

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

Матвей Бронштейн и квантовая гравитация.
К 70-летию нерешенной проблемы

Г.Е. Горелик

Изложены и проанализированы обстоятельства появления работы М.П. Бронштейна 1935 года о квантовании гравитации — в контексте истории физики и научной биографии автора. В этом первом глубоком исследовании проблемы Бронштейн, анализируя измеримость поля, обнаружил "принципиальное различие между квантовой электродинамикой и квантовой теорией гравитационного поля" и выявил принципиальную трудность соединения ОТО и квантовой теории. Среди явных и неявных участников истории — М. Планк, А. Эйнштейн, В. Гейзенберг, В. Паули, Л. Розенфельд, Л. Ландау и Н. Бор. Обсуждается методологическая уникальность проблемы квантования гравитации, так и не решенной за истекшие 70 лет.

PACS numbers: 01.65.+g, 03.65.Ta, 04.60.-m

Содержание

1. Введение (1093).
 2. Квантование гравитации до 1935 года (1093).
 3. Полупроводники или квантовая гравитация? (1095).
 4. Проблема sh -измеримости. Принцип неопределенности чересчур определен? (1098).
 5. Гравитация и физика микромира в 30-е годы (1099).
 6. "... Принципиальное различие между квантовой электродинамикой и квантовой теорией гравитационного поля" (1100).
 7. Расширение Вселенной в 1937 году (1103).
 8. Десятилетия спустя (1104).
 9. Как достичь внутреннего совершенства без внешнего оправдания? (1105).
- Список литературы (1107).

1. Введение

Подзаголовок статьи может вызвать недоумение: "Что, собственно, произошло в 1935 г.? Разве никто до того не соединял слова «квант» и «гравитация» и не писал формул, содержащих одновременно фундаментальные константы c , G и h (скорость света, гравитационная константа и постоянная Планка)?" Было и первое, и второе, а второе — даже раньше первого. Однако проблема квантовой гравитации во всей ее глубине была

осознана именно в 1935 г. Произошло это осознание в голове Матвея Петровича Бронштейна, а публично и исторически зафиксированным фактом стало в ноябре 1935 г. во время защиты в Ленинградском физико-техническом институте (ЛФТИ) его докторской диссертации, суть которой отражена в двух статьях 1936 г. [1, 2] (фрагмент статьи [2] помещен в [3, с. 433–445]).

Спустя 70 лет глубина проблемы особенно очевидна, поскольку проблема так и не решена, став, вероятно, самым "проклятым" вопросом фундаментальной физики.

Чтобы лучше понять путь Бронштейна к его работе 1935 г. и ее смысл, представим обстоятельства, в которых эта работа была сделана¹.

2. Квантование гравитации до 1935 года

Самый простой и осязаемый ныне синоним квантовой гравитации — так называемые *планковские масштабы* — появился в статье М. Планка еще в 1900 г., но не имел тогда никакого отношения к квантованию гравитации. Не было даже еще и понимания, что в физике началась новая — квантовая — эра. Планк надеялся, что его новорожденную постоянную h (тогда обозначавшуюся буквой h) можно встроить в здание классической физики. А предложенные им "естественные единицы измерения"

$$l_{\text{Pl}} = \left(\frac{hG}{c^3} \right)^{1/2} \approx 10^{-33} \text{ см},$$

$$m_{\text{Pl}} = \left(\frac{hc}{G} \right)^{1/2} \approx 10^{-5} \text{ г}, \quad t_{\text{Pl}} = \left(\frac{hG}{c^5} \right)^{1/2} \approx 10^{-43} \text{ с}$$

Г.Е. Горелик. Центр философии и истории науки, Бостонский университет, США, <http://people.bu.edu/gorelik>, 63 Longwood Ave., Apt. 4, Brookline MA 02446, USA Тел. 1-617-975-2958 E-mail: gorelik@bu.edu

Статья поступила 10 июня 2005 г., после доработки 26 июня 2005 г.

¹ Подробности см. в [4].

имели единственную "практическую" цель, — чтобы новые единицы измерения "сохраняли свое значение для всех времен и для всех культур, в том числе и внеземных, и нечеловеческих" [5, с. 232]. За этим экзотически-межпланетным предложением стояла солидная философия первого чистого физика-теоретика — философия, в которой легко узнать идеал классической физики. По мнению Планка, в основе физики — "стремление найти постоянную, не зависящую от смены времен и народов картину мира", и цель науки состоит "в полном освобождении физической картины мира от индивидуальности творческого ума ... от антропоморфных элементов" [5, с. 631, 632].

Странные планковские величины не встретили сочувствия, а в 1922 г. их попытался "закрыть" П. Бриджмен (в книге *Анализ размерностей* [6]) — знаменитый физик-экспериментатор, взявший за основу своей философии операционализма хорошо знакомую ему практику физических измерений. Он вошел в историю физики, раздвигая пределы "естественного" — практически доступного — диапазона давлений, и раздвинул их от тысяч до сотен тысяч атмосфер. До планковских масштабов было далеко, а если точнее, не хватало сотни порядков. Нетрудно понять физика, разделяющего, по выражению Бриджмена, его "несколько материалистическую точку зрения", который сказал бы, что таким числам нет места в физике, и не удивительно, что для Бриджмена естественность планковских "естественных единиц" была смешотворной. Длина 10^{-33} см настолько не операциональна, что он даже не позаботился о развернутой аргументации.

Столь масштабный философский разрыв — имеющий к тому же количественную меру — ярко характеризует проблему квантовой гравитации, хотя ни Планк, ни Бриджмен о теории гравитации, как о таковой, не говорили.

Между тем ко времени выхода книги Бриджмена в теории гравитации произошли перемены исторического масштаба, связанные с релятивистской теорией гравитации — общей теорией относительности (ОТО). Уже спустя считанные месяцы после создания ОТО Эйнштейн указал на необходимость синтеза новых представлений о гравитации и квантовой теории. Выведя формулу для излучения гравитационных волн, он заметил, что "атом, вследствие внутриатомного движения электронов, должен излучать не только электромагнитную, но и гравитационную энергию, хотя и в ничтожном количестве. Поскольку в действительности в природе ничего подобного быть не может, то, видимо, квантовая теория должна модифицировать не только максвелловскую электродинамику, но также и новую теорию гравитации" [7].

Это краткое замечание² 1916 г. содержит три важных свидетельства. Во-первых, видно, что Эйнштейн отводит квантовой идее ведущую роль. Во-вторых, подразумевает существование параллели между электродинамикой и гравитацией — эту мысль о параллели он в 20-е годы превратит в убеждение о глубинном родстве двух сил и встанет на рельсы Единой теории поля (приведшие его "в никуда"). И наконец, из этого замечания следует, что Эйнштейн был теоретиком не менее высокого полета

мысли, чем Планк. Ведь его эпитет "ничтожное" в данном случае звучит слишком слабо.

Эйнштейн не дал количественных оценок, однако, очевидно, подразумевал знаменитую проблему коллапса "классического" атома Резерфорда — высвечивание энергии электрона и падение его на ядро. Но если электромагнитное высвечивание, рассчитанное по формулам электродинамики Максвелла, происходит за вопиюще короткое время $\sim 10^{-10}$ с, то гравитационное (рассчитанное по формулам, только что полученным Эйнштейном) заняло бы $\sim 10^{30}$ лет. По сравнению с этим временем даже величина возраста Вселенной $\sim 10^{10}$ ничтожна, хотя в 1916 г. само словосочетание "возраст Вселенной" еще не имело смысла в физике. И эйнштейновская уверенность, что "в природе ничего подобного быть не может", касалась не столько атома, сколько Вселенной. Возможность говорить о Вселенной как о физическом объекте Эйнштейн продемонстрировал в следующем, 1917 г., и то, что для него была не важна величина эффекта, чтобы его отвергнуть, говорит о его космологической предпосылке — статичности его картины Вселенной. В статичной Вселенной, существующей вечно, эффект нестабильности атомов недопустим независимо от величины самого эффекта.

После открытия Э. Хаббла 1929 г. у физиков появилась первая возможность говорить о возрасте Вселенной как об экспериментально наблюдаемой величине, и можно было бы отвергнуть довод Эйнштейна на "операционально-измерительных" основаниях, но мысль теоретиков была выше этого. По историческому совпадению именно в 1929 г. в статье Гейзенберга и Паули, давшей общую схему квантования электромагнитного поля, появилось оптимистическое уверение, что "квантование гравитационного поля, которое необходимо в силу некоторых физических причин, проводится без каких-либо новых трудностей с помощью формализма, вполне аналогичного развитому здесь" [9]. Причины — упомянутое замечание Эйнштейна 1916 г. и общее соображение О. Клейна 1927 г. о необходимости единого, учитывающего постоянную Планка описания гравитационных и электромагнитных волн. Так что опять подразумевалась аналогия гравитации с электромагнетизмом.

Оптимистическая уверенность Гейзенберга и Паули исходила, вероятно, из представления, что квантованию подлежат уравнения слабого гравитационного поля, или линеаризованные уравнения Эйнштейна (полученные в 1916 г.). Этот подход впервые в 1930 г. применил — отвечая на поставленный Гейзенбергом вопрос и под руководством Паули — Леон Розенфельд [10]. Вопрос был не особенно физическим (а то и вовсе метафизическим): не бесконечна ли собственная энергия в квантовой электродинамике (КЭД) даже при отсутствии зарядов, если учитывать гравитационное поле света. И Розенфельд подтвердил предположение Гейзенберга — по его выкладкам соответствующая гравитационная энергия получилась бесконечно большой, и тем самым обнаружилась "новая трудность для квантовой теории волновых полей Гейзенберга–Паули". При этом Розенфельд не объяснил, почему можно доверять этой новой бесконечности, полученной в предположении слабости поля.

Таким слабоватым и был задел в области квантования гравитации к тому времени, когда в эту область вошел М.П. Бронштейн. Общее настроение можно,

² К этому доводу Эйнштейн возвращается также в статье [8].

вероятно, назвать вялым оптимизмом и суммировать следующим образом: *гравитацию надлежит проквантовать, делать это можно теми же способами, что и в электродинамике, однако сами эти способы надо еще довести до ума, как-то решив проблему бесконечностей*. Но если квантовая теория электромагнитного поля была совершенно необходима для понимания реальных явлений атомной и ядерной физики, то причинами для квантования гравитации являлись лишь возвышенные "общие соображения", не обязательные для физиков практической ориентации.

3. Полупроводники или квантовая гравитация?

Среди причин появления работы Бронштейна о квантовой гравитации, по крайней мере в форме диссертации, была одна совершенно практическая и даже приземленная. Дело в том, что в СССР до 1934 г. диссертаций не было. Пролетарская власть отменила старорежимные таблицы о рангах и, в частности, ученые степени. Однако после усмирения революционной стихии в ходе строительства сталинизма, в январе 1934 г. правительство решило ввести (в течение двух лет) степени кандидата и доктора наук — "в целях поощрения научной работы и повышения квалификации научных и научно-педагогических кадров". А чтобы новый механизм заработал, необходимо было затравочное количество кандидатов и докторов, степени которым присваивали без защиты.

