

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ОТДЕЛЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

ЭЙНШТЕЙНОВСКИЙ СБОРНИК

1978—1979



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

МОСКВА

1983

Эйнштейновский сборник, 1978—1979: Сб. статей. — М.: Наука, 1983.— 392 с.

«Эйнштейновский сборник, 1978—1979» открывается классическими работами Г. Минковского по электродинамике движущихся тел. В сборнике содержится группа работ, рассматривающих вопросы экспериментальной проверки теории относительности. Вошли также работы, посвященные некоторым аспектам научной биографии Эйнштейна и истории квантовой гравитации.

Издание рассчитано на широкие круги читателей, интересующихся современной физикой и историей физики.

Редакционная коллегия:

академик В. Л. ГИНЗБУРГ,
академик А. А. ЛОГУНОВ,
академик М. А. МАРКОВ,
академик АН ЭССР Г. И. НААН,
доктор экономич. наук Б. Г. КУЗНЕЦОВ

Ответственные редакторы

В. Л. ГИНЗБУРГ, Б. Г. КУЗНЕЦОВ

Составитель

У. И. ФРАНКФУРТ

Г. Е. Горелик

ПЕРВЫЕ ШАГИ КВАНТОВОЙ ГРАВИТАЦИИ И ПЛАНКОВСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Введение

В настоящее время во всяком рассмотрении общей теории относительности (ОТО), включающем и вопрос о границах применимости ОТО, непременно появляются так называемые планковские величины [15, 21, 30, 32]. Эти величины, представляющие собой различные комбинации из фундаментальных констант c (скорость света), G (гравитационная константа) и \hbar (постоянная Планка) вида

$$X_{\text{пл}} = c^\alpha G^\beta \hbar^\gamma,$$

имеющие любые размерности (длины, времени, массы, плотности и т. д.), связываются с границами области применимости классической ОТО, границами, обусловленными необходимостью квантового обобщения релятивистской теории гравитации.

Аргументы, с помощью которых обычно обосновывается такая роль планковских величин, весьма различны — от рассуждений в рамках эскизных вариантов будущей теории квантовой гравитации до простых размерностных соображений. А поскольку последние не требуют каких-либо сложных теоретических конструкций, то можно было бы предположить, что такая, квантовогравитационная роль планковских величин была известна очень давно, чуть ли не самому Планку.

Однако в действительности эти величины Планк ввел в 1899 г. совершенно вне какой-либо связи с квантовой гравитацией. Кроме того, сам факт, что область применимости классической (неквантовой) теории гравитации ограничена планковскими величинами, был осознан довольно поздно. Пределы применимости общей теории относительности (и в неявном виде планковские величины) были обнаружены в 1935 г. советским физиком М. П. Бронштейном в диссертации, посвященной квантованию гра-

витаии. В явном виде на квантовогравитационное значение планковских величин было указано в середине 50-х годов почти одновременно в работах нескольких авторов, хотя это могло произойти гораздо раньше, уже на базе предварительного варианта квантовой механики — боровской модели атома 1913 г.

Цель данной статьи — восстановить «биографию» планковских величин, внимание к которым оправдано уже тем, что это по существу единственный не вызывающий сомнений элемент будущего синтеза теории гравитации и квантовой теории. От самого же синтеза, от квантовой теории гравитации, ожидается, как известно, выяснение фундаментальных проблем космологии и физики элементарных частиц [15—17, 30]. Но даже и не дожидаясь построения полной квантовой теории гравитации, планковские величины используют конструктивным образом при рассмотрении некоторых фундаментальных вопросов физики элементарных частиц, астрофизики и космологии, таких, например, как существование верхней границы спектра масс элементарных частиц [30], компактификация «лишних» измерений в некоторых моделях квантовой теории поля [28], конечная стадия хокинговского испарения черных дыр [18], проблема начальных возмущений, приводящих к наблюдаемой галактической структуре Вселенной [13], вопрос об уравнивании состояния на самых ранних стадиях расширения Вселенной [20] и т. д.

1. Рождение планковских величин

18 мая 1899 г. на заседании Академии наук в Берлине состоялся доклад М. Планка «О необратимых процессах излучения». В этом докладе впервые было указано на существование двух новых универсальных физических констант, обозначенных a и b , и из экспериментальных данных были вычислены их значения. В конце следующего года константу b Планк переобозначил буквой h , а вместо константы a ввел константу $k = b/a$. Так в физике появились постоянная Планка и постоянная Больцмана.

В докладе Планка 1899 г. константа b (т. е. h) не имела еще собственно квантового смысла (не было еще представления о квантах энергии $E = h\nu$), она была введена определением так называемой электромагнитной энтропии.

Само же определение оправдывалось тем, что оно обеспечивало справедливость второго начала термодинамики для явлений электромагнитного теплового излучения и приводило к формуле Вина для распределения энергии в спектре излучения черного тела. А формула Вина, как известно, пригодна только в пределе $\lambda T \rightarrow 0$. Таким, далеко не «торжественно дедуктивным» путем вошла в физику новая постоянная [26, 27, 40]. И тем не менее Планк сразу же назвал ее универсальной. Это объясняется тем, что Планку, который в течение пяти лет пытался решить проблему равновесия между излучением и веществом, был ясен фундаментальный характер искомого распределения энергии в спектре, не зависящий от конкретных свойств вещества.

Именно универсальность новой постоянной могла позволить Планку в том же докладе 1899 г. обратиться к вопросу в общем-то не связанному с основной темой, к вопросу о естественных единицах измерения. В докладе и в статье, излагающей этот доклад [37; 38, с. 191], последний параграф так и называется «Естественные единицы измерения». Планк обращает внимание на то, что выбор единиц во всех используемых системах единиц «сделан не исходя из общей точки зрения, обязательно приемлемой для всех мест и времен, но исключительно исходя из потребностей нашей земной культуры», и, как он пишет, «нетрудно себе представить, что в другое время, при изменившихся внешних обстоятельствах, любая из употребляемых до настоящего времени систем единиц частично или полностью утратила бы свое первоначальное естественное значение».

В связи с этим Планк отмечает, что, опираясь на новые постоянные, а также на скорость света в вакууме c и гравитационную постоянную G , «мы получаем возможность установить единицы длины, массы, времени и температуры (а тем самым и любой другой физической величины. — G, G), которые не зависели бы от выбора каких-либо тел или веществ и обязательно сохраняли бы свое значение для всех времен и для всех культур, в том числе и внеземных и нечеловеческих, и которые поэтому можно было бы ввести в качестве „естественных единиц измерений“». Новые (естественные) единицы выбираются так, чтобы в новой системе единиц каждая из четырех указанных констант обращалась в единицу. Таким образом Планк получает единицы длины, массы, времени и темпе-

ратуры:

$$l_{\text{пл}} = (\hbar G/c^3)^{1/2} = 1,6 \cdot 10^{-33} \text{ см}, \quad (1a)$$

$$m_{\text{пл}} = (\hbar c/G)^{1/2} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ г}, \quad (1б)$$

$$t_{\text{пл}} = (\hbar G/c^5)^{1/2} = 5 \cdot 10^{-44} \text{ с}, \quad (1в)$$

$$\theta_{\text{пл}} = \hbar^{-1} (\hbar c^5/G)^{1/2} = 1,4 \cdot 10^{32} \text{ К} \quad (1г)$$

(здесь используются современные обозначения и величины констант; вместо постоянной Планка h используется принятая сейчас постоянная $\hbar = h/2\pi$). Выпишем еще выражение для «естественной единицы» плотности (которого нет у Планка)

$$\rho_{\text{пл}} = c^5/\hbar G^2 = 5 \cdot 10^{93} \text{ г/см}^3. \quad (1д)$$

Заканчивает параграф (и статью) Планк такими словами: «Эти единицы сохраняют свое естественное значение до тех пор, пока справедливы законы тяготения, оба начала термодинамики и пока остается неизменной скорость распространения света в вакууме. Поэтому, будучи измеренными самыми разными интеллектами посредством самых разных методов, они будут иметь всегда одно и то же значение».

Последний параграф этой статьи Планка производит довольно странное впечатление. Не видно никакой внутренней связи его с основной для этой статьи проблемой равновесия излучения с веществом. Удивление вызывает и сам замысел создать систему единиц, пригодную для всех времен и культур, «в том числе, и для внеземных». И, наконец, непонятно, почему Планк даже не обсуждал возможность привлечь для построения естественных единиц другие известные в то время физические постоянные: заряд и массу электрона, массу атома водорода. Все эти вопросы могут несколько проясниться только при учете общих, методологических установок Планка: особого внимания к абсолютным элементам в физической картине мира, связанного с этим антиантропоморфизма, довольно прохладного отношения к господствовавшей на рубеже веков электромагнитной картине мира.

