12. *Нарликар Дж.* Инерция и космология в теории относительности Эйнштейна // Астрофизика, кванты и теория относительности. – М.: Мир, 1982. – С. 498–534.
13. *Hoyle F., Narlikar J.W.* Action at a distance in physics and cosmology. – San Francisco: W.N. Freeman and Comp., 1974.
14. *Fokker A.D.* Ein invarianter Variationssatz für die Bewegung mehrerer elektrischer Massenteilchen // Z. Phys. – 1929. – Bd. 58. – S. 386–393.
15. *Wheeler J.A., Feynman R.P.* Interaction with the absorber as the mechanism of radiation // Rev. Mod. Phys. – 1945. – Vol. 17. – P. 157–181.
16. *Уилер Дж.* Принцип Маха и граничные условия для решения уравнения Эйнштейна // Гравитация и относительность. – М.: Мир, 1985.

17. *Риман Б.* О гипотезах, лежащих в основании геометрии // Альберт Эйнштейн и теория гравитации. – М.: Мир, 1979. – С. 18–33.
18. *Владимиров Ю.С.* Реляционная концепция Лейбница–Маха и фундаментальная физика. – М.: ЛЕНАНД, 2016.
19. *Грин Б.* Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории. – М.: Едиториал УРСС, 2004.
20. *Вейль Г.* Бог и Вселенная // Альманах «Метафизика. Век XXI». – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – С. 209–210.
21. *Дирак П.А.М.* Воспоминания о необычайной эпохе. – М.: Наука, 1990.
22. *Eddington A.S.* Fundamental theory. – N.Y.: Cambridge Press, 1946.
23. *Станюкович К.П.* Гравитационное поле и элементарные частицы. – М.: Наука, 1965.
24. *Sutherland W.* Solar magnetic fields and the cause of terrestrial magnetism // Terr. Mag. Planet Sci. – 1900. – 5, 73.
25. *Blackett P.M.S.* The magnetic field of massive rotating bodies // Nature. 159, 658 (1947) // Phil. Trans. Roy. Soc. 245A, 309 (1952).
26. *Владимиров Ю.С., Болохов С.В.* К теории прямого межчастичного электрогравитационного взаимодействия // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. – 2016. – № 2. – С. 27–37.
27. *Дикке Р.* Многоликий Мах // Гравитация и теория относительности. – М.: Мир, 1962.
28. *Кулаков Ю.И.* (С дополнением Г.Г. Михайличенко). Элементы теории физических структур. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1968.
29. *Кулаков Ю.И.* Теория физических структур. – М., 2004.
30. *Михайличенко Г.Г.* Математические основы и результаты теории физических структур. – Горно-Алтайск: РИО Горно-Алтайского госуниверситета, 2012.
31. *Владимиров Ю.С.* Физика дальнего действия. Природа пространства-времени. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2016.

## MACH'S PRINCIPLE

**Yu.S. Vladimirov, I.A. Babenko**

The article describes the sources of the emergence of Mach's principle, shows the role of Mach's ideas in the development by Einstein of the general relativity theory, and recapitulates the main interpretations and manifestations of Mach's principle discussed in the 20th century. Named among them are the attempts at substantiating inertia, the causality principle, the time arrow, and other physical properties by the impact of the surrounding world (the whole Universe).

**Key words:** Mach's principle, inertia, masses, causality principle, long-range action concept, relational nature of space-time, Universe.