В июне 1935 г. Ученый совет ЛФТИ присвоил Бронштейну кандидатскую степень — без защиты диссертации — за работы по астрофизике и предложил ему представить докторскую диссертацию "Теория полупроводников". Согласно отзыву Я.И. Френкеля, заведующего теоротделом ЛФТИ: "В настоящее время им [Бронштейном] уже фактически написана докторская диссертация (на тему об электронных полупроводниках), которую он будет защищать в недалеком будущем" [11]. Полупроводниковые работы Бронштейна [12] высоко оценивал и директор ЛФТИ А.Ф. Иоффе [13].

В таких обстоятельствах выбрать совсем другую тему диссертации — поступок нетривиальный. Еще менее тривиальна была новая тема. Своему коллеге по ЛФТИ И.К. Кикоину Бронштейн объяснял, что в докторской диссертации обязательно должны быть длинные непонятные формулы и тут полупроводникам не сравниться с гравитацией. Это объяснение, конечно, говорит лишь о том, что чувство юмора у физиков было в употреблении задолго до эпохи КВН, несмотря на нешуточность эпохи советских 30-х годов.

Диссертацию Бронштейн, похоже, написал за летние месяцы 1935 г. — августом датирована его первая статья о квантовании гравитации [1]. На защите 22 ноября 1935 г. оппонентами выступили И.Е. Тамм и В.А. Фок. Сохранившаяся стенограмма защиты и воспоминания очевидцев свидетельствуют, что поведение диссертанта было не очень диссертабельным — он не "защищался", а рассказывал об очередной своей работе, и когда не согласился с мнением оппонента, высказался прямо и со всей определенностью [14].

В архивных документах, однако, не зафиксировалось, насколько удивлял коллег тематический перепад — от полупроводников к квантовой гравитации. Тогдашнее

расстояние между этими темами было не меньше нынешнего. К середине 30-х годов теория гравитации соотносилась лишь с небесной механикой и космологией. Надежды на участие некоей обобщенной теории гравитации или Единой теории поля в земной микрофизике остались в прошлом и у считанных отшельников, включая, правда, и Эйнштейна. Признак зрелой самостоятельности тогдашней советской физики можно видеть в том, что при огромном уважении к великому физика и восхищении его работами первой четверти века, его увлечение следующей четверти века не разделил никто из видных советских теоретиков.

Конечно, сам объем теоретической физики был тогда гораздо меньше. В те годы Л.Д. Ландау объяснял, что "теоретическая физика, в отличие от экспериментальной — это малая наука, теоретик может освоить ее всю" [15]. Если говорить об "освоении" не только для пассивного понимания, но и для активной работы, то помимо самого Ландау теоретическая физика была малой наукой и для М.П. Бронштейна.

Путь Бронштейна в науку начался в кружке любителей физики при Киевском университете под руководством П.С. Тартаковского. В январе 1925 г. *Журнал русского физико-химического общества* (предшественник *ЖЭТФа*) получил статью 18-летнего Бронштейна "Об одном следствии гипотезы световых квантов". В предположении фотонного строения излучения рентгеновской трубки Бронштейн получил зависимость границы непрерывного рентгеновского спектра от угла излучения. Вывод статьи: обнаружение эффекта добавит еще один аргумент в пользу теории световых квантов, а "в противном случае будет пролит некоторый свет на вопрос о границах применимости теории световых квантов в области рентгеновских лучей". Напомним, что в то время идею фотонов все еще отвергал Нильс Бор, изменивший свое мнение только после эксперимента Боте и Гейгера 1925 г. с эффектом Комптона. Так что юный Бронштейн взялся за самый горячий вопрос тогдашней физики. В том же 1925 г. его статью на ту же тему опубликовал главный тогда немецкий журнал *Zeitschrift für Physik* [16].

В 1926 г. Бронштейн поступил в Ленинградский университет, где примкнул к "Джаз-банду" — веселой группе молодых и увлеченных физиков. Ядром группы были "три мушкетера" — Георгий Гамов, Дмитрий Иваненко и Лев Ландау. Так что Бронштейну досталась роль д'Артаньяна. Жизнь развела трех мушкетеров гораздо дальше, чем фантазия Александра Дюма, но лишь смерть оборвала дружбу Ландау и Бронштейна [17].

В студенческие годы Бронштейн получил совсем не студенческий результат в теории звездных атмосфер, так называемое соотношение Хопфа–Бронштейна [18]. Статью Бронштейна на эту тему представил в *Monthly Notices of Royal Astronomical Society* классик этой области Э. Милн [19].

А в 1931 г. *УФН* опубликовал обстоятельный обзор Бронштейна "Современное состояние релятивистской космологии" — состояние после открытия в 1929 г. первого наблюдательного факта физической космологии — закона Хаббла [19]. Это был первый обзор по космологии.



Г. Гамов, П. Дирак, А. Иоффе, В. Фок, Я. Френкель

Рис. 1. Начало 30-х годов. М.П. Бронштейн в фас и профиль и некоторые участники Всесоюзной ядерной конференции 1933 г. (рисунки Н.А. Мамонтова из статьи М.П. Бронштейна "Всесоюзная ядерная конференция", 1933). Лягушка, по воспоминанию очевидца, была на нарукавной повязке, которую носил Бронштейн как секретарь конференции, и взялась скорей всего из популярной тогда у физиков немецкой фразы: "Jetzt kommt der Moment, wo der Frosch ins Wasser springt" (и тут лягушка прыгает в воду), что соответствует русской идиоме "вот где собака зарыта" и отвечает тогдашнему настроению физиков — в ожидании решительной перемены в понимании микромира.

Молодому теоретику были доступны все этажи здания физики. Возможность это ясно увидеть дают обзоры физических конференций, которые писал Бронштейн для научных и научно-популярных журналов [20].

Особого внимания заслуживает конференция по теоретической физике, прошедшая в Харькове в мае 1934 г. и показавшая, что на карте мировой физики уверенное место заняли советская теоретическая физика в целом и Харьков, в частности. Помимо ведущих теоретиков Москвы и Ленинграда приехал Нильс Бор (то был его первый визит в СССР), его ближайший сотрудник Леон Розенфельд и другие западные теоретики. По словам Бронштейна, "конференция имела скорее характер производственного совещания, а не съезда, цель которого состоит в показе достижений", и он ограничился той частью обсуждений, которая "может представлять интерес и не для одних лишь теоретиков" [21, с. 516].

На конференции обсуждались различные "производственные" проблемы тогдашней физики, а наиболее драматические доклады сделал И.Е.Тамм. Одна его работа (совместно с С.А. Альтшулером) предсказала магнитный момент нейтрона и встретила возражение

Бора, считавшего это несовместимым с нулевым электрическим зарядом нейтрона. Великий Бор оказался в данном случае неправ.

Рассказывая о другой своей работе — гипотезе парных сил в ядре — Тамм уже сам знал, что "неправ", но, тем не менее, изложил отрицательный результат своего расчета. Сейчас мы знаем, что эта работа оказалась важным этапом на пути к мезону Юкавы и что эту "неправильную" идею Тамм в итоге считал самой сильной из своих идей. Вот как драматический момент запечатлен Бронштейном: "Тамм рассказал о том, как на основании теории бета-распада, которую предложил Ферми, можно вычислить взаимодействие между протоном и нейтроном. Это взаимодействие является взаимодействием обменного типа (протон и нейтрон меняются ролями при обмене электроном и нейтрино или же позитроном и нейтрино). При вычислении Тамм исходит из предположения, что протон и нейтрон стабильны. В результате вычисления он получает взаимодействие чересчур слабое для того, чтобы объяснить связь между протоном и нейтроном в ядре. Доклад Тамма вызвал оживленную дискуссию. Примененные им методы вычис-

ления подверглись критике со стороны Ландау; мнения по этому вопросу разделились" [21, с. 518]³.

Интерес к актуальным проблемам сочетался у Бронштейна с широким взглядом на общую архитектуру строящегося здания физики. Именно он предложил хорошо известный сейчас sGh -план этого здания, или "Отношение физических теорий друг к другу и к космологической проблеме". Так он назвал раздел в статье 1933 г. "К вопросу о возможной теории мира как целого" [25], где схематически расположил имеющиеся и предполагаемые теории по области применимости соответственно тому, насколько теория учитывает фундаментальные константы c , G и h . Тогдашняя физика ожидала "релятивистскую теорию квант", или sh -теорию. Но Бронштейн смотрел дальше: "После того как релятивистская теория квант будет построена, задача будет заключаться в том, чтобы построить следующую часть нашей схемы, т. е. слияние квантовой теории (c ее постоянной h), специальной теории относительности (c ее постоянной c) и теории тяготения (c ее G) в одно единое целое".

В тогдашней астрофизике уже появились законные объекты для sh -теории — белые карлики. Была и "незаконная" надежда, впервые высказанная Бором в конце 20-х годов, что "релятивистская теория квант" объяснит источник звездной энергии. Но при этом гравитация играла роль внешнего фактора, так сказать, стенок сосуда. А Бронштейн видел астрофизическую надобность и в sGh -теории, поясняя это простым соображением: если Солнце сожмется до ядерной плотности, то его радиус станет сравнимым с гравитационным радиусом [26].

Главную же задачу для sGh -теории Бронштейн видел в космологии: "...решение космологической проблемы потребует предварительного построения единой теории электромагнетизма, тяготения и квант" [25, с. 28]. Если здесь к электромагнетизму добавить фундаментальные взаимодействия, неизвестные в 1933 г., то получим вполне современное — и уже банальное — высказывание. Но в 1933 г. такое понимание "космологической проблемы" было новым.

Поскольку Бронштейн реально "вычислял" и в астрофизике, и в космологии, это были для него не просто "общие соображения", но все же слишком общие, чтобы человеку с живым воображением и энтузиазмом взяться за "длинные непонятные формулы" квантовой гравитации, неважно, ради диссертации или просто для мировой науки.

И действительно, у Бронштейна была причина и более конкретная, если смотреть глазами теоретика не только вширь, но и вглубь. Сохранилась подходящая иллюстрация — фотография, помещенная в газете *Харьковский рабочий* 20 мая 1934 г. среди материалов об упомянутой конференции по теоретической физике, — сидящие за круглым столиком и беседующие Ландау, Бор, Розенфельд и Бронштейн.

Для беседы у них была тема, которая не просто касалась всех четверых, но и была предметом их статей.



Делает международную конференцию по физике, известный ученый, проф. НИЛЬС БОР, беседует с сотрудниками Украинского физико-технического института. На фото (слева направо) — Ландау, проф. Бор, Розенфельд, Бронштейн.

Рис. 2. Фотография, помещенная в газете *Харьковский рабочий* 20 мая 1934 г. среди материалов о конференции по теоретической физике. Слева направо: Л. Ландау, Н. Бор, Л. Розенфельд и М. Бронштейн.

Об этом предмете, правда, нет ни слова в отчете Бронштейна в *УФН*, но это объяснимо его намерением отчитаться "не для одних лишь теоретиков". Тема была настолько теоретична, что по-настоящему занимала лишь немногих, — характер грядущей "релятивистской теории квант". В нынешнем лексиконе это можно было бы заменить "квантовой электродинамикой", но такая замена не дала бы ощутить драматическую перестройку в мышлении теоретиков о физике микромира на рубеже 20–30-х годов.