Для Планка характерен постоянный интерес к соотношениям относительного и абсолютного в развитии науки [19], что в общем-то и не удивительно, если учесть, что он жил в эпоху быстрых и радикальных изменений в физической картине мира. Планк неоднократно затрагивал этот вопрос, особенно выделяя в качестве абсолютных

элементов универсальные константы — «наиболее осязаемые знаки реального мира, целиком сохраняющие свое значение и в новой картине мира» [39, с. 12; 38, с. 647].

По мнению Планка, «самый важный признак всякого естественнонаучного исследования» — это «стремление найти *постоянную*, не зависящую от смены времени и народов картину мира»; цель науки состоит «в полном освобождении физической картины мира от индивидуальности творческого ума... от антропоморфных элементов» [38, с. 631, 632]. Этот антиантропоморфизм делает понятной мысль о «внеземных и нечеловеческих» культурах. В связи с этими же соображениями Планк вспомнил о своей идее естественных единиц в 1908 г. в лекции, прочитанной студентам Лейденского университета, «Единство физической картины мира» [38, с. 626]. Так что для Планка идея естественных единиц была не более, чем выражением его общей методологической установки о роли абсолютных элементов в развитии науки.

По-видимому, первым, кто попытался (хотя и очень неопределенным образом) придать длине, построенной из констант c , G и \hbar , некоторое теоретическое значение, был А. Эддингтон. В 1918 г. (еще до того, как астрономическая экспедиция, возглавленная им, подтвердила эйнштейновский эффект отклонения света) Эддингтон опубликовал обстоятельный обзор «релятивистской теории гравитации» [47]. В заключительном параграфе этого обзора Эддингтон отметил, что «естественные силы» уже не пытаются объяснить на основе механических моделей, а принимают аксиоматически, без дальнейшего анализа, однако он не думает, что эта (аксиоматическая) стадия уже достигнута в случае гравитации. Свое мнение он поясняет следующим образом: «Имеются три фундаментальные константы природы, занимающие выдающееся положение», c , G , \hbar . «Из них мы можем сконструировать фундаментальную единицу длины, величина которой $4 \cdot 10^{-33}$ см. Есть другие естественные единицы длины — радиусы положительных и отрицательных электрических зарядов, но они гораздо большей величины. За возможным исключением теории материи Осборна Рейнольдса¹, ни одна теория не пыта-

¹ Английский физик О. Рейнольдс (1842—1912), известный своими работами по гидродинамике, в 1902 г. объявил о создании всеобщей физической теории, основанной на том, что «имеется одна и только одна мыслимая чисто механическая система, с помощью которой можно объяснить все физические явления, известные

лась дойти до столь тонкого дробления. Но очевидно, что эта длина может быть ключом к некоторой существенной структуре. Может быть осуществимой надежда, что будет достигнуто более ясное знание процессов гравитации и что чрезвычайная общность и выделенность теории относительности будет освещена детальным изучением точного механизма» [47, р. 91]. Впоследствии, однако, Эддингтон не возвращался к длине $l_{пл}$, и в его известной «игре констант» эта величина участия не принимала.

Как планковский вариант «интерцивилизационной» системы единиц, так и предположение об особой роли длины $l_{пл}$ не нашли сочувствия у физиков. В этом отношении характерной была позиция П. Бриджмена, выраженная в его книге «Анализ размерностей» [4], и С. И. Вавилова, под редакцией которого эта книга вышла на русском языке. Во-первых, как отметил Бриджмен, ни о какой однозначности планковских единиц нельзя говорить. С теми же основаниями (а точнее, с тем же отсутствием оснований) в набор констант, определяющий естественную систему единиц, можно было включить другие известные к тому времени константы, например заряд и массу электрона. На рубеже веков все эти константы выглядели довольно равноправно, а в рамках господствовавшей тогда электромагнитной картины мира заряд и масса электрона выглядели даже «естественнее» гравитационной константы.

То, что Планк использовал именно константы c , G , \hbar и игнорировал другие, т. е. фактически признавал c , G , \hbar наиболее фундаментальными, может объясняться следующими причинами. Планк не был приверженцем электромагнитной картины мира, несмотря на взгляды, господствовавшие среди физиков его времени (за исключением, пожалуй, только Эйнштейна — исключением, впрочем, многозначительным). Такая позиция Планка (проявившаяся позже и в его отношении к специальной теории относительности [12]) была связана, по-видимому, с тем, что ему к 1899 г. лучше, чем другим, была ясна неспособность классической электродинамики решить фундаментальную проблему равновесия излучения с веществом. В то же время для него, как настоящего теоретика,

нам во Вселенной. Эта система есть не больше и не меньше, чем бесконечно протяженное расположение однородных сферических гранул с диаметром $5,534 \cdot 10^{-18}$ см (Proc. Roy. Soc. London, 1902, 69, p. 425).

универсальность гравитационного взаимодействия могла компенсировать некоторую обособленность области гравитационных явлений.

И все же Планк не пытался обосновать выделенное положение констант c , G , \hbar . Да и слишком теоретическими были бы, по-видимому, подобные доводы для Бриджмена — будущего нобелевского лауреата за экспериментальные работы в физике высоких давлений, который методологию экспериментатора довел до уровня философской системы (операционализм). Бриджмен вообще не разделял планковского отношения к физическим константам, считая их только «неизбежным злом» [4, с. 53], и тем более не видел какой-либо выделенности констант c , G , \hbar . По поводу приведенного выше предположения Эддингтона об особой роли $l_{\text{пл}}$ он высказался еще резче: «Спекуляции такого рода не могут возбудить симпатии в тех, кто разделяет несколько материалистическую точку зрения моего изложения» [4, с. 106].

Если иметь в виду только явления, доступные для прямого экспериментального изучения, и только метрологический смысл планковских единиц, то, действительно, трудно не согласиться с Бриджменом, что их величины совершенно несуразны. С. И. Вавилов также указал, что «единица массы у Планка могла бы быть реализована водяной капелькой с радиусом около 0,15 мм, бесполезной в качестве эталона в любой области знания» [4, с. 113].

Однако ко времени появления книги Бриджмена уже можно было видеть некоторую теоретическую выделенность констант c , G , \hbar . Действительно, начиная, скажем, с 20-х годов стал ясен всеобщий характер общей теории относительности и квантовой теории, т. е. то обстоятельство, что с точки зрения этих теорий **любое** физическое явление при достаточно высокой требуемой точности должно описываться с их участием; эти теории можно не учитывать, только если требуется точность меньшая, чем Gm/c^2L и \hbar/S (m , L , S — характерные для данного явления масса, расстояние и действие). Тем самым константы c , G , \hbar , участвующие в формулировках ОТО и квантовой теории, получают особое, «всеобщее» значение. Стоит, впрочем, подчеркнуть, что это значение привязано именно к *современному* уровню развития физики; не исключено, например, что подлинное включение в теорию квантованности электрического заряда или спектра масс элементарных частиц изменило бы ситуацию.

Однако легко видеть, что даже если ограничиться константами c , G , \hbar , значениям единиц, на них основанных, нельзя придать единственное, «внеземное и нечеловеческое», значение. Реально исторически это проявилось, например, в том, что планковские единицы *уже* «изменились» в $(2\pi)^{1/2}$ раз в результате замены h на \hbar ; никто также не препятствует называть гравитационной константой коэффициент в уравнении Пуассона $\Delta\varphi = G'\rho$ или в уравнении Эйнштейна $R_{\mu\nu} - 1/2g_{\mu\nu}R = G''T_{\mu\nu}$, так мы получаем еще фактор 4π и т. д. Для целей квантовой космологии можно естественным образом обосновать $cG\hbar$ -единицы, отличающиеся от планковских (1) даже на два порядка [20].

Таким образом, замысел Планка установить «внеземные и нечеловеческие» единицы измерения не удался (как известно, сейчас во «внеземных» целях в качестве единиц предполагается использовать величины, отмеченные самими космическими условиями, например длину волны $\lambda = 21$ см в спектре водорода). Известная и до Планка идея построения естественных систем единиц осталась, но она служит лишь для технических удобств (в расчетах, проводимых в атомной физике, удобно положить равными единице константы e , m_e , \hbar , точно в том же смысле при расчетах бетонных конструкций удобно обратить в единицу плотность бетона, ускорение свободного падения и какой-нибудь коэффициент, характеризующий прочность бетона).

Сам Планк, по-видимому, также разочаровался в своем замысле и перестал упоминать о естественных единицах, хотя физическим константам вообще отводил по-прежнему выдающуюся роль.