Квантовая теория электромагнитного поля считалась важной составляющей "релятивистской теории квант", но не исчерпывала ее. В конце 20-х годов не было и намека на какие-то иные кроме электромагнетизма силы микромира, а всё, что знали об электромагнетизме, не могло объяснить, что удерживает положительный заряд ядра. В ту — донейтронную — эпоху ядра предполагались составленными из протонов и "внутриядерных" электронов. Соотношение неопределенностей и малость размеров ядра вели к тому, что "внутриядерные" электроны имеют большие — релятивистские — скорости. А до открытия позитрона sh -уравнение Дирака считалось обремененным серьезнейшей "плюс-минус" проблемой. Поэтому от "релятивистской теории квант" ожидали разгадки целой грозды загадочных проблем, включая бесконечности, проблему ядерных спинов и непрерывный спектр бета-распада.

Ожидалась революционная перестройка физики, сравнимая с релятивистской и квантовой. Лидер революционных настроений Н. Бор ради успеха перестройки был готов пожертвовать законом сохранения энергии. Такое настроение разделял и Ландау, в это самое время познакомившийся с Бором и на всю жизнь "записавший себя" в его ученики.

Одно дело — общие ожидания, другое — конкретный, пусть даже очень теоретический, результат. В январе 1931 г. Ландау совместно с Р. Пайерлсом получил революционный результат: самая естественная задача "релятивистской теории квант" — квантовая теория электромагнитного поля — нерешаема из-за дефектности основного понятия "поле в точке". С этого и началась история, развитие которой не могли не обсуждать в Харькове за круглым столом четверо теоретиков.

³ Отсюда, в частности, видно, что бытующее выражение "силы Тамма–Иваненко" не отражает исторической реальности — вопреки мнению С.С. Герштейна [22] и в согласии со свидетельством Е.Л. Фейнберга [23]. Подробнее см. [24].

4. Проблема ch -измеримости. Принцип неопределенности чересчур определен?

Квантовая механика вместе с принципом неопределенности (1927 г.) принесла с собой ограничения на применимость понятий, унаследованных от классической физики. Эти " h -ограничения" касались совместной измеримости некоторых величин, например, координаты и импульса: $\Delta x \Delta p > h$, но оставалась возможность говорить о сколь угодно точном значении каждой величины в отдельности, что обосновывало применение самих этих величин в h -теории.

Вскоре после того, как был осознан смысл h -ограничений, возник вопрос о характере квантовых ограничений при учете релятивизма — ch -ограничениях. Мысленные эксперименты (например "гейзенберговский микроскоп") давали сколь угодно точные результаты лишь при игнорировании c -теории. А важнейший физический объект — электромагнитное поле — был релятивистским еще до создания теории относительности, поскольку уравнения Максвелла включают в себя константу c .

Ландау и Пайерлс свою статью 1931 г. назвали "Распространение принципа неопределенности на релятивистскую теорию". Анализируя мысленные эксперименты в ch -области, они пришли к выводу, что там неизбежны уже не только парные, но и индивидуальные неопределенности. Физика нового ограничения связана с тем, что при измерении "поля в точке" необходимо как можно точнее измерить положение пробного заряда, что возможно лишь при достаточно большом импульсе (малой длине волны) измеряющей частицы, но тогда большой импульс отдачи пробного заряда порождает дополнительное поле, искажая само измеряемое поле. Отсюда следовал вывод — понятие "поле в точке" неопределимо. На этом основании авторы поставили под сомнение тогдашний подход к квантованию электромагнитного поля и предсказали, что "**в правильной релятивистской квантовой теории, которая пока не существует, не будет ни физических величин, ни измерений в смысле волновой механики**" [27].

В статье, написанной в Цюрихе (в январе 1931 г.), огромное влияние Бора видно по ссылкам на его статьи и устные дискуссии в Копенгагене. Авторы явно считали, что развивают идеи Бора и, в частности, теоретически обосновывают его гипотезу о несохранении энергии в ch -физике. Однако когда в феврале 1931 г. Ландау и Пайерлс приехали в Копенгаген к Бору, тот их результат принял в штыки. Ситуацию запечатлел шарж Г. Гамова и воспоминание тогдашнего ассистента Бора — Леона Розенфельда:

"Я прибыл в Институт в последний день февраля 1931 г., и первым, кого я увидел, был Гамов. Когда я спросил, что новенького, он в ответ протянул рисунок, только что им сделанный. Там был изображен Ландау, привязанным к стулу и с кляпом во рту. Перед ним стоял Бор с поднятым пальцем и говорил: «Ландау, ну, пожалуйста! Дайте же мне хоть слово сказать!» Оказалось, что Ландау и Пайерлс приехали всего за несколько дней до того и привезли с собой какую-то статью, которую они хотели показать Бору. «Но, — добавил Гамов весело, — похоже, он не согласен с их доводами — и такие вот дебаты идут все время». Пайерлс уехал за день до того, «в состоянии полного изнеможения», как сказал Гамов.



Рис. 3. Дискуссия Ландау с Бором об измеримости поля, 1931 г.

Ландау оставался еще несколько недель, и у меня была возможность убедиться, что Гамов преувеличивал не более чем допустимо для художника" [28].

Ландау, однако, остался при своем мнении, и статья была опубликована.

Около двух лет теоретики высокого полета воспринимали эту работу как очень важную, хотя она не столько открыла новое направление исследований, сколько решительно закрыла старое, — у разнообразных проблем и парадоксов, накопившихся в околоядерной физике, откопался один общий глубокий корень. Так воспринимал эту работу и Бронштейн, который уже в самой первой своей статье был готов к тому, что эксперимент обнаружит "*границы применимости теории*", а тут границы применимости обнаружились "теоретическими экспериментами".

Соображения, связанные с наблюдаемостью, измеримостью физических величин, сыграли важную роль уже в анализе понятия одновременности в теории относительности. В квантовой механике такие соображения стали рабочим инструментом, а то и общим местом. В 1931 г. в рецензии на книгу Дирака⁴, упрекая автора в недооценке квантово-релятивистских проблем, Бронштейн процитировал ехидное определение Паули: "*Die Observable ist eine Groesse, die man nicht messen kann*" (Наблюдаемая — это такая величина, которую невозможно измерить) и предложил свою формулировку: "*Принцип неопределенности обычной квантовой механики чересчур определен для релятивистской теории квантов*" [30].

Тем временем Бор работал совместно с Розенфельдом над тем, чтобы свои устные возражения Ландау превратить в основательный текст и защитить квантовую неопределенность от "релятивистской угрозы". Это заняло два года и завершилось весной 1933 г. огромной статьей, "*знаменито темной и трудной*" по

⁴ Издана на русском языке в 1932 г. [29].

выражению известного физика и историка науки С. Швебера [31]. Действительно, эта супертеоретическая статья устрашает и своим объемом (более 60 страниц) и обилием лабораторной терминологии в описании мысленных экспериментов: пробные тела произвольной массы и заряда, способные вдвигаться одно в другое, бесчисленные маленькие зеркала у каждой части пробного тела, жесткие крепления к твердому каркасу, гибкие магнитные нити и т.п. (см. [32], [33, с. 139–142]).

Однако основная идея защиты ясно изложена на самых первых страницах, где указано слабое место в рассуждениях Ландау–Пайерлса: для измерения поля они использовали в качестве пробных тел точечные заряды — идеализацию, взятую из квантовой механики атомных явлений. Но в классической теории поля само понятие точечного заряда не имеет вполне законного статуса. Другое дело, вполне осуществимое в доквантовой физике, — измерить (среднее) поле в какой-то конечной области пространства с любой заданной точностью. Если допустить, что измерить величину поля мешают какие-то ch -причины, то должен существовать некий пространственный масштаб, ограничивающий размеры области пространства, в которой такое измерение еще возможно. Однако квантовая теория электромагнитного поля опирается лишь на две универсальные константы — c и h , из которых "нельзя составить какую-либо характерную длину", а значения зарядов и масс элементарных частиц — это лишь внешние параметры, не встроенные органически в само здание теории [33, с. 121].

Соображения размерности, при всей их мощи, все же лишь "теорфизика для бедных (экспериментаторов)" — они могут дать результат, но не объяснить его. Бор же хотел объяснить со всей основательностью. И основное содержание статьи реализует его представление о том, что измерительный прибор должен быть принципиально макроскопическим, классическим. Физическая идея его лабораторной техники состояла в том, что для измерения поля с заданной точностью необходимо бросить заряженное пробное тело с достаточно большой массой, чтобы импульс отдачи не порождал слишком большого поля. В итоге: "*... в отношении проблемы измеримости квантовая теория поля представляет свободную от противоречий идеализацию в той мере, в какой можно отвлечься от всех ограничений, связанных с атомистической структурой источников поля и измерительных приборов*" [33, с. 162].

Если Бор ставил перед собой задачу переубедить Ландау, то он ее не решил — Ландау так никогда не признал свою с Пайерлсом работу ошибочной. А Бронштейн не только понял и принял результат Бора–Розенфельда, но, можно сказать, понял его лучше авторов. Это следует из заметки Бронштейна в ДАН (направленной в январе 1934 г.) [34]. Бронштейн усовершенствовал логику мысленных экспериментов Бора–Розенфельда, изложив ее на трех страницах (вместо шестидесяти). Рассуждения Бронштейна лучше соответствуют ориентировочному характеру мысленных экспериментов и яснее показывают физическую природу вывода Бора о "несмертельности" ch -ограничений для электродинамики: мысленному экспериментатору нужна неограниченная свобода выбора заряда и массы пробного тела. И хотя общий вывод остался прежним, Бронштейн подчеркнул, что возможности любой теории придется согласовывать с

возможностями природы: "*Принципиальная невозможность измерить с произвольной точностью поле в будущей релятивистской теории квант будет связана с принципиальным атомизмом материи, т.е. с принципиальной невозможностью беспредельно увеличивать [плотность заряда]*" [34, с. 389].

Эта заметка Бронштейна уже вышла к моменту, когда газетный фотограф застал четверых физиков за одним круглым столом в Харькове в мае 1934 г. Но вполне вероятно, что общая ch -тема была для них не главной. Ведь с 1931 г., когда Ландау поставил ch -вопрос ребром, поле теоретической битвы изменилось кардинально. Гордиев узел квантово-релятивистских проблем не пришлось разрубать. Большая его часть развязалась благодаря физикам-экспериментаторам. Нейтрон, позитрон и нейтрино, за считанные месяцы вошедшие в физическую картину мира, превратили некоторые проблемы в триумфальные подтверждения теоретической картины. Только с нынешней точки зрения решение клубка головоломных проблем оказалось прозаическим. Меряя тогдашним аршином, можно сказать, что картина микромира изменилась в четыре раза: было две элементарные частицы, а стало восемь (с учетом всех античастиц). И тут, казалось бы, не до гравитации — к физике микромира не причастной. Но, как ни странно, гравитация оказалась причастной к истории физики микромира.

5. Гравитация и физика микромира в 30-е годы

Из всех новообретенных частиц у нейтрино был самый сомнительный статус — до прямой экспериментальной регистрации было еще очень далеко. С гипотезой нейтрино, предложенной Паули для объяснения непрерывного спектра бета-электронов, тогда успешно конкурировала боровская гипотеза несохранения энергии в "релятивистской теории квант". Работа Ландау о предельной массе звезды из ферми-газа (1932 г.), которая сейчас соотносится с теорией белых карликов и черных дыр, в то время воспринималась иначе. Сам Ландау считал, что обосновал наличие в звездах "патологических" областей, требующих для своего описания ch -теории и, в соответствии с идеей Бора, рождающих энергию излучения звезд "из ничего": "*Следуя красивой идее проф. Нильса Бора, можно думать, что излучение звезд обязано просто нарушению закона сохранения энергии, который, как впервые указал Бор, не справедлив в релятивистской квантовой теории, когда отказывают законы обычной квантовой механики (что доказывается экспериментами по непрерывному спектру электронов β -распада и стало вероятным благодаря теоретическому рассмотрению [27]). Мы ожидаем, что все это должно проявляться, когда плотность материи станет столь большой, что атомные ядра придут в тесный контакт, образовав одно гигантское ядро*" [35].

В том же настрое Бронштейн в статье 1933 г. "О расширяющейся вселенной" предложил космологическую модель, реализующую гипотезу Бора: несохранение энергии учтено эффективно в уравнениях ОТО в виде космологического лямбда-члена, зависящего от времени. Так к физике микромира подключилась эйнштейновская теория гравитации и ... тут же фактически исключила гипотезу Бора. В добавлении к статье Бронштейна, датированном 13 января 1933 г., читаем:

"Ландау привлек мое внимание к тому факту, что выполнение гравитационных уравнений эйнштейновской теории для пустого пространства, окружающего материальное тело, несовместимо с несохранением массы этого тела. Это обстоятельство строго проверяется в случае решения Шварцшильда (сферическая симметрия); физически это связано с тем фактом, что эйнштейновские гравитационные уравнения допускают только поперечные гравитационные волны, но не продольные..." [36].

Иными словами, сколь бы не была экзотична физика ядра (или "патологической" области звезды), законы ОТО — вдали от всей экзотики — не допускают перенности массы-энергии.

Узнав об этом простом соображении (из письма Гамова), Бор ответил, что, тем хуже для гравитации: "....я вполне согласен, что отказ от сохранения энергии принесет столь же серьезные последствия для эйнштейновской теории гравитации, как возможный отказ от сохранения заряда для теории Максвелла". И тут же сообщил свою квантово-релятивистскую новость: "В течение этой осени нам с Розенфельдом удалось подтвердить... полное соответствие основ формализма квантовой электродинамики и измеримости величин электромагнитного поля. Надеюсь, некоторым утешением для Ландау и Пауэрса будет то, что глупости, которые они совершили в этом отношении, не хуже тех, в которых повинны все мы, включая Гейзенберга и Паули, по этому противоречивому вопросу" [37].

В 1934 г. по поводу того же замечания Ландау Бор еще задал отчаянный вопрос: "Должны ли мы с необходимостью требовать, чтобы все эти эффекты гравитации имели такое же отношение к атомным частицам, какое электрические заряды имеют к электронам" [38]. Но к тому времени идея нейтрино уже весьма прочно вошла в физику — и благодаря экспериментам, и благодаря фермиевской теории бета-распада. Свидетельством этого стала и работа Тамма о парных ядерных силах. В письме Дираку за неделю до Харьковской конференции 1934 г. он писал: "Каково Ваше мнение об этой теории Ферми? Мне очень не по душе представление о нейтрино, но в настоящее время, кажется, нет другого выхода из трудностей. Прилагаю к письму заметку о некоторых следствиях из теории Ферми. Если Вы найдете ее достаточно интересной, не могли бы Вы направить ее в «Nature»?" [39].

Современный физик может испытать неловкость за великого Бора, столь упорно покушавшегося на закон сохранения энергии, или за "детский" довод великого Ландау (из-за смехотворной малости гравитационных эффектов в микрофизике). Но неловкость превращается в сочувствие, когда узнаешь, что великий Паули, с самого начала не веривший в несохранение энергии и вместо этого придумавший *ad hoc* новую нейтральную частицу, в лекции, прочитанной во время пребывания в СССР в конце 1937 г., говорил о гравитационном аргументе Ландау как о существенном достижении (правда, достижение приписывалось Эйнштейну, а не Ландау, но это, скорее всего, связано с тем, что к моменту публикации лекции Ландау был арестован) [38].

Подытоживая, можно сказать, что в матче Бор–Ландау счет стал 1:1 в пользу науки, после того как Бор обезвредил радикализм вывода Ландау относительно *сG*-теории, а Ландау обезвредил радикальную гипотезу

Бора о несохранении энергии с помощью *сG*-теории, или некантовой теории гравитации⁵.

Заняться проблемой квантовой гравитации Бронштейна побудило, похоже, завершение первого раунда этого матча, но важным было и то обстоятельство, что гравитация пребывала в поле зрения у Бронштейна не меньше, чем у Ландау, проявившего это во втором раунде.

6. "... Принципиальное различие между квантовой электродинамикой и квантовой теорией гравитационного поля"

Возникновение задачи естественно связать с заметкой 1934 г., в которой Бронштейн выявил, что борковский измеритель электромагнитного поля должен быть способен задавать произвольные плотности заряда и массы у пробного тела. И тут Бронштейн мог заметить, что в гравитации такой свободы нет по двум причинам. Во-первых, гравитационный заряд и масса — это одно и то же, а во-вторых, произвольно увеличивая плотность пробного тела, наблюдатель произвольно наткнулся бы на гравитационный радиус, можно сказать, потерял бы из виду пробное тело. А значит, рушится логика защиты Бора–Розенфельда.

Еще проще увидеть ограниченность защиты Бора–Розенфельда, если попытаться перенести в гравитацию их довод о том, что из универсальных констант квантовой электродинамики — *c* и *h* — не составить какой-либо характерной длины. В гравитации задействованы три константы — *c*, *G* и *h*, из которых можно составить $l_{\text{Pl}} = (hG/c^3)^{1/2} = 10^{-33}$ см — планковскую длину. Однако в текстах Бронштейна нет свидетельств, что он этот простой довод увидел, и до середины 50-х годов никто из высоких теоретиков не поминал планковские величины. (Хотя по очередному странному совпадению именно в 1934 г. вышел русский перевод книги Бриджмена [42], где фигурировали — и отвергались — планковские величины; при этом редактором перевода был С.И. Вавилов, директор ФИАН, одним из сотрудников которого был Бронштейн.)

Впрочем, размерностный довод не так явно побуждает поставить *сGh*-задачу, как различие зарядовой свободы в электродинамике и в гравитации — различие, чреватое подлинной проблемой.

Но прежде чем заняться этой проблемой, Бронштейн построил квантовую теорию слабого гравитационного поля, решив две задачи, естественные в этом приближении и требуемые принципом соответствия: излучение гравитационных волн и ньютоновский закон тяготения. Представляя гравитационное взаимодействие материальных тел посредством "промежуточного агента — «гравитационных квантов»", он из *сGh*-теории слабого поля получил в некантовом пределе эйнштейновскую *сG*-формулу гравитационного излучения и в классическом пределе — ньютоновский *G*-закон всемирного тяготения.

Решению этих задач посвящена основная часть работы, и результаты — хотя и ожидаемые — были совер-

⁵ Сам Ландау, скорее, думал, что счет 1,5:0,5 в его пользу, не опровергая рассуждения Бора, но считая его мысленные измерения чересчур мысленными, не реализуемыми практически. Так думал и Пауэрлс (см. [41]).

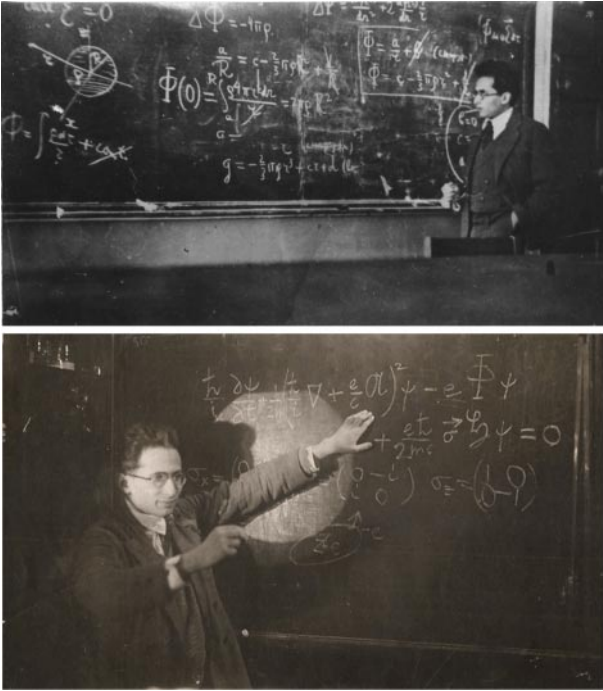


Рис. 4. М.П. Бронштейн во время чтения лекций по теории гравитации и квантовой теории.

шенно необходимы, чтобы воспринимать всерьез саму возможность квантования гравитации. По поводу этой части выступавший на защите В.А. Фок сказал: "Работа Матвея Петровича — первая работа по квантованию гравитационных волн, в которой дело доведено до получения физических результатов. В работе Розенфельда, посвященной тому же вопросу, содержатся лишь общие математические результаты... В рассмотренном М.П. приближении (слабого поля. — Г.Е.Г.) сомневаться нельзя. Если даже будет неверной теория Эйнштейна, то результаты М.П. не изменятся" [43, с. 317].

Однако Бронштейн прекрасно понимал, что главные физические задачи, которые требовали квантовой гравитации, — конец жизни звезды и начало жизни Вселенной — не меньше требовали *сильного* поля. Единственным способом как-то пощупать сильноквантовый случай был анализ измеримости. Этот способ Ландау и Пайерлс собственно предложили, чтобы физически осмысленным образом справиться с формальной проблемой бесконечностей в sh -теории. Анализ Бора–Розенфельда развил и исправил этот способ в том же физическом, а не формальном русле. Бронштейн применил этот способ в cGh -теории.

Проблеме измеримости Бронштейн посвятил отдельный параграф "Немного мысленно поэкспериментирuem!" в первой из двух статей о квантовой гравитации (август 1935 г.) [1], а во второй (декабрь 1935 г.) развил этот анализ и довел его до решительного вывода.

"Установка" по измерению гравитационного поля (роль напряженности поля исполняет символ Кристоффеля $[00, 1]$ — в нынешних обозначениях Γ_{00}^1) управляется уравнениями ОТО в приближении слабого поля ($g_{mn} = \varepsilon_{mn} + h_{mn}$, $h_{mn} \ll 1$). Уравнение движения пробного тела (уравнение геодезической) имеет вид:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} x = \Gamma_{00}^1 = \frac{\partial}{\partial t} h_{01} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} h_{00}.$$

Согласно Бору–Розенфельду, измеряется среднее значение Γ по объему V и интервалу времени T , для чего берется пробное тело объемом V (массой ρV), импульс которого измеряется в начале и конце временного интервала T . Если продолжительность измерения $\Delta t (\ll T)$, а Δx — неопределенность координаты, то неопределенность Δp складывается из обычной квантово-механической неопределенности $h/\Delta x$ и неопределенности гравитационного поля, созданной самим пробным телом из-за его отдачи при измерении (поле отдачи определяется эйнштейновским уравнением гравитации $\square h_{01} = G\rho v_x$).