2. Гравитация и кванты

Новый этап в истории планковских величин наступил после создания релятивистской теории гравитации — ОТО. На необходимость синтеза новых представлений о гравитации с квантовой теорией первым обратил внимание сам Эйнштейн уже в 1916 г., рассматривая гравитационные волны (в приближении слабого поля) [48, т. 1, с. 522]. Выведя формулу для интенсивности излучения гравитационных волн, он отметил: «...атом, вследствие внутриатомного движения электронов, должен излучать не только электромагнитную, но и гравитационную энергию, хотя и в ничтожном количестве. Поскольку в природе в

действительности ничего подобного не должно быть, то, по-видимому, квантовая теория должна модифицировать не только максвелловскую электродинамику, но также и новую теорию гравитации». В статье 1918 г., целиком посвященной проблемам гравитационных волн, Эйнштейн вновь замечает: «...интенсивность излучения [гравитационных волн] ни в одном направлении не может стать отрицательной, тем более не может быть отрицательной и полная интенсивность излучения. Уже в прежней работе подчеркивалось, что окончательный результат, согласно которому должна происходить потеря энергии телами вследствие теплового возбуждения, вызывает сомнение во всеобщей справедливости теории. Нам кажется, что построение усовершенствованной квантовой теории должно повлечь за собой и видоизменение теории тяготения» [48, т. 1, с. 642]. (Как мы видим, в это время Эйнштейн, еще не принявший программу единой теории, отводит квантовой теории даже более активную роль в синтезе гравитации и квантов.)

В первом из этих замечаний Эйнштейн, по-видимому, имеет в виду проблему нестабильности атома. Однако его вывод вряд ли основан на количественных оценках. Дело в том, что если «высвечивание» атома, рассчитанное в рамках классической электромагнитной теории и приводящее к падению электропа на ядро, происходит за характерное время

$$\tau_{em} = E/\dot{E}_{em} \sim mv^2/(\ddot{d}^2/c^3) \sim c^3 m \omega^{-2} \sim c^3 m^2 r^3 e^{-4} \sim 10^{-10} \text{с}$$

(в вопиющем противоречии с действительностью), то высвечивание энергии атома посредством гравитационного излучения (рассчитанного по формуле Эйнштейна) происходит за характерное время

$$\tau_g = E/\dot{E}_g \sim mv^2/(GD^2/c^5) \sim c^5 G^{-1} m r^4 e^{-4} \sim 10^{36} \text{с}.$$

Так что ни о каком непосредственном противоречии с эмпирическими данными говорить нельзя. В данном случае определяющим для Эйнштейна скорее была аналогия с электромагнитным полем.

«Космологическая» величина времени гравитационного высвечивания атома τ_g дает основание вспомнить, что примерно в это же время Эйнштейн размышлял над космологической проблемой. Тот факт, что для Эйнштейна не важна была величина эффекта, чтобы его отвергнуть, имеет, по-видимому, связь с его предпосылками,

относящимися к космологии, а именно необходимой статичности картины Вселенной. В статической Вселенной, существующей вечно, эффект нестабильности атомов недопустим независимо от величины самого эффекта. Любопытно сопоставить эту позицию, вполне естественную для того времени, с тем фактом, что в наше время возможная нестабильность протона (характеризуемая, кстати, близкой к τ_p величиной 10^{39} с) упоминается в нобелевских лекциях 1979 г. даже как предпочтительная. Таково воздвигшее эволюционной космологической картины.

Не удивителен тот факт, что после того, как Эйнштейн указал в 1916 г. на необходимость построения квантово-гравитационной теории, на долю этой теории в течение двух десятилетий доставались только отдельные замечания — слишком велик был объем стоящих тогда перед теоретической физикой гораздо более насущных проблем (после построения квантовой механики настал черед квантовой теории электромагнитного поля.) Однако даже и эти немногие замечания не отличались большой проницательностью, не вскрывали особые свойства гравитационного поля, подразумевая слишком большую аналогию со случаем электромагнитного поля.

Так, например, в известной статье Гейзенберга и Паули 1929 г., в которой появилась общая схема квантования полей, есть такое замечание: «Следует еще упомянуть, что квантование гравитационного поля, которое необходимо в силу некоторых физических причин, проводится без каких-либо новых трудностей с помощью формализма, вполне аналогичного развитому здесь» [33, с. 32]. По поводу самой необходимости квантового рассмотрения гравитации здесь дается ссылка на упомянутое выше замечание Эйнштейна 1916 г. и на соображение, содержащееся в работе О. Клейна 1927 г. [23], посвященной в целом пятимерной теории. Аргумент Клейна носил скорее методологический характер и сводился к указанию на необходимость единого, учитывающего постоянную Планка описания гравитационных и электромагнитных волн.

Высказывание Гейзенберга и Паули основано на том, что исходной точкой для квантования гравитационного поля они считали полученные еще Эйнштейном в 1916 г. уравнения для слабого гравитационного поля, или линеаризованные уравнения Эйнштейна. Такой заведомо приближенный подход хотя и позволял надеяться на

аналогию со случаем электромагнитного поля, но давал повод забыть о существенно особых свойствах гравитационного поля, связанных с принципом эквивалентности, с геометрическим характером и нелинейностью этого поля.

Именно этот подход использовал Л. Розенфельд, рассматривавший систему, состоящую из квантованных электромагнитного и слабого гравитационного полей, в статье 1930 г. «О гравитационном действии света» [41]. В статье использовался термин «гравитационные кванты» и рассматривались процессы взаимных превращений световых и гравитационных квантов.

Первое действительно глубокое исследование квантования гравитационного поля провел замечательный советский физик Матвей Петрович Бронштейн (о нем см. в [42, 46]) в диссертации 1935 г. Статья Бронштейна «Квантование гравитационных волн» [11, 13], излагающая результаты диссертации, почти целиком посвящена рассмотрению случая слабого гравитационного поля, который, как известно, дает возможность не учитывать геометрический характер гравитационного поля, т. е. искривленность пространства-времени. Однако в работе Бронштейна содержится также очень важный анализ, выявляющий принципиальное различие между квантовой электродинамикой и квантовой теорией гравитационного поля уже без ограничения условием слабости поля и «негеометричности». Этот анализ показал недостаточность обычной схемы квантовой теории поля и понятий римановой геометрии для формулировки полной квантовой теории гравитационного поля и привел к обнаружению границ области существенно квантовогравитационных явлений (а неявным образом и к планковским величинам).

Но прежде чем обратиться к этой работе Бронштейна, рассмотрим тот «фон», на котором появилась сама работа. Указать стройный ряд событий, который однозначно привел к работе Бронштейна о квантовой гравитации, вряд ли возможно; впрочем подобные «стройные ряды событий» своим существованием чаще бывают обязаны фантазии историков науки (точнее, ее недостатку). Однако в том, что эта работа была вовсе не случайной, нетрудно убедиться, рассматривая идейную атмосферу, в которой находился Бронштейн, а также его предшествующие работы.

3. Теория гравитации в работах М. П. Бронштейна

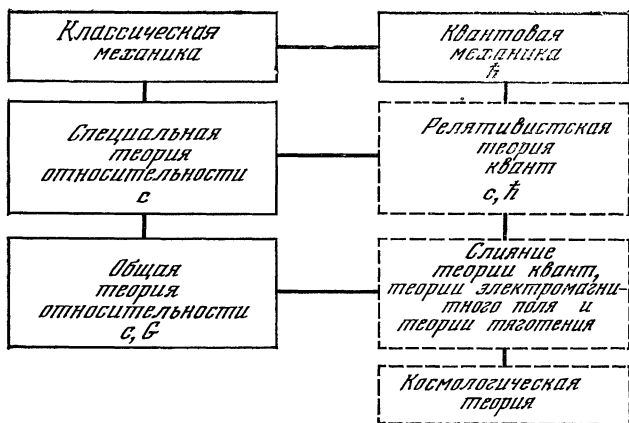
Первые работы Бронштейна, связанные с теорией гравитации, с общей теорией относительности, были посвящены космологии и астрофизике. В 1931 г. в «Успехах физических наук» был опубликован обширный (60 с.) обзор Бронштейна «Современное состояние релятивистской космологии» [5]. В статье 24-летнего автора, ставшей заметным явлением в истории советской космологии², изложен аппарат общей теории относительности и рассмотрены космологические модели, основанные на ОТО: эйнштейновская статическая модель, модель де Ситтера, модели Фридмана и Леметра.

Следует отметить, что в этой статье не высказывается принципиальных сомнений в возможности построения космологической теории, основанной только на ОТО. Дело в том, что в последующих работах Бронштейна, посвященных космологии [6—8], такие сомнения являются одним из основных элементов. В этих статьях Бронштейн пытается обосновать утверждение: «объяснение вселенной в целом в рамках существующих физических теорий невозможно», поскольку «все существующие физические теории симметричны по отношению к обоим направлениям времени», а «та часть истории вселенной, которую мы знаем, не обладает симметрией по отношению к обоим направлениям времени» [8, с. 195, 213]. Бронштейн имел в виду прежде всего термодинамическую выделенность направления времени.

В связи с этим Бронштейн значительное внимание уделял вопросу о границах применимости физических теорий. Большую часть работы [8] составляет раздел «Отношение физических теорий друг к другу и к космологической теории». Свой анализ Бронштейн иллюстрирует схемой (см. рисунок)³. При этом естественным образом возникал вопрос и о границах области применимости ОТО. Однако никакого определенного ответа в этой статье Бронштейн не получил, хотя в ней и фигурирует (правда, не в связи с вопросом о границах применимости ОТО) в качестве универсальной постоянной величина

² Интересно отметить, что физики, читавшие этот обзор в те годы, помнят его до сих пор.