Добавив к этому условия на параметры измерительной процедуры $\Delta x \ll V^{1/3}$ (по смыслу измерения среднего по V) и $\Delta x < c\Delta t$ (релятивистское ограничение), Бронштейн получает две границы снизу для неопределенности измеряемого поля $\Delta\Gamma$:

$$\frac{h}{\rho TV^{4/3}} \quad \text{и} \quad \frac{h^{2/3} G^{1/3}}{c^{1/3} \rho^{1/3} V^{2/3} T},$$

и делает заключение: "Из этих двух границ для случая легких пробных тел ($\rho V < (hc/G)^{1/2}$, т.е. меньше примерно 0,01 мг) первая является единственно существенной. Для более тяжелых пробных тел существенной является вторая. Ясно, что для возможно более точного измерения $[00, 1]$ следует рекомендовать как раз тяжелое пробное тело, и это означает, что теоретически важна только вторая граница. Мы имеем окончательно

$$\Delta[00, 1] > \frac{h^{2/3} G^{1/3}}{c^{1/3} \rho^{1/3} V^{2/3} T}.$$

Таким образом, ясно, что в области, где все h_{mn} малы по сравнению с 1 (это и есть значение слова «слабое» в названии этой работы), точность гравитационных измерений может быть увеличена сколь угодно высоко: так как в этой области явлений применимы приближенные линеаризованные уравнения и, следовательно, справедлив также принцип суперпозиции, то всегда возможно сделать пробное тело сколь угодно большой плотности ρ . Отсюда мы делаем вывод, что в рамках специальной теории относительности (т.е. когда пространственно-временной континуум «евклидов») можно строить вполне последовательную квантовую теорию гравитации; такая попытка предпринимается в данной работе. Однако в области общей теории относительности, где отклонения от «евклидовости» могут быть сколь угодно велики, дело обстоит совсем по-другому. Ведь гравитационный радиус пробного тела ($G\rho V/c^2$), служащего для измерения, никоим образом не должен превосходить его линейные размеры ($V^{1/3}$); отсюда возникает верхняя граница для его плотности ($\rho < c^2/GV^{2/3}$). Следовательно, возможности измерения в этой области еще более ограничены, чем можно заключить из квантово-механических перестановочных соотношений. Без глубокой переработки классических понятий кажется едва ли возможным распространить квантовую теорию гравитации также и на эту область" [1, с. 149, 150] (русский перевод [43, с. 275, 276]).

В знаменателе формулы для $\Delta\Gamma$ находятся объем V и время усреднения T , но уменьшить минимум неопределенности с их помощью можно, лишь увеличивая V и T ,



Рис. 5. Дружеский шарж выражает отношение М.П. Бронштейна к научно-социалистическому планированию науки (на эту тему проводились Всесоюзные конференции): "Всякий план есть предсказание". Однако предсказание о теории квантовой гравитации он сделал без помощи гадальных карт, используя лишь силу научной логики.

т.е. расширяя область усреднения, а значит, отказываясь от локализации (в пределе – точечной) измерения.

Заметим, что здесь у Бронштейна "нечаянно" появился масштаб планковской массы – $(hc/G)^{1/2}$, т.е. меньше примерно $0,01$ мг", а общий вывод еще осторожен — "едва ли возможно".

Спустя три месяца после выхода этой статьи состоялась защита диссертации. Оппоненты — В.А. Фок, И.Е. Тамм — единодушно высказались "за", но интереснее разногласие, кратко и, вероятно, лишь конспективно зафиксированное в протоколе заседания [43, с. 317].

Фок: "Большой интерес имеет здесь аналогия между волнами гравитационными и электромагнитными. Эта аналогия дала возможность использовать аппарат электродинамики, но, помимо этого факта, она представляет интерес с физической стороны. Уравнения Эйнштейна — нелинейные ... В электродинамике у нас пока нет нелинейной теории, обобщение на нелинейную лишь начинается. Работа Матвея Петровича (Бронштейна) представляет поэтому интерес в том отношении, что она может пролить свет на соотношение между линейной теорией и нелинейной. Что касается вопроса об измерении гравитационного поля, то здесь опять имеется положение, аналогичное соответствующему положению в электродинамике. Введение гравитационного радиуса здесь

может вызвать те же возражения, как и в электродинамике. Результаты, полученные Матвеем Петровичем, бесспорны, и поэтому я могу на этом закончить".

Бронштейн, однако, оспорил мнение оппонента: "Аналогия между нелинейной теорией гравитации и нелинейной электродинамикой и теорией Борна–Инфельда мне представляется спорной. Именно нелинейная электродинамика унитарна, а общая теория относительности не унитарна. Я не думаю, что из сравнения настоящей теории с общей теорией относительности можно вывести большие следствия".

В тогдашней терминологии унитарной называли теорию поля, в которой частица — это особая конфигурация поля, а масса частицы — энергия этого поля. Обычная электродинамика считалась дуалистической, поскольку в ней понятия поля и частицы независимы (см., например, [44]). Нелинейная электродинамика, как надеялись, решит проблему бесконечной собственной энергии электрона, а конкретный вариант нелинейной электродинамики — теория Борна–Инфельда — был основан на лагранжиане, который не следовал из каких-либо глубоких физических соображений, а был "сделан руками" так, чтобы бесконечностей не возникало уже на классическом уровне: $L_{\text{BI}} = \varepsilon^{-1}(1 + \varepsilon L_{\text{M}})^{1/2}$, где L_{M} — обычный максвелловский лагранжиан, ε — малая константа (чтобы в линейном приближении получить обычную электродинамику).

Поэтому трудно согласиться с фокской аналогией между радиусом электрона в теории Борна–Инфельда (как характерном расстоянии, начиная с которого поведение поля отклоняется от кулоновского) и гравитационным радиусом, существование которого связано с фундаментальным физическим фактом равенства гравитационной и инертной масс или с теоретическим выражением этого факта — принципом эквивалентности.

Хотя само понятие гравитационного радиуса вошло в физику лишь вместе с решением Шварцшильда и римановой геометрией ОТО, феномен черной дыры фактически был известен еще Лапласу в 1798 г. и соответственно уже тогда можно было говорить о гравитационном радиусе, до которого надо сжать тело, чтобы свет не мог от него оторваться, т.е. чтобы скорость убегания, или вторая космическая скорость, стала равна скорости света (см., например, [45]). Физика этого явления определяется ньютоновским законом тяготения (если бы сила тяготения, скажем, убывала по закону $1/r$, то "убежать на бесконечность" было бы невозможно). А предвестник универсальности этого явления — то, что вторая космическая скорость не зависит от массы "космолета", — был открыт Галилеем, который обнаружил, что движение тела под действием гравитации не зависит от массы (пробного) тела. Конечно, отсюда далеко до понятия "горизонта событий" и прочих геометрических изощренностей, но физическая суть эйнштейновской геометризации тяготения коренится в галилеевском факте.

Здравый смысл теоретика Бронштейна проявился в последних его замечаниях на защите. Я.И. Френкель, отметив, что работа блестящая, сделал "один упрек": "При постройке квантовой теории тяготения необходимо описывать и устанавливать связь между этой теорией и электродинамикой. Это М.П. оставил без внимания, и желательно, чтобы в данной работе и это попытались осуществить". Диссертант имел свое мне-

ние: "Этот совет весьма коварен, ибо, как известно, Эйнштейн погряз, пытаясь установить связь между этими теориями". И, наконец, последний вопрос (В.К. Фредерика): "В чем может сказаться физический эффект испускания гравитационных волн?", получил ответ мысленного экспериментатора: в изменении вращения двойной звезды.

Итак, на защите диссертации коллеги Бронштейна дружно говорили об аналогии между гравитацией и электромагнетизмом и не оценили указанное им принципиальное различие. Поэтому, возможно, он усилил соответствующий вывод во втором, более полном изложении результатов, — в статье *ЖЭТФа*, датированной 14 декабря 1935 г.

"До сих пор все рассуждения были в большей степени параллельны соответствующим рассуждениям в квантовой электродинамике; 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 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, вследствие чего она может без противоречий рассматривать измерения электромагнитных величин, как «предсказуемые». Не то — в квантовой теории гравитационного поля: она должна считаться с ограничением, вытекающим из того, что гравитационный радиус пробного тела ... не может превосходить его действительных линейных размеров ... отсюда

$$\Delta[00, 1] > h^{2/3} G^{2/3} / c T V^{4/9}$$

(эту минимальную неопределенность гравитационного поля можно записать в виде $(1/T)(l_{Pl}/L)^{4/3}$, где T и L — промежуток времени и линейный размер области измерения поля. — Г.Е.Г.).

Итак, величина, стоящая в правой части этого неравенства, представляет абсолютный минимум неопределенности при измерении компонент напряжения силы тяжести, который невозможно перейти введением целесообразно выбранного измерительного прибора. Этот абсолютный предел вычислен очень грубо, потому что при достаточно большой массе измерительного прибора начнут, вероятно, играть роль отступления от принципа суперпозиции (мы здесь всюду рассматриваем случай гравитационных волн, т. е. приближенно считаем уравнения закона тяготения линейными; это приближение как раз перестает быть удовлетворительным вблизи поверхности тяжелого тела, гравитационный радиус которого приближается к его действительным размерам). Тем не менее можно думать, что аналогичный результат сохранится и в более точной теории, так как он несколько сам по себе не вытекает из принципа супер-

позиции, 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 (и именно вследствие того, что в ней имеет место принцип суперпозиции); вот почему квантовая электродинамика возможна без внутренних противоречий. В теории же гравитационных волн это внутреннее противоречие никак не может быть обойдено; мы можем считать измерения величин гравитационного поля «предсказуемым» лишь в том случае, если ограничимся рассмотрением достаточно больших объемов и промежутков времени. Устранение связанных с этим логических противоречий требует радикальной перестройки теории и, в частности, отказа от римановой геометрии, оперирующей, как мы здесь видим, принципиально [не] 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. *Wer's nicht glaubt, bezahlt einen Thaler*" [2, с. 217, 218] (см. также [3, с. 441, 442]).

Вывод сформулирован решительно и с полным пониманием его радикальности. Об этом говорит и немецкая фраза, заменяющая восклицательный знак: "Кто этому не верит, с того талер"⁶. В 1936 г. это радикальное предсказание слишком напоминало приговор Ландау–Пайерлса пятилетней давности, отмененный Бором–Розенфельдом, и поэтому пафос предсказания просто необходимо было смягчить — и, одновременно, подчеркнуть.

7. Расширение Вселенной в 1937 году

Через несколько дней после защиты докторской диссертации М.П. Бронштейну исполнилось 29 лет. Полтора года оставалось до августа 1937 г., когда он исчез навсегда. За это время он многое успел. Работу в ЛФТИ он совмещал с преподаванием в Ленинградском университете (в 1937 г. его аспирантом был А.Б. Мигдал, а одним из студентов — Я.А. Смородинский). Под его редакцией и в его переводе вышло второе издание *Основ квантовой механики* П. Дирака и *Электронная теория* Р. Беккера. Написал несколько статей для энциклопедического *Физического словаря*, писал учебник по статистической физике. И, быть может, самое удивительное, написал три научно-художественные книжки *Солнечное вещество*, *Лучи Икс* и *Изобретатели радиотелеграфа*; редактировала эти книги его жена Лидия Корнеевна Чуковская, а завлек физика в детскую литературу С.Я. Маршак. Четвертой должна была стать книжка о Галилее...

В мартовском выпуске *ЖЭТФа* за 1937 г. в последний раз появились научные работы М.П. Бронштейна. Одна — ядерно-физический расчет, выполненный по просьбе И.В. Курчатова и говорящий о вовлеченности Бронштейна в земную научную жизнь [46]. Другая — большая и "неземная" — статья "О возможности спонтанного расщепления фотонов" [47] (фрагмент помещен в [3, с. 283–290]) стала фактически первой работой по "космомикрофизике", если воспользоваться нынешним

⁶ Этой фразой завершается — после невероятных приключений — сказка братьев Гримм "О находчивом портяжке".

термином. То был первый реальный результат взаимодействия физики элементарных частиц и космологии. Результат был настолько красив, что спустя сорок лет Я.Б. Зельдович и И.Д. Новиков изложили его в знаменитой монографии по космологии, хотя он "всего лишь" обосновывал факт расширения Вселенной [48].

В 1937 г. ситуация выглядела гораздо более драматичной. Хаббловское красное смещение в спектрах далеких галактик, интерпретированное как доплеровский эффект в расширяющейся Вселенной, в принятой тогда астрономической шкале расстояний давало возраст Вселенной ~ 2 млрд лет, в вопиющем несоответствии с данными изотопной геологии (согласно которым для истории Земли требовалось несколько миллиардов лет). Об этой — главной — трудности релятивистской космологии писал Бронштейн в обзоре *УФН* 1931 г. [49].

Уже в 1929 г. известный астрофизик Р. Цвикки предложил для закона Хаббла — вместо грандиозной картины разбегающихся галактик — совсем другое объяснение, попроще: не галактики удаляются, а фотоны, прилетающие от этих галактик, за долгое время путешествия успевают покраснеть: чем дальше, тем краснее. Эта астрономическая гипотеза получила неожиданную поддержку со стороны новой физики — теории электрон-позитронного вакуума, когда в 1933 г. Гальперн высказал гипотезу, что фотон краснеет, взаимодействуя с этим вакуумом, а в 1936 г. Гайтлер изложил эту гипотезу в своей известной монографии по квантовой электродинамике [50].

Бронштейн эту гипотезу отверг, показав, что, независимо от механизма "спонтанного расщепления фотона", из принципа относительности следует вполне определенная зависимость вероятности распада фотона в единицу времени от частоты. В результате соответствующий

эффект покраснения, если бы он существовал, был бы различным в разных частях спектра, а не однородным, как в законе Хаббла и эффекте Доплера. Таким образом, единственный тогда наблюдательный факт космологического характера получил микрофизическое обоснование.

Кроме того, Бронштейн провел прямой расчет гипотетического процесса в рамках тогдашней КЭД — малый эффект мог накладываться на доплеровский сдвиг — и получил нулевую вероятность спонтанного распада фотона (расчет занял основной объем статьи). Это согласие было существенно и для тогдашней физики, поскольку, как писал Бронштейн: "*В настоящее время еще не существует вполне законченной теории поляризации вакуума*".

Самому ему, однако, не пришлось принимать участия в дальнейшем развитии теории. Не известно, успел ли он направить еще какие-то рукописи в журналы. Если успел, то об их судьбе говорит случайно оставшийся след одной его уничтоженной публикации — статьи "Квантовая статистика" для второго тома *Физического словаря*, который вышел в 1937 г. В одном из 14 тыс экземпляров тома сохранилась концовка этой статьи с именем автора, а рядом другая концовка с тем же номером страницы и с другим именем автора, — у статьи одно начало и два конца. В типографии допустили брак — недовыдрали один лист...

Ночью 6 августа 1937 г. выдрали из жизни Матвея Петровича Бронштейна. Ему было 30 лет. При аресте от него потребовали сдать оружие и отравляющие вещества — он рассмеялся... Его казнили в ленинградской тюрьме 18 февраля 1938 г.

8. Десятилетия спустя

В тридцатые годы проблему квантовой гравитации нельзя было назвать актуальной в каком-либо практическом смысле — обилие насущных задач в физике ядра, молекулы и конденсированного состояния занимало все свободные руки. Лишь один французский физик, Жак Соломон (Jacques Solomon, 1908–1942), подхватил тему Бронштейна и обратил внимание на его результат о неизмеримости сильного гравитационного поля, но и ему не дано было донести свой интерес до послевоенного времени — участник французского Сопротивления, в 1942 г. он был схвачен гестапо и казнен [51].

10 лет спустя исследование Бронштейна не было забыто на его родине, о чем говорит отзыв В.А. Фока о работе, представленной в 1948 г. на Сталинскую премию:

"*Работа Иваненко и Соколова озаглавлена «Квантовая теория гравитации». Это заглавие не соответствует ее содержанию; правильнее было бы озаглавить работу более скромно, например, «Упрощенное изложение квантовой теории гравитации». Дело в том, что квантовая теория гравитации создана ленинградским физиком М.П. Бронштейном в его работе «Квантование гравитационных волн» (ЖЭТФ, т. 6, с. 195–236), напечатанной в 1936 году. Иваненко и Соколов используют результаты работы Бронштейна, хотя нигде в тексте на нее не ссылаются... Каковы бы ни были причины, побудившие авторов замалчивать достижения Бронштейна, их работу никак нельзя рассматривать как построение квантовой теории гравитации, ибо такая теория была создана Бронштейном за 11 лет до них*" (цитируется по [52]).



Рис. 6. Последняя фотография М.П. Бронштейна.

В работе, претендовавшей на Сталинскую премию, речь шла лишь о приближении слабого поля, и хотя Иваненко заявлял, что превращение гравитонов в другие частицы означает превращение пространства-времени в вещество, никакой новой физики за этими словами не обнаружилось. А коэффициент $\sim 10^{-40}$, характеризующий соотношение сил гравитации и электромагнетизма в микромире, надежно защищал любые вычисления от экспериментальной проверки. (Заметим, что Бронштейн не пользовался термином "гравитон", хотя само слово существовало уже в 1934 г. [53].)

20 лет спустя рубеж квантовой гравитации, обнаруженный Бронштейном, был перекресток сразу несколькими людьми и в разных формах.

Ландау указал на гравитационную границу КЭД, где уравниваются два фундаментальных взаимодействия, и вне которой КЭД не может считаться замкнутой теорией из-за необходимости учета гравитации [54]. О. Клейн обнаружил гравитационную границу релятивистской квантовой теории [55]. И наконец, Дж. Уиллер выявил квантовую границу ОТО [56]. Тем самым обнаружился тройкий физический смысл планковских масштабов, хотя имя Планка никто не упоминал. Ставшее общепринятым название "планковские величины" Уиллер ввел два года спустя [57]⁷.

Никто, однако, не воспроизвел бронштейновского "**отказа от римановой геометрии**". И продолжались попытки проквантовать гравитацию, скрещивая аппарат римановой геометрии ОТО с квантовой теорией. Прямолинейному оптимизму, вероятно, способствовал успех КЭД, достроенной к концу 1940-х годов до состояния экспериментально самой точной физической теории, — в соответствии с оптимистическим прогнозом Бора – Розенфельда 1933 г.

30 лет спустя знаменательным событием можно считать гипотезу Л. Розенфельда о том, что квантование гравитационного поля бессмысленно, поскольку это поле имеет чисто классическую макроскопическую природу [58]. Напомним, что это сказал автор самой первой работы о квантовой гравитации, в 1930 г. подразумевавший, что "*квантование гравитационного поля проводится без каких-либо новых трудностей с помощью формализма, вполне аналогичного [электродинамике]*".

Бронштейн, обнаружив принципиальное различие между квантовой электродинамикой и квантовой гравитацией, думал иначе, когда говорил об "**отказе от обычных представлений о пространстве и времени и замене их какими-то гораздо более глубокими и лишенными наглядности понятиями**".

Первую физическую модель подобного рода предложил в 1967 г. А. Сахаров — "гравитация как упругость квантового вакуума" [59]. Эту модель с энтузиазмом приветствовал один из пионеров квантовой гравитации — Дж. Уилер [60].

По очередному совпадению в 1967 г. имя М.П. Бронштейна прозвучало почти официально, — в парадном томе *Октябрь и научный прогресс*, выпущенном к 50-летию Советской власти, И.Е. Тамм подвел один из итогов развития советской теоретической физики: "*Некоторые исключительно яркие и многообещающие*

физики этого поколения безвременно погибли: М.П. Бронштейн, С.П. Шубин, А.А. Витт" [61] (эти физики из первого поколения получивших образование в советское время были арестованы в 1937 г., и хотя получили разные приговоры — расстрел, восемь лет и пять лет, все трое погибли в 1938 г.).

40 лет спустя, после открытия эффекта Хокинга (испарение черных дыр), квантовая гравитация стала respectable научной темой [62]. С тех пор изданы около 60 книг, названия которых содержат слова "квантовая гравитация", и проведены десятки конференций (не многовато ли для теории, которой пока еще нет?).

К столетию Эйнштейна в 1979 г. издан сборник оригинальных работ, "внесших значительный вклад в развитие теории гравитации", и в разделе "Общая теория относительности и физика микромира" помещены рядом работы Бронштейна, Иваненко – Соколова и Фока (который в отзыве 1948 г., напомним, сопоставил первые две) [3].

В **80-е годы** событиями, относящимися к сюжету, стали историко-научные исследования автора, которые при должной скромности следовало бы опустить, если бы их результатом не стало открытие работы М.П. Бронштейна для западной науки в **90-е годы** [4, 63]⁸.

Итог семидесяти лет развития подвели в 2004 г. две монографии с одинаковым названием *Quantum Gravity*, изданные крупнейшими научными издательствами [65]. Оба автора признали, что проблема остается широко открытой, но очень по-разному увидели результат Бронштейна. Один из них, воспроизведя соображения об измеримости Ландау – Бора и сославшись на статью Бронштейна, фактически отверг и вывод Бронштейна, и саму логику такого анализа. Другой сочувственно процитировал "отказной" вывод Бронштейна, но не объяснил его аргументацию, связанную с измеримостью.

Такое расхождение, похоже, характеризует нынешнее состояние 70-летней проблемы.

9. Как достичь внутреннего совершенства без внешнего оправдания?

Эйнштейн в своих "Автобиографических заметках" назвал два главных общих критерия в оценке теории: ее "внешнее оправдание", или соответствие с опытом, и "внутреннее совершенство", или естественность и логическая простота теории [66].

Критерии эти естественны, а то и тривиальны, для всей истории физики... за исключением проблемы квантовой гравитации. "Внешнему оправданию" не дает работать астрономическое число 10^{40} . И это проявилось в самом первом доводе Эйнштейна в пользу квантования гравитации (гравитационный коллапс атома). Теоретически справиться с числами такого астрономического масштаба можно было бы, переходя от физического опыта к астрономическим наблюдениям, но практического пути к реальным *cgh*-объектам наблюдения не найдено. Трудность подобного перехода спровоцировала известную фразу Ландау об астрофизиках, которые

⁷ По свидетельству Дж.А. Уиллера в письме автору в 1955 г. он не знал о введенных Планком "естественных единицах".

⁸ Первым среди западных авторов работы М.П. Бронштейна изложил Джон Стэчел [64] — известный историк науки и эйнштейновед, основатель серии "Einstein Studies" и академического собрания сочинений Эйнштейна "The collected papers of Albert Einstein", (Princeton University Press).

постоянно ошибаются, но никогда не сомневаются (впрочем, этот афоризм родился до новой астрофизической эры, начавшейся в 60-е годы).