³ Такое рассмотрение «пространства» физических теорий было развито позже А. Л. Зельмановым [22].



Отношение физических теорий друг к другу и к космологической теории [8, с. 210].

Сплошные прямоугольники изображают существующие теории в физике, штриховые соответствуют еще не решенным проблемам

$(\hbar G/c^3)^{1/2}$, т. е. планковская длина. Бронштейн считал, что подлинная космологическая теория «должна увенчать здание физической теории вообще» [8, с. 214], позволяя вычислить все безразмерные величины, характеризующие состояние Вселенной. Эта (в некотором смысле экстремистская) точка зрения, как известно, не была принята, и космологи, не дожидаясь «полного завершения» физической теории, находят разумное оправдание своей деятельности в получении ответов хотя бы на некоторые вопросы космологического характера. Тем не менее Бронштейн поднял действительно фундаментальную проблему, связанную с радикальным отличием подхода к описанию Вселенной (уникального физического объекта, существующего в единственном экземпляре с уникальной историей) и подхода к описанию других физических объектов (для которых могут реализовываться различные начальные условия и соответственно истории). Несмотря на все достижения современной космологии, эта проблема (называемая иногда проблемой начальных условий) до сих пор не получила подлинного решения.

Считая, что общей теории относительности недостаточно для построения космологической теории, Бронштейн, по-видимому, хотел обнаружить какие-то конкретные фи-

зические явления, не подчиняющиеся известным физическим теориям, в частности ОТО, поэтому он (как и Ландау, Дирак и некоторые другие физики) с энтузиазмом встретил гипотезу Бора о нарушении закона сохранения энергии в β -распаде⁴ [36]. Эта гипотеза, как рассчитывал Бронштейн, могла бы не только решить проблему источника излучаемой звездами энергии, но и обосновать неприменимость термодинамики к Вселенной в целом.

О границах применимости ОТО Бронштейн упоминает также в дополнении к русскому переводу книги Эйнштейна «Основы теории относительности» (1935 г.) [10, с. 96]: «Общая теория относительности должна рассматриваться как дальнейшее обобщение частной теории относительности, включающее и явления тяготения. В настоящее время трудно говорить о границах применимости ОТО. Однако следует подчеркнуть, что уравнения ОТО не являются вполне однозначным следствием из ее физических принципов... Поэтому вполне возможно, что ОТО, в ее существующей форме, является лишь предварительным наброском теории и что построение истинной теории тяготения должно быть связано с еще более глубоким преобразованием физических понятий, нежели то, которое достигнуто в общей теории относительности Эйнштейна». Последняя фраза, возможно, уже отражает частично результаты работы по квантованию гравитации [41] — обнаружение принципиальной ограниченности понятий римановой геометрии с учетом квантовых эффектов (см. раздел 4).

Важное значение имела также статья Бронштейна «К вопросу о релятивистском обобщении принципа неопределенности» [9], посвященная привлекавшей в то время большое внимание проблеме измеримости электромагнитного поля. После статьи Ландау и Пайерлса 1931 г. [29, с. 19], поставившей под вопрос непротиворечивость и физический смысл понятия «поле в данной точке», одного из основных понятий в квантовой теории электромагнитного поля, последовала известная работа Бора и Розен-

⁴ В то время считалось, что электроны входят в состав ядра. Тогда из принципа неопределенности с учетом размеров ядра следует, что скорости электронов должны быть ультрарелятивистскими. Поэтому считалось, что β -распад может быть объяснен только (еще не построенной) релятивистской квантовой теорией, «на чей счет» и относилось несохранение энергии.

фельда 1933 г. [3, с. 120], в которой в результате тщательного анализа теория была реабилитирована. Развивая этот анализ, Бронштейн высказал мнение, что в будущей полной теории (описывающей как поле, так и частицы) станут невозможны неограниченно большие величины плотности заряда ρ , которые приходилось привлекать, чтобы обеспечить возможность сколь угодно точного измерения компоненты поля: «Принципиальная невозможность измерить с произвольной точностью поле в будущей релятивистской теории квант будет связана с принципиальным атомизмом материи, т. е. с принципиальной невозможностью беспредельно увеличить ρ ».

В то время (как, впрочем, и до сих пор) не было известно, в какой форме должен быть учтен «принципиальный атомизм материи»; сам характер и возможности будущей «релятивистской теории квант» представлялись очень неясно (Бронштейн, как и другие, считал, например, что эта теория должна определить значение постоянной тонкой структуры теоретически). Но, применяя аналогичные рассуждения к квантовой теории гравитации, Бронштейн обратил внимание на возникающие в общей теории относительности принципиальные ограничения плотности гравитационного заряда, т. е. массы (см. раздел 4).

Перейдем, наконец, к самой работе Бронштейна по квантованию гравитации.

4. «... Принципиальное различие между квантовой электродинамикой и квантовой теорией гравитационного поля».

Итак, общая идейная атмосфера, в которой находился и работал Бронштейн, и в особенности его размышления над космологической проблемой свидетельствуют о вполне мотивированном его обращении к проблеме квантования гравитации, т. е. к анализу последнего, предшествующего полной космологической теории, пунктирного прямоугольника на схеме Бронштейна, приведенной выше. Возможно, конечно, что был и какой-то более непосредственный повод для выбора этой темы. Например, Я. И. Френкель, в тесном контакте с которым находился Бронштейн, писал в конце 40-х годов: «А. Эйнштейн был, вероятно, первым, кто указал на связь между гравитационными волнами и соответствующими частицами (в беседе с автором в 1925 г.). Подробное математическое исследование этого

вопроса было опубликовано в нашей стране М. Бронштейном в 1936 г.» (цит. по [46, с. 147]). Нет, впрочем, сомнения, что к этому времени Бронштейн был уже совершенно самостоятельным физиком.

В статье о квантовании гравитации Бронштейн начинает с классической (неквантовой) теории слабого гравитационного поля (и, в частности, гравитационных волн) как малых возмущений псевдоевклидовой геометрии, когда метрический тензор $g_{\mu\nu}$ может быть представлен в виде

$$g_{\mu\nu} = \delta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu},$$

где $\delta_{\mu\nu}$ — метрика Минковского, а все величины $h_{\mu\nu}$ малы по сравнению с единицей. В этом случае, как показал еще Эйнштейн в 1916 г. [48, т. 1, с. 514], общие нелинейные уравнения ОТО сводятся к линейным уравнениям (с точностью до членов высшего порядка малости по $h_{\mu\nu}$)

$$\square h_{\mu\nu} = \kappa (T_{\mu\nu} - 1/2 \delta_{\mu\nu} T), \quad (2)$$

где $T_{\mu\nu}$ — тензор энергии-импульса, $\kappa = 16\pi G/c^2$, G — ньютоновская гравитационная константа, c — скорость света.

Затем, сконструировав подходящий для этого случая гамильтониан гравитационного поля, Бронштейн выписывает перестановочные соотношения в соответствии с общей схемой квантования полей Гейзенберга и Паули 1929 г.

Однако прежде чем перейти к последовательному построению квантовой картины слабого гравитационного поля, Бронштейн обращается к вопросу, касающемуся синтеза квантовых и гравитационных представлений в общем случае, а не только в случае слабого поля. Проследим за его рассуждениями подробнее.

После краткого обсуждения перестановочных соотношений он пишет: «Можно было бы думать, что здесь, как и в квантовой электродинамике, получается вполне последовательная квантовомеханическая схема, содержащая величины, которые, правда, не всегда могут быть измеряемы с произвольно задаваемой точностью одновременно, но каждая из них может быть сколь угодно точно измерена в отдельности. ... Чтобы понять природу тех физических условий, которые могут сделать это утверждение недействительным, рассмотрим в качестве простейшего примера измерение величины [00,1], т. е. одной из скобок Кристоффеля (играющих, как известно, роль напряженности гравитационного поля. — Г. Г.). Эта величина может

быть измерена посредством пробного тела, движущегося со скоростью, бесконечно малой по сравнению со скоростью света» [11, с. 214]. Действительно, как показывает Бронштейн, в этом приближении, если считать и гравитационное поле слабым, уравнение геодезической для координаты x^1

$$\frac{d^2x^1}{ds^2} + \Gamma_{\alpha\beta}^1 \frac{dx^\alpha}{ds} \frac{dx^\beta}{ds} = 0$$

переходит в уравнение

$$\frac{d^2x}{c^2 dt^2} = \Gamma_{1,00} = \frac{\partial h_{01}}{c \partial t} - \frac{1}{2} \frac{\partial h_{00}}{\partial x}, \quad (3)$$

здесь $x^1 \equiv x$, $\Gamma_{1,00}$ — современное обозначение символа Кристоффеля [00, 1], c — скорость света.

Для измерения значения $\Gamma_{1,00}$ среднего по объему V и за промежуток времени T (а как показали Бор и Розенфельд в 1933 г., в квантовой теории поля можно говорить только о такого рода измерениях) следует измерить компоненту p_x импульса пробного тела, имеющего объем V , в начале и в конце промежутка времени T , поскольку в рассматриваемом приближении

$$\Gamma_{1,00} = \frac{d^2x}{c^2 dt^2} = \frac{p_x(t+T) - p_x(t)}{c^2 \rho V T},$$

где ρ — плотность пробного тела. Поэтому если измерение импульса имеет неопределенность порядка Δp_x , то неопределенность

$$\Delta \Gamma_{1,00} \sim \frac{\Delta p_x}{c^2 \rho V T}. \quad (4)$$

Неопределенность импульса Δp_x состоит из двух слагаемых: обычного квантовомеханического члена $(\Delta p_x)_1 = \hbar / \Delta x$ (где Δx — неопределенность в координате) и «члена, связанного с полем тяготения, создаваемого самим измерительным прибором вследствие отдачи при измерении импульса». Второе слагаемое Бронштейн оценивает следующим образом. Уравнения (2) с учетом используемого приближения дают

$$\square h_{01} = \kappa T_{01} = \kappa \rho v_x / c.$$

Если на отдельное измерение импульса затрачивается промежуток времени Δt (при этом должно быть $\Delta t \ll T$), то неопределенность величины h_{01} , связанная с неопреде-

ленностью скорости отдачи $v_x \sim \Delta x / \Delta t$, имеет порядок

$$\Delta h_{01} \sim \kappa \rho \frac{\Delta x}{c \Delta t} (c \Delta t)^2 = \kappa c \rho \Delta x \Delta t,$$

и согласно (3) неопределенность напряженности гравитационного поля

$$\Delta \Gamma_{1,00} \sim \kappa \rho \Delta x.$$

Соответствующая неопределенность импульса, связанная с собственным гравитационным полем пробного тела, имеет тогда порядок

$$(\Delta p_x)_2 \sim c^2 \rho V \Delta \Gamma_{1,00} \Delta t = c^2 \kappa \rho^2 V \Delta x \Delta t.$$

Таким образом, общая неопределенность импульса

$$\Delta p_x = (\Delta p_x)_1 + (\Delta p_x)_2 \sim \hbar / \Delta x + c^2 \kappa \rho^2 V \Delta x \Delta t. \quad (5)$$

Чтобы сделать эту неопределенность минимальной, нужно, как следует из (5), выбрать

$$\Delta x = (\hbar / \kappa c^2 \rho^2 V \Delta t)^{1/2}. \quad (6)$$

Тогда

$$\begin{aligned} (\Delta p_x)_{\min} &\sim (\hbar \kappa c^2 \rho^2 V \Delta t)^{1/2}, \\ (\Delta \Gamma_{1,00})_{\min} &\sim \frac{1}{c^2 T} \left(\frac{\hbar \kappa c^2 \Delta t}{V} \right)^{1/2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Продолжительность измерения импульса Δt ограничивается снизу двумя условиями. Во-первых, должно быть $\Delta t > \Delta x / c$, чтобы скорость отдачи, вызванной измерением импульса, была меньше скорости света. Отсюда и из (6) следует

$$\Delta t > \tau_1 = \left(\frac{\hbar}{\kappa c^4 \rho^2 V} \right)^{1/3}. \quad (8)$$

Во-вторых, из самого смысла измерения поля в объеме V следует, что величина Δx должна быть меньше размеров пробного тела: $\Delta x < V^{1/3}$. Учитывая (6), получим

$$\Delta t > \tau_2 = \frac{\hbar}{c^2 \kappa \rho^2 V^{2/3}}. \quad (9)$$

Получив эти две нижние границы для Δt , Бронштейн отмечает, что отношение первой из них ко второй

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \left(\frac{c \kappa \rho^2 V^2}{\hbar} \right)^{2/3} \equiv \left(\frac{c \kappa m^2}{\hbar} \right)^{2/3} \quad (10)$$

«зависит от массы пробного тела, будучи совершенно ничтожной величиной в случае электрона и становясь величиной порядка 1 в случае пылинки, весящей сотую долю миллиграмма» [11, с. 216]. Для неопределенностей $\Delta\Gamma_{1,00}$ получаются соответственно две границы

$$(\Delta\Gamma_{1,00})_{\min 1} \gtrsim \frac{1}{c^2 T} \left(\frac{\hbar^2 \kappa c}{\rho V^2} \right)^{1/3}, \quad (11)$$

$$(\Delta\Gamma_{1,00})_{\min 2} \gtrsim \frac{\hbar}{c^2 T \rho V^{4/3}}. \quad (11')$$

Поскольку, как видно отсюда, для возможно более точного измерения $\Gamma_{1,00}$ в данном объеме V следует применять пробные тела возможно большей массы (плотности), то существенной становится только первая граница.

Бронштейн указывает, что предыдущие рассуждения аналогичны соответствующим рассуждениям в квантовой электродинамике (при этом он ссылается на свою работу [9], см. раздел 3), «но на этом месте приходится принять во внимание обстоятельство, из которого обнаруживается принципиальное различие между квантовой электродинамикой и квантовой теорией гравитационного поля. Различие это заключается в том, что в формальной квантовой электродинамике, не учитывающей структуры элементарного заряда, нет никаких принципиальных причин, ограничивающих увеличение плотности (заряда.— Г. Г.) ρ . При достаточно большой плотности заряда пробного тела точность измерения компонент электрического поля может быть сделана какой угодно. В природе, вероятно, существуют принципиальные ограничения плотности электрического заряда (не больше одного элементарного заряда на объем с линейными размерами порядка классического электронного радиуса), однако эти ограничения не учитываются формальной квантовой электродинамикой... Не то — в квантовой теории гравитационного поля: она должна считаться с ограничением, вытекающим из того, что гравитационный радиус пробного тела ($\kappa\rho V$) не может превосходить его действительных линейных размеров

$$\kappa\rho V < V^{1/3}. \quad (12)$$

Если это учесть, то (11) дает «абсолютный минимум неопределенности»

$$\Delta\Gamma_{1,00} > \frac{1}{c^2 T} \left(\frac{\hbar^2 \kappa^2 c}{V^{1/3}} \right)^{1/3}.$$

Бронштейн, конечно, понимает, что этот «абсолютный предел вычислен очень грубо, потому что при достаточно большой массе измерительного прибора начнут, вероятно, играть роль отступления от принципа суперпозиции...», однако он считает, что «аналогичный результат сохранится и в более точной теории, так как он нисколько сам по себе не вытекает из принципа суперпозиции, а соответствует лишь тому факту, что в общей теории относительности не может существовать тел сколь угодно большой массы при заданном объеме. В электродинамике нет никакой аналогии этому факту... вот почему квантовая электродинамика возможна без внутренних противоречий.» Поскольку для гравитации эту трудность нельзя обойти, Бронштейн приходит к фундаментальному выводу: «Устранение связанных с этим логических противоречий требует радикальной перестройки теории и, в частности, отказа от римановой геометрии, оперирующей, как мы здесь видим, принципиально [не] ⁵ наблюдаемыми величинами — а может быть и отказа от обычных представлений о пространстве и времени и замены их какими-то гораздо более глубокими и лишенными наглядности понятиями». И вместо восклицательного знака этот параграф статьи в ЖЭТФе Бронштейн заканчивает немецкой фразой: «Wer's nicht glaubt, bezahlt einen Taler» ⁶.

Именно так впервые были обнаружены пределы применимости общей теории относительности — неквантовой релятивистской теории гравитации.

Само существование таких пределов предвиделось и раньше — достаточно вспомнить замечание Эйнштейна 1916 г. о том, что «квантовая теория должна модифицировать теорию гравитации», неудовлетворенность Эйнштейна тем, что «линейки и часы», используемые в построении ОТО, рассматривались безо всякого учета их микро-

⁵ В тексте пропущено «не» — явная опечатка, сохраненная и в сборнике [1], в котором помещена часть статьи М. П. Бронштейна.

⁶ Эта фраза (в буквальном переводе «Кто не верит этому, тот платит талер») представляет собой измененное с помощью отрицания *nicht* идиоматическое выражение: «Wer's glaubt, bezahlt einen Taler», которое в свою очередь означает: «Этому поверит только простофиля».

Близко знавший М. П. Бронштейна со студенческих лет математик Г. И. Егудин говорит, что здесь звучит живой голос Матвея Петровича, в личности которого интеллектуально-эмоциональное отношение к науке и незаурядный литературный дар были неразделимы,

скопического строения, упоминавшееся замечание О. Клейна 1927 г. и т. д. Однако все эти соображения имели логический или методологический характер. В отличие от этого бронштейновский анализ проведен на чисто физическом, количественном языке.