Говорить о "внутреннем совершенстве" применительно к попыткам квантования гравитации неловко, когда просматриваешь накопленные за десятилетия безуспешные теоретические конструкции и видишь авторский пыл, так и не воплотившийся во что-то нетленное. Кладбище этих физ.-мат.-конструкций напоминает о заброшенных кладбищах проектов вечного двигателя или гидродинамических теорий эфира. А приливы пионерского оптимизма легче объяснить "полукритерием" внешней привлекательности — внешней привлекательности очередной кандидатуры в теорию. И к этому добавим популярную у студентов-физиков уверенность, что "математика умнее человека": надо лишь аккуратно проводить выкладки, а там, глядишь, и физический результат сам собой прояснится. О первом полукритерии Эйнштейн, правда, не говорил, но тут и говорить особенно нечего, поскольку "мятеж никогда не кончался удачей, иначе бы он назывался иначе". А по поводу второго сказал когда-то, что математика — лучший способ водить самого себя за нос.

Анализ измеримости поля, которым занимались в 1930-е годы, можно — в добавление к критериям Эйнштейна — назвать "внутренним оправданием" теории. Это, в сущности, был анализ *границ применимости* теории, проводимый изнутри ее самой — до создания теории более общей. Разумеется, такой анализ не может быть абсолютно строгим и не ведет к непосредственно проверяемым в опыте физическим следствиям. Следствия есть лишь историко-физические, отдаленные многими годами и не столь убедительные, как прямой эксперимент. Но все же анализ измеримости поля — это анализ физический, а не формально математический.

Несогласие инициатора анализа — Ландау — с результатами его расширенно-углубленной версии — факт хотя и странный, но имевший свои резоны. Та мысленно-экспериментальная свобода, которую Бор считал допустимой, поскольку она не запрещена известными законами природы, для Ландау была немислимой, вероятно, потому, что он не видел средств эту свободу реализовать в опыте: как можно в микрофизике рассматривать пробное тело с произвольной величиной массы и заряда, когда реально известных пробных тел — элементарных частиц — было раз-два и обчелся?! Да и впоследствии, когда частиц стало больше, ничего похожего на произвол в параметрах массы и заряда не появилось.

И тем не менее гарантия, которую дали в 1933 г. Бор и Розенфельд строителям КЭД, оправдалась пятнадцать лет спустя, когда была создана самая точная из физических теорий.

Предсказание Бронштейна 1935 г. относительно квантовой гравитации имело характер запрета — запрета на решение проблемы "малой кровью", с сохранением римановой геометрии ОТО. Само по себе это несколько не принижает его. Великие законы физики имеют такой характер. Например — запрет на существование вечных двигателей первого и второго рода. И специальная теория относительности связана с невозможностью определить по измерению скорости света скорость его источника.

Другое дело, как из бронштейновского запрета извлечь какие-либо физически содержательные след-

ствия. В качестве скромного примера, попытаюсь защитить квантовую гравитацию от одного из создателей КЭД.

Недавно Ф. Дайсон высказал гипотезу, что "*квантовая гравитация физически бессмысленна*", и значит, 70-летние поиски следует прекратить за отсутствием предмета поисков. Свое мнение он обосновал следующим образом:

"Любая теория квантовой гравитации предполагает частицу «гравитон» — квант гравитации, точно так же, как фотон — квант света. Наличие фотонов легко обнаружить, как показал Эйнштейн, по электронам, выбитым с поверхности металла под действием света. Но гравитационное взаимодействие неизмеримо слабее электромагнитного, и, чтобы обнаружить гравитон по электрону, выбитому с поверхности металла под действием гравитационных волн, пришлось бы ждать дольше, чем позволяет возраст Вселенной. Но если отдельные гравитоны невозможно наблюдать в эксперименте, значит, они не имеют никакой физической реальности. Можно считать их несуществующими, подобно эфиру 19 века. И тогда гравитационное поле, описываемое теорией Эйнштейна, — это чисто классическое поле безо всякого квантового поведения" [67].

Это рассуждение содержит слабый пункт в самом начале. Как бы ни была привычна аналогия между фотоном и гравитоном, как бы ни был похож закон Кулона на закон всемирного тяготения, между двумя взаимодействиями имеется "*принципиальное различие*", подчеркнутое Бронштейном и разрушающее статус понятия "гравитон", как самостоятельного и равноправного с понятием "фотон". Бронштейн в сущности обнаружил, что обычное понятие "квант поля", в применении к гравитации, является принципиально приближенным, как приближенны, точнее, ограничены в своей применимости, другие важные и работоспособные понятия физики: абсолютное пространство, одновременность, луч света, температура и т.д. Можно сказать, что Бор и Розенфельд оправдали понятие фотона в пределах электродинамики, а Бронштейн обнаружил ущербность — приближенность — понятия гравитона уже в пределах теории гравитации. И это принципиальное различие основано на опытном факте, который иногда называют первым великим открытием современной науки и который стал основой одной из самых великих теорий, ОТО, — равенстве инертной и гравитационной масс.

Так что гравитон вовсе не является столь же органическим элементом еще несозданной теории квантовой гравитации, как фотон — частью КЭД. А связывать всякую волну с неким квантом — подход слишком формальный. Например, вряд ли кто свяжет волну на поверхности моря (даже ту, которую называют *гравитационной*) с квантом волнения — частицей "*поверхон*", чтобы исследовать поведение таких волн.

И кроме прочего, Дайсон никак не объяснил, что делать с двумя принципиальными физическими явлениями — началом космологического расширения и завершением коллапса звезды. Какой теории, если не квантовой гравитации, эти явления можно поручить? В обоих случаях потребность в новой теории характеризуется планковским рубежом. И эта количественная характеристика, как впервые обнаружил Бронштейн, отражает физику дела, а не просто размерностные соображения.

Для получения этого количественного рубежа не обязательно использовать продвинутый аппарат. Чтобы нащупать этот рубеж, достаточно самой простейшей физики, относящейся к гравитации и к квантам, — квантового постулата Бора 1913 г. и ньютоновского закона тяготения (и напоминания, что феномен черной дыры был предсказан в классической физике). По примеру Бора и Бронштейна, разрешая себе полную количественную свободу, возьмем простую физическую систему "двойной звезды", или на языке микромира "молекулы гравития", — две одинаковые точечные массы m , связанные гравитационным взаимодействием и движущиеся по круговой орбите радиусом r . Подчинив эту систему классической механике и квантовому постулату Бора, выясним, при каких значениях параметров системы ее описание должно существенно учитывать квантовые и "чернодырные" эффекты, — это даст планковские значения m и r . Такой вывод до создания квантовой механики был бы не более "незаконным", чем рассуждения Бронштейна 1935 г. или Клейна и Уилера в 1950-е годы.

Из статей Бронштейна не извлечь точных указаний, следует ли **"отказ[аться] от обычных представлений о пространстве и времени и заменить их какими-то гораздо более глубокими и лишенными наглядности понятиями"**, и если да, то какими именно. Хотя и можно себе представить, что после подобной замены формулу для планковской длины $l_{Pl} = (\hbar G/c^3)^{1/2}$ сменит формула для классической гравитационной константы типа $G = l^2 c^3/\hbar$, где l — некая константа будущей теории квантовой гравитации.

Размышляя над историей квантования гравитации, можно заметить, что большая часть публикаций не возникла бы, если бы их авторы знали и всерьез восприняли анализ проблемы квантовой гравитации, проделанный Бронштейном. Тем самым, по меньшей мере, сэкономилось бы изрядное количество бумаги и человеко-дней.

Ну, а мог ли Матвей Бронштейн ускорить появление теории квантовой гравитации, если бы российская история не погубила его в 30-летнем возрасте? На такие вопросы, к сожалению, историк науки ответить не может. Может лишь предложить свой исторический талер тому, кто ответит.

Благодарю Л.П. Питаевского за обсуждения по теме статьи, а также Б.Л. Альтшулера и рецензентов за важные замечания по тексту.

Список литературы

1. Bronstein M "Quantentheorie schwacher Gravitationsfelder" *Phys. Z. Sowjetunion* 9 140–157 (1936) [Бронштейн М, в сб. *Эйнштейновский сборник, 1980–1981* (Отв. ред. И Ю Кобзарев, Сост. Г Е Горелик) (М.: Наука, 1985) с. 267–282]
2. Бронштейн М П "Квантование гравитационных волн" *ЖЭТФ* 6 195–236 (1936)
3. Альберт Эйнштейн и теория гравитации. Сб. статей (Под ред. Е С Куранского) (М.: Мир, 1979)
4. Gorelik G "First steps of quantum gravity and the Planck values", in *Studies in the History of General Relativity* (Einstein Studies, Vol. 3, Eds J Eisenstaedt, A J Cox) (Boston: Birkhäuser, 1992) p. 364–379; Gorelik G E, Frenkel V Ya *Matvei Petrovich Bronstein and Soviet Theoretical Physics in the Thirties* (Boston: Birkhäuser, 1994)
5. Планк М *Избранные труды* (М.: Наука, 1975)
6. Bridgman P W *Dimensional Analysis* (New Haven, Conn.: Yale Univ. Press, 1922) p. 101 [Бриджмен П В *Анализ размерностей* (М. – Ижевск: РХД, 2001) с. 114]
7. Einstein A "Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation" *Sitzungsber. Königlich Preuß. Akad. Wiss.* (Berlin) 688 (1916) ["Approximative integration of the field equations of gravitation" (22 June 1916), in *The Collected Papers of Albert Einstein* Vol. 6 *The Berlin Years: Writings, 1914–1917* (Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1997) p. 201]
8. Einstein A "Über Gravitationswellen" *Sitzungsber. Königlich Preuß. Akad. Wiss.* (Berlin) 154 (1918) ["On Gravitational Waves" (31 January 1918), in *The Collected Papers of Albert Einstein* Vol. 7 *The Berlin Years: Writings, 1918–1921* (Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 2002) p. 9]; Эйнштейн А *Собрание научных трудов* Т. 1 (М.: Наука, 1965) с. 522, 642
9. Гейзенберг В, Паули В "К квантовой динамике волновых полей (1929)", в сб. Паули В *Труды по квантовой теории* (М.: Наука, 1977) с. 32
10. Rosenfeld L "Über die Gravitationswirkungen des Lichtes." *Z. Phys.* 65 589–599 (1930) [Розенфельд Л "О гравитационном действии света", в сб. *Эйнштейновский сборник, 1980–1981* (Отв. ред. И Ю Кобзарев, Сост. Г Е Горелик) (М.: Наука, 1985) с. 255–266]
11. Горелик Г Е, Френкель В Я "М.П. Бронштейн и его роль в становлении квантовой теории гравитации", в сб. *Эйнштейновский сборник, 1980–1981* (Отв. ред. И Ю Кобзарев, Сост. Г Е Горелик) (М.: Наука, 1985) с. 322
12. Bronstein M P "On the theory of electronic semiconductors" *Phys. Z. Sowjetunion* 2 28–45 (1932); Бронштейн М П "Физические свойства электронных полупроводников" *ЖТФ* 2 919–952 (1932); Bronstein M P "On the conductivity of semiconductors in magnetic field" *Phys. Z. Sowjetunion* 3 140 (1933)
13. Иоффе А Ф *Электронные полупроводники* (Л.-М.: ОНТИ, 1933)
14. Горелик Г Е, Френкель В Я "М.П. Бронштейн и его роль в становлении квантовой теории гравитации", в сб. *Эйнштейновский сборник, 1980–1981* (Отв. ред. И Ю Кобзарев, Сост. Г Е Горелик) (М.: Наука, 1985) с. 317–320
15. Шпинель В С, Письмо Г.Е. Горелику, 17 марта 1998 г.
16. Бронштейн М П "Об одном следствии гипотезы световых квантов" *Журн. русск. физ.-хим. общ.* 57 321–325 (1925); Bronstein M P "Zur Theorie des kontinuierlichen Röntgenspektrums" *Z. Phys.* 32 881–885 (1925)
17. Горелик Г Е, Френкель В Я *Матвей Петрович Бронштейн: 1906–1938* (М.: Наука, 1990)
18. Bronstein M "Zum Strahlungsgleichgewichtsproblem von Milne" *Z. Phys.* 58 696–699 (1929); "Über das Verhältnis des effektiven Temperatur der Sterne zur Temperatur ihrer Oberfläche" *Z. Phys.* 59 144–148 (1929)
19. Bronstein M P "Note on the temperature distribution in the deep layers of stellar atmospheres" *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 91 133 (1930)
20. Бронштейн М П "Convegno di Fisica Nucleare" *СОФЕНА* (1) 176–177 (1933); "Конференция по твердым неметаллическим телам" *Природа* (1) 73–74 (1933); "Всесоюзная ядерная конференция" *УФН* 13 768 (1933); *СОФЕНА* (9) 155–165 (1933)
21. Бронштейн М П "О конференции по теоретической физике" *УФН* 14 (4) (1934)
22. Герштейн С С "На заре ядерной физики" *Природа* (8) 62 (2004)
23. Фейнберг Е Л *Эпоха и личность. Физики. Очерки и воспоминания* (М.: Физматлит, 2003) с. 80–81
24. Горелик Г Е "Неэлементарный вопрос физики элементарных частиц", http://ggorelik.narod.ru/Dau/Tamm_Ivanenko_1934_Priroda_2004.htm
25. Бронштейн М П "К вопросу о возможной теории мира как целого", в сб. *Успехи астрономических наук*. Сборник, № 3 (М.: ОНТИ, 1933) с. 3–30
26. Бронштейн М П "Внутреннее строение звезд и источники звездной энергии", в сб. *Успехи астрономических наук*. Сборник, № 2 (М.: ОНТИ, 1933) с. 102
27. Landau L, Peierls R "Erweiterung des Unbestimmtheitsprinzips für die relativistische Quantentheorie" *Z. Phys.* 69 56–70 (1931); Ландау Л Д, Пайерлс Р "Распространение принципа неопределенности на релятивистскую теорию (1931)", в кн. Ландау Л Д *Собрание трудов* Т. 1 (М.: Наука, 1969) с. 69
28. Rosenfeld L "On quantum electrodynamics", in *Niels Bohr and the Development of Physics* (Ed. W Pauli) (London: Pergamon Press, 1955) p. 70
29. Дирак П *Основы квантовой механики* (М.: Гостехтеориздат, 1932)
30. Бронштейн М П "Дирак П. Принципы квантовой механики (Oxford, 1930)" (рецензия) *УФН* 11 355–358 (1931)