Единственное, чего может не хватать современному читателю, так это явного указания на роль планковских величин как границ области применимости ОТО. Однако неявно такие величины, конечно, у Бронштейна есть, поскольку в анализ вовлечены все три константы c , G , \hbar . Рассуждения Бронштейна легко дополнить так, чтобы планковские величины возникли и явным образом. Собственно одна такая величина — планковская масса — появилась уже в тексте Бронштейна. Это та самая «пылинка, весящая сотую долю миллиграмма», для которой неопределенности (8) и (9) имеют одинаковый порядок (в статье [12] выписано даже явное выражение для планковской массы).

Чтобы планковские величины «проявились», можно, например, рассуждать так. Будем стремиться измерять напряженность гравитационного поля не только с наименьшей неопределенностью, но и в наименьшем возможном объеме (ведь в ОТО считается имеющим смысл понятие «поле в данной точке»). Тогда уже придется рассматривать обе границы (8) и (9), а не только первую из них. Для уменьшения неопределенности $\Delta\Gamma_{1,00}$ надо использовать максимально возможную плотность пробного тела; в силу (12) это

$$\rho = \kappa^{-1} V^{-2/3}.$$

Тогда границы (8) и (9) превращаются в

$$\tau_1 = (c^{-4} \kappa \hbar V^{1/3})^{1/3}, \quad (8')$$

$$\tau_2 = c^{-2} \kappa \hbar V^{-1/3}, \quad (9')$$

причем τ_1 уменьшается с уменьшением V , а τ_2 растет. Поэтому минимальное значение наибольшей из величин τ_1 , τ_2 достигается при $\tau_1 = \tau_2$. Тогда

$$\tau_1 = \tau_2 = (c^{-3} \kappa \hbar)^{1/2} = t_{\text{пл}}.$$

При этом соответствующие размеры пробного тела

$$l = V^{1/3} = (c^{-1} \kappa \hbar)^{1/2} = l_{\text{пл}},$$

и его масса

$$m = \rho V = (c^{-1} \kappa^{-1} \hbar)^{1/2} = m_{\text{пл}}.$$

Таким образом, область применимости классической теории гравитации ограничивается, действительно, планковскими величинами.

Анализ пределов применимости ОТО, проведенный Бронштейном, нельзя считать совершенно строгим; но вполне понятно, что точное описание области применимости ОТО мог бы дать только анализ, проведенный в рамках (пока еще не существующей) полной квантовой теории гравитации.

Работа Бронштейна не осталась незамеченной. «В своей докторской диссертации, публично защищенной им с большим успехом, М. П. Бронштейн разработал теорию квантования гравитационных волн, имеющую существенное значение для правильного понимания ряда основных положений квантовой электродинамики», — писали Л. И. Мандельштам, С. И. Вавилов и И. Е. Тамм в научной характеристике Бронштейна. Однако фундаментальный результат Бронштейна о принципиальной ограниченности понятий общей теории относительности, обусловленной квантовыми эффектами, по-видимому, не был оценен в полной мере. Во всяком случае В. А. Фок, довольно подробно прореферировавший статью Бронштейна для центрального европейского реферативного журнала, ограничился лишь неопределенной фразой: «...развиты некоторые соображения об измеримости величины поля» [45].

Работа по квантованию гравитации (только один из результатов которой рассмотрен здесь) была важнейшим достижением М. П. Бронштейна, семьдесят пять лет со дня рождения которого исполнилось в декабре 1981 г. Но для физиков, знавших его, нет никаких сомнений, что он достиг бы еще более выдающихся результатов, если бы его жизнь не оборвалась в тридцать лет. Некоторое представление о возможных направлениях его дальнейшей работы дают последние опубликованные статьи Бронштейна, появившиеся в мартовском номере ЖЭТФа за 1937 г.: большая статья «О возможности спонтанного расщепления фотонов», результат которой сохранил значение до нашего времени в связи с интерпретацией космологического красного смещения [21, с. 124], и статья «О магнитном рассеянии нейтронов», основанная на вычислениях, выполненных Бронштейном по просьбе И. В. Курчатова в связи с опытами, которые должны были проводиться.

Рассматривая содержание этих статей, можно предположить, что Бронштейну предстояло работать в квантовой теории поля, включая дальнейшее развитие теории квантовой гравитации, в космологии, ядерной физике.

Однако Бронштейн был вовсе не только «решателем» физических проблем, хотя и обладал большой «физической силой ума» (выражение, употреблявшееся в его окружении).

Широта интересов и кругозора, необыкновенная эрудиция, обаяние творческой личности проявлялись и в его научных работах (в которых, например, очень органично могла появиться цитата из «Оптики» Ньютона в связи с вопросом о превращении квантов электромагнитного поля в гравитационные кванты), и в его научно-популярных статьях и книгах. Он стал одним из создателей нового жанра литературы — научно-художественного. В его книгах «Солнечное вещество», «Лучи Икс», «Изобретатели радио-телеграфа», «Атомы, электроны, ядра», переиздающихся через 30—40 лет после выхода, даже неискушенный читатель может ощутить драму идей, столь характерную для науки нашего века.

Судя по воспоминаниям тех, кто хорошо знал М. П. Бронштейна, он, кроме всего (или даже прежде всего), был замечательным, необычайно доброжелательным человеком. Однако его доброта, не укладывающаяся в обычные «человеческие» мерки и стоившая ему в студенческие годы прозвища «аббат», прекрасно сочеталась с остроумными и тонкими реакциями на происходящие события.

Яркость его личности можно почувствовать в характеристике, которую ему дал в одном из писем Корней Иванович Чуковский:

«За свою долгую жизнь я близко знал многих знаменитых людей: Репина, Горького, Маяковского, Валерия Брюсова, Леонида Андреева, Станиславского, и потому мне часто случалось испытывать чувство восхищения человеческой личностью. Такое же чувство я испытывал всякий раз, когда мне доводилось встречаться с молодым физиком М. П. Бронштейном. Достаточно было провести в его обществе полчаса, чтобы почувствовать, что это человек необыкновенный. Он был блистательный собеседник, эрудиция его казалась необъятной. Английскую, древнегреческую, французскую литературу он знал так же хоро-

шо, как и русскую. В нем было что-то от пушкинского Моцарта — кипучий, жизнерадостный, чарующий ум.

О нем как о физике я судить не могу, но я видел, с каким уважением относились к нему специалисты-ученые, каким благоговением окружали его имя среди студенческой молодежи. Академик Иоффе, академик С. И. Вавилов говорили о нем, как о человеке с большим будущим.

Впрочем, в физике я плохо осведомлен. В качестве детского писателя я могу засвидетельствовать, что книги Бронштейна «Солнечное вещество», «Лучи Икс» и другие кажутся мне превосходными. Это не просто научно-популярные очерки — это чрезвычайно изящное, художественное, почти поэтическое повествование о величии человеческого гения. Книги написаны с тем заразительным научным энтузиазмом, который в педагогическом отношении представляет собой высокую ценность. Отзывы газет и журналов о научно-популярных книгах Бронштейна были хором горячих похвал. Меня, как детского писателя, радовало, что у детей Советского Союза появился новый учитель и друг.

Я убеждал М. П. Бронштейна писать для детей еще и еще, так как вдохновенные популяризаторы точных наук столь же редки, как и художники слова»⁷.

Учитывая многообразие творческих интересов М. П. Бронштейна, нельзя не удивиться, сколь многого он достиг к тридцати годам. Это чувство не меняется существенно, даже если ограничиться только теоретической физикой и обратить внимание на то, что наивысшие достижения величайших физиков XX в. Эйнштейна, Планка, Шредингера, де Бройля и других относятся к «послетридцатилетним периодам» их творческих биографий.

5. Планковские величины и квантовая гравитация

На протяжении двух десятилетий, последовавших за работой Бронштейна, в области квантования гравитации было затишье. С конца 40-х годов начали появляться работы по каноническому квантованию общековариантных теорий поля (см. [2]), однако в них не рассматривались ни вопрос об описании условий, при которых учет квантово-

⁷ За возможность опубликовать это письмо благодарю Е. Ц. Чуковскую — хранительницу архива К. И. Чуковского.

гравитационных эффектов стал бы необходим, ни вопрос о пределах применимости обычной схемы квантования к гравитационному полю. (При рассмотрении, например, космологического прошлого иногда считалось «особым», требующим учета квантовой теории тяготения, уже ядерное состояние вещества с плотностью $\sim 10^{14}$ г/см³.)

И только к середине 50-х годов почти одновременно в различных работах и в различных ипостасях появилась длина $l_0 = (G\hbar/c^3)^{1/2}$ (при этом имя Планка и его работа 1899 г. вначале не упоминались).