31. Schweber S S *Phys. Today* **54** (11) 56 (2001); <http://www.physicstoday.org/pt/vol-54/iss-11/p56.html>
32. Bohr N, Rosenfeld L "Zur Frage der Messbarkeit der elektromagnetischen Feldgrößen" *Kgl. Danske Vidensk. Selskab., Math.-Fys. Medd.* **12** (8) 3–65 (1933) ["On the question of the measurability of electromagnetic field quantities", in *Quantum Theory and Measurement* (Eds J A Wheeler, W H Zurek) (Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1983) pp. 470–522]
33. Бор Н *Избранные научные труды* Т. 2 (М.: Наука, 1971) с. 121
34. Бронштейн М П "К вопросу о релятивистском обобщении принципа неопределенности" *ДАН СССР* **1** 388–390 (1934)
35. Ландау Л Д "К теории звезд (1932)", в кн. Ландау Л Д *Собрание трудов* Т. 1 (М.: Наука, 1969) с. 89
36. Bronstein M P "On the expanding universe" *Phys. Z. Sowjetunion* **3** 73–82 (1933)
37. Bohr N *Collected Works* Vol. 9 *Nuclear Physics, 1929–1952* (Amsterdam: North-Holland, 1986) p. 571
38. Бор Н "О методе соответствия в теории электрона (1934)", в сб. Бор Н *Избранные научные труды* Т. 2 (М.: Наука, 1971) с. 172
39. *Поль Дирак и физика XX века* (Под ред. Медведева, Сост. А Б Кожевников) (М.: Наука, 1990) с.167
40. Паули В "Законы сохранения в теории относительности и атомной физике (1937)", в сб. *Физика: Проблемы, история, люди*. Сб. науч. тр. (Отв. ред. В М Тучкевич) (Л.: Наука, 1986) с. 224, 228
41. Peierls R *Bird of Passage: Recollections of a Physicist* (Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1985) p. 66
42. Бриджмен П *Анализ размерностей* (Под ред. С И Вавилова) (Л.-М.: ОНТИ, 1934)
43. *Эйнштейновский сборник, 1980–1981* (Отв. ред. И Ю Кобзарев, Сост. Г Е Горелик) (М.: Наука, 1985)
44. Борн М "Таинственное число 137" *УФН* **16** 717 (1936)
45. Хокинг С, Эллис Дж *Крупномасштабная структура пространства-времени* (М.: Мир, 1977) с. 406
46. Бронштейн М П "О магнитном рассеянии нейтронов" *ЖЭТФ* **7** 357–362 (1937)
47. Бронштейн М П "О возможности спонтанного расщепления фотонов" *ЖЭТФ* **7** 335–358 (1937) [краткий вариант: Bronstein M *Phys. Z. Sowjetunion* **10** 686–688 (1936)]
48. Зельдович Я Б, Новиков И Д *Строение и эволюция Вселенной* (М.: Наука, 1975) с. 124
49. Бронштейн М П "Современное состояние релятивистской космологии" *УФН* **11** 124–184 (1931)
50. Halpern O "Scattering processes produced by electrons in negative energy states" *Phys. Rev.* **44** 855–856 (1933); Heitler W *The Quantum Theory of Radiation* (Oxford: The Clarendon Press, 1936) p. 193
51. Solomon J "Gravitation et quanta" *J. Phys. Radium* **VII** Ser. 9 (11) 479–485 (1938); Bustamante M C "Jacques Solomon (1908–1942): profil d'un physicien théoricien dans la France des années trente" ["Jacques Solomon (1908–1942): Profile of a theoretical physicist in France in the 1930s"] *Rev. d'Histoire Sci.* **50** (1&2) 49–87 (1997)
52. Горелик Г Е "В.А. Фок: философия тяготения и тяжесть философии" *Природа* (10) 81 (1993)
53. Блохинцев Д И, Гальперин Ф М "Гипотеза нейтрино и закон сохранения энергии" *Под знаменем марксизма* (6) 147–157 (1934)
54. Ландау Л Д, Абрикосов А А, Халатников И М "Асимптотическое выражение для функции Грина протона в квантовой электродинамике" *ДАН СССР* **95** 1177–1180 (1954); см. также в кн.: Ландау Л Д *Собрание трудов* Т. 2 (М.: Наука, 1969) с. 206
55. Klein O "Aktuelle Problem Kring Fysikens Sma och Stora Tal" *Kosmos* (Sweden) **32** 33 (1954); "Generalization of Einstein's Theory of Gravitation Considered from the Point of View of Quantum Field Theory" *Fuenfzig Jahre Relativitätstheorie. Bern, 11–16 Juli 1955* (Helvetica Physica Acta, Suppl. 4, Eds A Mercier, M Kervaire) (Basel: Birkhäuser, 1956) pp. 58–68
56. Wheeler J A "Geons" *Phys. Rev.* **97** 511–536 (1955)
57. Misner C W, Wheeler J A "Classical physics as geometry: gravitation, electromagnetism, unquantized charge, and mass as properties of curved empty space" *Ann. Phys.* (New York) **2** 525–603 (1957)
58. Rosenfeld L "On quantization of fields" *Nucl. Phys.* **40** 353–356 (1963)
59. Сахаров А Д "Вакуумные квантовые флуктуации в искривленном пространстве и теория гравитации" *ДАН СССР* **177** 70–71 (1967); *УФН* **161** (5) 64–66 (1991); см. также в сб.: *Академик А.Д. Сахаров. Научные труды* (Под ред. Б Л Альшулера и др.) (М.: Центр-ком ОТФ ФИАН, 1995) с. 155–162
60. Misner C W, Thorne K S, Wheeler J A *Gravitation* (San Francisco: W. H. Freeman, 1973) p. 426–428; Wheeler J A "Beyond the End of Time", in *The World of Physics: a Small Library of the Literature of Physics from Antiquity to the Present* Vol. 3 *The Evolutionary Cosmos and the Limits of Science* (Ed. J H Weaver) (New York: Simon and Schuster, 1987) p. 675–694
61. Тамм И Е "Теоретическая физика", в сб. *Октябрь и научный прогресс* Т. 1 (Под ред. М В Келдыша и др.; Сост. В А Боярский, Г Д Комков) (М.: Изд-во АПН, 1967) с. 170
62. Isham C J, Penrose R, Sciama D W (Eds) *Quantum Gravity: an Oxford Symp.* (Oxford: Clarendon Press, 1975) p. 605; written versions of talks at a symposium held at the Rutherford Laboratory on Feb. 15–16, 1974
63. Горелик Г Е "Первые шаги квантовой гравитации и планковские величины", в сб. *Эйнштейновский сборник, 1978–1979* (Под ред. У И Франкфурта) (М.: Наука, 1983) с. 334–364
64. Stachel J "History of relativity", in *Twentieth Century Physics* (Eds L M Brown, A Pais, Sir B Pippard) Vo. 1 (Philadelphia, PA.: Institute of Physics Publ., 1995) p. 317–319
65. Kiefer C *Quantum Gravity* (New York: Oxford Univ. Press, 2004) ix, 308 p.; Rovelli C *Quantum Gravity* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2004) xxiii, 455 p.
66. Einstein A "Autobiographical notes", in *Albert Einstein — Philosopher-Scientist* (The Library of Living Philosophers, Vol. 7, Ed. P A Schilpp) (Evanston, Ill.: Library of Living Philosophers, 1949) [Эйнштейн А "Автобиографические заметки" *Собрание научных трудов* Т. 4 (М.: Наука, 1967) с. 259–293]
67. Dyson F "The world on a string" *New York Rev. Books* **51** (8) (2004); <http://www.nybooks.com/articles/17094>

Matvei Bronstein and quantum gravity, 70th anniversary of the unsolved problem

G E Gorelik

Center for Philosophy and History of Science, Boston University, USA,

<http://people.bu.edu/gorelik>,

63 Longwood Ave., Apt. 4, Brookline MA 02446, USA

Tel. 1-617-975-2958

E-mail: gorelik@bu.edu

Matvei Bronstein's 1935 work on quantum gravity, the first indepth study of the problem, is analyzed in the contexts of the history of physics and the scientist's career. Bronstein's analysis of field measurability revealed "an essential difference between quantum electrodynamics and the quantum theory of the gravitational field" and showed that general relativity and quantum theory are fundamentally difficult to unify. Featured in the story are M. Planck, A. Einstein, W Heisenberg, W. Pauli, L. Rosenfeld, L. Landau, and N. Bohr. The methodological uniqueness of the quantum gravity problem is discussed.

PACS numbers: **01.65. + g**, **03.65.Ta**, **04.60. – m**

Bibliography — 67 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **175** (10) 1093–1108 (2005)

Received 10 June 2005, revised 26 June 2005

Physics – Uspekhi **48** (10) (2005)