В статье О. Клейна 1954 г. [24] и в его докладе на Бернской конференции 1955 г. [25] длина l_0 появилась как одна из естественных единиц при рассмотрении простейших гравитационной и кулоновской «планетных» систем, а также квантового соотношения $E = h\nu$. Однако более интересным было замечание Клейна о том, что длина l_0 соответствует *гравитационной границе области применимости спецрелятивистской квантовой теории*. К этому выводу он пришел следующим образом. Частица, представленная волновым пакетом в объеме λ^3 , имеет энергию $\sim \hbar c/\lambda$ и массу $\sim \hbar/c\lambda$ (если $\lambda \ll \lambda_{\text{комп}} \equiv \hbar/mc$, т. е. если частица релятивистская). Тогда разность гравитационных потенциалов в центре и на краю волнового пакета $\Delta\phi \sim G\hbar/c\lambda^2$ мало изменит метрику, только если $\Delta\phi \ll c^2$ (поскольку компоненты метрического тензора $g_{\mu\nu} \sim 1 + \phi/c^2$), т. е. если $G\hbar/c\lambda^2 \ll c^2$, или $\lambda \gg (G\hbar/c^3)^{1/2} = l_0$.

Длина l_0 возникла и в связи с проблемами физики элементарных частиц. Еще в 1947 г. М. А. Марков [31] обратил внимание на то, что квантовоэлектродинамический «радиус» электрона $r_0 \sim (\hbar/m_e c) \exp(-\hbar c/e^2) \sim 10^{-70}$ см оказывается на 15 порядков меньше гравитационного радиуса электрона; таким образом, пренебрежение гравитационными эффектами оказывается незаконным. Величина $l = G^{1/2}\hbar/ce = \alpha^{-1/2}l_0$, практически близкая к планковской длине (отличающаяся от нее множителем, равным корню из постоянной тонкой структуры $\alpha = e^2/\hbar c$), появилась в работе Л. Д. Ландау, А. А. Абрикосова и И. М. Халатникова 1954 г. [29, т. 2, с. 206; 49] как *граница области, вне которой квантовая электродинамика не может считаться замкнутой теорией из-за необходимости учета гравитационного взаимодействия* (такая величина появляется при сравнении гравитационного взаимодействия двух ультрарелятивистских элект-

ронов Gm^2/r , где $m \sim p/c \sim \hbar/lc$ с их кулоновским взаимодействием e^2/r).

На это обратил внимание В. Паули, под редакцией которого в 1955 г. вышел сборник со статьей Ландау [49]. При обсуждении доклада Клейна на Бернской конференции Паули предположил [34, 35], что существует связь между неприменимостью традиционных методов для квантования гравитации (вследствие неопределенности на световом конусе) и известными проблемами расходимости в квантовой теории поля. Это замечание, встретившее поддержку и других физиков, стимулировало интерес к теории квантовой гравитации.

Первой и наиболее известной среди работ, в которых был указан *квантовогравитационный* смысл величины $l_0 = (G\hbar/c^3)^{1/2}$, оказалась статья Дж. А. Уилера 1955 г. «Геоны» [43]. Основным объектом рассмотрения в этой статье были гравитационно-электромагнитные образования (геоны), которые представлялись как стоячая электромагнитная волна или пучок света, заключенные в тороидальном объеме и удерживаемые благодаря собственному гравитационному полю. В частности, Уилер поставил вопрос о диапазоне значений параметров, в котором геон может рассматриваться классически. Из размерных соображений он получил выражения для параметров геона через характерную величину действия A , константы c , G и азимутальное число n (количество длин волн в стоячей волне):

$$\begin{aligned} \text{масса } m &\sim n^{1/2} (Ac/G)^{1/2}, \\ \text{радиус } r &\sim n^{1/2} (AG/c^3)^{1/2} \\ \text{длина волны } \lambda &\sim n^{-1/2} (AG/c^3)^{1/2}, \end{aligned} \tag{13}$$

$$\text{плотность } \rho \sim nc^5/G^2A,$$

$$\text{величина электрического поля } E \sim (nc^7/G^2A)^{1/2} \text{ и т. д.}$$

Затем Уилер последовательно рассматривает следующие ограничения на возможность классического описания:

1) действие $A \sim \hbar$; тогда из (13) следует $r \sim n^{1/2} 10^{-33}$ см, $m_1 \sim n^{1/2} 10^{-5}$ г;

2) длина волны $\lambda \sim \hbar/mc$ (комптоновская длина волны электрона); тогда из (13) следует $m_2 \sim n \cdot 10^{18}$ г;

3) плотность $\rho \sim 10^{14}$ г/см³ (ядерная плотность); тогда в силу (13) $m_3 \sim n \cdot 10^{35}$ г;

4) величина электрического поля $\sim E_{кр} = m^2 c^3 / e \hbar$ (поле, в котором могут рождаться электрон-позитронные пары); тогда в силу (13) $m_4 \sim n \cdot 10^{39}$ г.

Огромную величину m_4 (а не планковскую массу m_1) Уилер и принимает в качестве нижнего предела для классического геона.

Вместе с тем в статье Уилера содержатся также оценки флуктуаций гравитационного поля (метрики) $\Delta g_{\mu\nu}$ в зависимости от характерных пространственных масштабов L . Используя фейнмановскую форму квантования (суммирование по траекториям), Уилер получает, что флуктуации метрики $\Delta g_{\mu\nu} \sim (G\hbar/c^3)^{1/2}/L$ становятся существенными, когда $L \sim (G\hbar/c^3)^{1/2}$. Именно этот подход стал впоследствии наиболее популярным [32]. Итак, длина $(G\hbar/c^3)^{1/2}$, как оказалось, соответствует *квантовым границам классической общей теории относительности*.

Ставшее сейчас общепринятым название «планковские величины» Уилер ввел несколько позже (впервые о Планке в этой связи было упомянуто в статье Мизнера и Уилера 1957 г. [44, с. 219; с. 192]).

Таким образом, только в середине 50-х годов стало известно квантовогравитационное значение планковских величин. Однако не следует думать, что для этого действительно было необходимо дожидаться фейнмановского способа квантования или даже просто заверщенного аппарата квантовой механики. На самом деле характерные планковские масштабы для квантовогравитационных явлений можно было обнаружить уже с помощью боровского квантового постулата 1913 г.

Действительно, рассмотрим простую систему, состоящую из двух точечных частиц массы m , связанных гравитационным взаимодействием и движущихся по круговой орбите радиуса r . Подчиним эту систему классической механике $ma = mv^2/r = Gm^2/(2r)^2$ и квантовому постулату Бора $2mvr = n\hbar$, $n = 1, 2, \dots$. Чтобы выяснить, при каких значениях параметров системы m и r ее описание должно существенно учитывать квантовые и релятивистские эффекты, нужно положить, что n достаточно близко к единице (скажем, $1 \leq n \leq 2$) и скорость v достаточно близка к скорости света (скажем, $c/2 < v < c$). Эти два неравенства в данном случае примут вид

$$\frac{c}{2} < 1/2 \left(\frac{Gm}{r} \right)^{1/2} < c, \quad 1 \leq \frac{(Gm^2 r)^{1/2}}{\hbar} \leq 2.$$

В результате получаем, что квантовогравитационной области соответствует одновременная близость m и r к их планковским значениям.

Такой вывод до создания квантовой механики был бы не более «незаконным», чем указанные выше рассуждения Клейна и Уилера, поскольку точное установление границ применимости некоторой теории до создания более общей теории является, строго говоря, невыполнимой задачей. Однако реально исторически планковские границы квантовогравитационной области были обнаружены спустя четыре десятилетия после того, как они могли быть обнаружены. Этот факт нельзя объяснить всего лишь малостью квантовогравитационных эффектов; несмотря на внушительное расширение диапазона изучаемых экспериментальной физикой явлений по пространственным масштабам, например с 10^{-8} до 10^{-13} см (в 50-е годы), квантовогравитационная длина 10^{-33} см по существу не приблизилась. Ведь и первый, эйнштейновский, аргумент о необходимости синтеза квантовых и гравитационных представлений опирался на рассмотрение количественно совершенно ничтожного гравитационного излучения атома (см. раздел 2).

Биография планковских величин дает интересный материал для размышлений о своевременности и несвоевременности научных открытий, о роли творческой личности в истории науки.

В настоящее время планковские величины имеют гораздо большее отношение к самой физике, чем к ее истории. Кроме проблем построения квантовой теории гравитации и космологии ранней Вселенной, планковские величины упоминаются в связи с современной ситуацией в физике элементарных частиц. В центре внимания здесь находится, в частности, возможная нестабильность протона. Обсуждаемое время жизни протона $\sim 10^{39}$ с соответствует существованию элементарных частиц с необычайно большой массой, $\sim 10^{16} m_p$, где m_p — масса протона. Чтобы обосновать неабсурдность такого рода величины, указывают прежде всего на значение массы $10^{19} m_p$. «Этот предел, — пишет С. Вейнберг [50], — известен как планковская масса, так как Макс Планк в 1900 г. заметил, что эта масса естественным образом появляется при любой попытке комбинирования его квантовой теории с теорией гравитации. Приблизительно планковская масса эквивалентна энергии, при которой гравитационное взаимодействие между частицами становится сильнее, чем элек-

грослабое или сильное взаимодействия. Чтобы избежать внутренних противоречий между квантовой механикой и общей теорией относительности, при энергии около 10^{19} протонных масс должны появиться некоторые качественно новые эффекты».

Начало приведенной цитаты, более чем вольно обращающееся с фактами истории физики, говорит об уместности описания реальных историко-научных контекстов, в которых возникала планковская масса. Как мы видели, Планк, вводя в 1899 г. массу $(\hbar c/G)^{1/2} \approx 10^{19} m_p$, не только не помышлял о комбинировании квантовой теории с теорией гравитации, но даже не подозревал, что обнаруженная им новая физическая константа приведет к появлению новой физической теории. При комбинировании квантовой теории с теорией гравитации и с указанием «на качественно новые эффекты» планковская масса появилась впервые у М. П. Бронштейна в 1935 г. и, двадцать лет спустя, в работах Дж. Уилера и О. Клейна 1954 г. В том же 1954 г. Л. Д. Ландау обратил внимание на то, что при планковской энергии сравниваются электромагнитное и гравитационное взаимодействия.

В современной же физике все более крепнет убеждение, что участие планковских величин в квантовой гравитации, космологии и физике элементарных частиц будет следствием решения одной проблемы — построения единой теории всех фундаментальных взаимодействий. Как считается, планковская масса соответствует той области энергий, где интенсивности всех фундаментальных взаимодействий становятся сравнимыми.

Литература

1. Альберт Эйнштейн и теория гравитации. М.: Мир, 1979.
2. *Bergman P. G.* — *Helv. phys. acta suppl.*, 1956, 4, p. 79.
3. *Бор Н.* Собр. науч. трудов. М.: Наука, 1971. Т. 2.
4. *Бриджмен П.* Анализ размерностей. Л.; М.: ОНТИ, 1934.
5. *Бронштейн М. П.* — УФН, 1931, 11, с. 124.
6. *Бронштейн М. П.* — В кн.: Успехи астрономических наук. М.; Л.: ГТТИ, 1933, вып. 2, с. 84—103.
7. *Бронштейн М. П.* — *Sow. Phys.*, 1933, 3, p. 73.
8. *Бронштейн М. П.* — В кн.: Основные проблемы космической физики. Киев: ОНТИ, 1934, с. 186—215.
9. *Бронштейн М. П.* — ДАН СССР, 1934, 1, с. 388,

10. *Бронштейн М. П.*— Доп. к кн.: *Эйнштейн А.* Основы теории относительности. М.; Л.: ОНТИ, 1935.
11. *Бронштейн М. П.*— ЖЭТФ, 1936, 6, с. 195. (см. также [1, с. 433]).
12. *Бронштейн М. П.*— *Sow. Phys.*, 1936, 9, p. 140.
13. *Визгин В. П.* Релятивистская теория тяготения. М.: Наука, 1981.
14. *Harrison E. R.*— *Phys. Rev.*, 1970, D1, p. 2726.
15. *Гинзбург В. Л.* О теории относительности. М.: Наука, 1979.
16. *Гинзбург В. Л., Киржниц Д. А., Любушин А. А.*— ЖЭТФ, 1971, 60, с. 451.
17. *Гинзбург В. Л.*— В кн.: Гравитация. Киев: Наук. думка, 1972, с. 40.
18. *Гинзбург В. Л., Фролов В. П.*— Письма в АЖ, 1976, 2, с. 474.
19. *Goldberg S.*— *Hist. Stud. Phys. Sci.*, 1976, 7, p. 125.
20. *Горелик Г. Е., Озерной Л. М.*— Письма в АЖ, 1978, 4, с. 160.
21. *Зельдович Я. Б., Новиков И. Д.* Строение и эволюция Вселенной. М.: Наука, 1975.
22. *Зельманов А. Л.* Космология.— В кн.: Развитие астрономии в СССР. М.: Наука, 1967.
23. *Klein O.*— *Ztschr. Phys.*, 1927, 46, S. 188.
24. *Klein O.*— *Kosmos (Sweden)*, 1954, 32, s. 33.
25. *Klein O.*— *Helv. phys. acta suppl.*, 1956, 4, p. 58.
26. *Кляус Е. М., Франкфурт У. И.* Макс Планк. М.: Наука, 1980.
27. *Кобзарев И. Ю.*— Природа, 1979, № 3, с. 8.
28. *Stetmer E., Sherk J.*— *Nucl. Phys. B*, 1976, 103, p. 399; 1977, 118, p. 61.
29. *Ландау Л. Д.* Собр. трудов. М.: Наука, 1969.
30. *Марков М. А.* О природе материи. М.: Наука, 1976.
31. *Марков М. А.*— ЖЭТФ, 1947, 17, с. 848.
32. *Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж.* Гравитация. М.: Мир, 1977.
33. *Паули В.* Труды по квантовой теории. М.: Наука, 1977.
34. *Паули В.* Физические очерки. М.: Наука, 1975, с. 201.
35. *Pauly W.*— *Helv. phys. acta suppl.*, 1956, 4, p. 68.
36. *Паули В.*— В кн.: Теоретическая физика 20 века. М.: Изд-во иностр. лит., 1962, с. 386.
37. *Planck M.*— *Sitzungsber. Akad. Wiss. Berlin*, 1899, S. 440.
38. *Планк М.* Избр. труды. М.: Наука, 1975.
39. *Планк М.*— Естествознание и марксизм, 1929, № 4, с. 6.
40. *Полак Л. С.*— В кн.: *Планк М.* Избр. труды. М.: Наука, 1975, с. 685.
41. *Rosenfeld L.*— *Ztschr. Phys.*, 1930, 65, S. 589.
42. *Соминский М. С.* Абрам Федорович Иоффе. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1964.
43. *Wheeler J.*— *Phys. Rev.*, 1955, 97, p. 511.

44. Уилер Дж. Гравитация, нейтрино и Вселенная. М.: Изд-во иностр. лит., 1962.
45. Fok V. A.— Zentralbl. Math., 1936, 14, S. 87.
46. Френкель В. Я. Яков Ильич Френкель. М.; Л.: Наука, 1966. См. также предисл. ред. к кн.: Бронштейн М. П. Атомы и электроны. М.: Наука, 1980.
47. Eddington A. Report on relativity theory of gravitation. L., 1918.
48. Эйнштейн А. Собр. науч. трудов. М.: Наука, 1965.
49. Ландау Л. Д.— В кн.: Нильс Бор и развитие физики. М.: Изд-во иностр. лит., 1958, с. 75.
50. Вейнберг С.— УФН, 1982, 137, с. 164.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----|
| <i>Г. Минковский</i> Основные уравнения электромагнитных процессов в движущихся телах | 5 |
| <i>Г. Минковский</i> Вывод основных уравнений для электромагнитных процессов в движущихся телах с точки зрения теории электронов | 64 |
| <i>Г. Вейль</i> Относительность | 92 |
| <i>И. Пригожин</i> Эйнштейн: триумфы и коллизии | 109 |
| <i>Б. Г. Кузнецов</i> Необратимость времени и детерминизм | 124 |
| <i>М. Дж. Клейн</i> Термодинамика в мышлении Эйнштейна | 150 |
| <i>Б. М. Болотовский, С. Н. Столяров</i> Поля источников излучения в движущихся средах | 173 |
| <i>М. Герцештейн</i> О судьбе одного изобретения Эйнштейна | 278 |
| <i>К. Мёллер</i> О возможности экспериментальной проверки общей теории относительности в земных условиях | 280 |
| <i>Г. Р. Билгер, А. Т. Заводны</i> Френелевское увлечение в кольцевом лазере: из- мерение дисперсионного члена | 301 |
| <i>Д. К. Чемпи, П. Б. Мун</i> Отсутствие доплеровского сдвига при движении ис- точника и детектора гамма-излучения по одной кру- говой орбите | 319 |

| | |
|--|-----|
| <i>Д. К. Чемпни, Г. Р. Айзек, А. М. Кан</i> | |
| Эксперимент по «эфирному ветру», основанный на эффекте Мёссбауэра | 323 |
| <i>У. Ф. Паркс, Дж. Т. Доуэлл</i> | |
| Френелевское увлечение эфира равномерно движущейся средой | 329 |
| <i>Г. Е. Горелик</i> | |
| Первые шаги квантовой гравитации и планковские величины | 334 |
| Памяти У. И. Франкфурта (1908—1982) | 365 |
| Библиография работ, опубликованных в «Эйнштейновских сборниках, 1966—1977» | 367 |
| Библиография работ «К столетию со дня рождения Эйнштейна», опубликованных на русском языке | 373 |
| Библиография работ «К столетию со дня рождения А. Эйнштейна», опубликованных на иностранных языках | 379 |