

## Предисловие

В течение 1962–63 академического года Ричард Фейнман прочитал курс гравитации в Калифорнийском Технологическом Институте в городе Пасадина, США. Используя нетрадиционный подход к данному предмету, Р. Фейнман предназначал этот курс перспективным аспирантам и молодым докторам философии,<sup>1</sup> для которых привычны методы релятивистской квантовой теории, в частности, фейнмановские диаграммы теории возмущений в квантовой электродинамике. Два молодых доктора философии Фернандо Б. Моринги и Уильям Г. Вагнер записали этот курс лекций. Записи этого курса лекций были отпечатаны и их копии продавались в книжном магазине КАЛТЕХ'а в течение многих лет.

Эти записи лекций не были опубликованы, но были довольно широко распространены, и благодаря их уникальному и глубокому взгляду на основания физики они оказали огромное влияние на многих ученых, которые их прочитали. Моринги и Вагнер проделали большую работу по сохранению в столь хорошем виде этой части научного наследства Р. Фейнмана. Теперь, благодаря усилиям Брайана Хатфилда, эти лекции наконец опубликованы и стали легко доступны более широкой аудитории. При подготовке записок лекций для публикации Хатфилд исправил небольшие ошибки и улучшил обозначения, но в целом он следовал оригинальному машинописному тексту, подготовленному Моринги и Вагнером. (Только два коротких фрагмента полностью опущены в тексте книги.)<sup>2</sup>

Фейнман прочитал всего 27 лекций, по одной лекции в неделю в течении полного 1962–63 академического года. Слушатели встречали лектора на третьем этаже Лаборатории Ист Бридж КАЛТЕХ'а в крошечной аудитории, в которой было только два ряда стульев; не более, чем 15 слушателей посещали каждую лекцию. (По крайней мере, двое из студентов, посещавших эти лекции, Джеймс Бардин и Джеймс Хартль позднее внесли свой существенный вклад в теорию гравитации). Эти лекции записывались на магнитофон, но поскольку лекции читались в высшей степени неформально, Моринги и Вагнер сочли необходимым существенным образом пересмотреть материал

<sup>1</sup>Ученая степень доктора философии в США обычно считается соответствующей степени кандидата наук в нашей стране. (Прим. перев.)

<sup>2</sup>Пропущенные фрагменты содержат неправильное выражение для действия вещества в заключении 8.7 (правильное выражение имеется в разделе 10.2) и некоторые неверные утверждения о ньютоновской теории звездной устойчивости в третьем параграфе раздела 14.3.

для того, чтобы выпустить записи лекций в читаемом виде. По большей части Вагнер работал над математической стороной изложения, а Морингио работал над текстом. Получившиеся в результате лекции просматривались Фейнманом, он делал различные поправки и добавления, затем записи лекций распространялись среди студентов. Эти лекции были проникнуты духом Фейнмана, окроплены его шутками, но неминуемо его причудливое использование языка было только частично сохранено.

Только 16 лекций включены в эту книгу; они соответствуют, грубо говоря, первым 16 из 27 лекций, которые Фейнман прочитал. Морингио и Вагнер подготовили записи всех 27 лекций, но в конце академического года Фейнман просмотрел и исправил только первые 11 лекций. Очевидно, что он отвлекся на различные другие проекты и больше уже не возвращался к редактированию записей лекций. Таким образом, записи только первых 11 лекций распространялись среди студентов в течении 1962-63 годов и были размножены для продажи в книжном магазине КАЛТЕХ'а в последующие годы.

В июле 1971 года готовилось новое воспроизведение записей лекций для распределения через книжный магазин, и Фейнман разрешил включить в новое издание дополнительно еще пять лекций. Новые лекции предварялись своеобразным "отказом от ответственности":

Широкий интерес к этим лекциям по гравитации привел к третьему воспроизведению этих записей. Тогда, когда готовилось это издание, профессор Фейнман любезно разрешил включить еще пять лекций. Эти лекции должны были продолжить предыдущие одиннадцать лекций, распространенных в 1962-63 годах, однако они никогда удовлетворительным образом не редактировались и не исправлялись так, чтобы профессор Фейнман мог считать, что они могут быть включены в текст лекций.

Эти лекции сохраняют их грубую форму: за исключением небольших ошибок, исправленных при копировании, они остаются в том же самом виде, в котором они были восемь лет назад: профессор Фейнман не проверял их. Выражается надежда, что читатель будет держать это в уме и рассматривать следующие лекции как рассказ о том, о чем профессор Фейнман размышлял в то время, а не воспринимать этот текст как разрешенное и полностью обработанное воспроизведение его работы.

Действительно, кажется верным, что Фейнман не исправлял детально новые лекции. Например, лекция 14 содержит неправильные утверждения (обсуждаемые ниже), и в 1971 году (или даже в течении нескольких недель после чтения этой лекции) он мог бы легко

убедиться в том, что эти утверждения неправильны и проверить их. Таким образом, мы призываем читателя держать приведенный выше "отказ от ответственности" в уме при чтении лекций 12 – 16.

Поскольку Фейнман никогда не разрешал распространение записей Моринги и Вагнера последних 11 лекций, они не публикуются в этом томе. Эти последние лекции главным образом касаются радиационных поправок в квантовой гравитации и теории Янга – Миллса. Мы предполагаем, что Фейнман не хотел, чтобы они распространялись, поскольку он не был удовлетворен их содержанием.

Замечательно, что одновременно с этим курсом по гравитации, Фейнман также создавал и читал новаторский курс физики для студентов-второкурсников, который был увековечен как второй и третий том "Фейнмановских лекций по физике" [Feyn 63а]. Каждый понедельник Фейнман читал свою лекцию для второкурсников утром и лекцию по гравитации после ланча. Позднее на неделе следовала вторая лекция для второкурсников и лекция для научных работников в исследовательских лабораториях Хьюджа в Малибу. Кроме педагогической нагрузки и его собственных научных исследований, Фейнман работал в экспертном совете по рассмотрению учебников для Калифорнийского государственного совета по образованию, т.е. был увлечен проблемами преподавания, что поглощало его целиком, как это красочно описано в книге "Вы, конечно, шутите, мистер Фейнман?" [Feyn 85].<sup>1</sup> Стивен Фраучи, принимавший участие в лекциях по гравитации в качестве молодого ассистента КАЛТЕХ'а, вспоминал позже, что "Фейнман был полностью истощен" к концу 1962–63 академического года.

Курс Фейнмана никогда не был предназначен на то, чтобы быть достаточно полным введением в общую теорию относительности, и некоторые из этих лекций серьезным образом устарели. Большая часть материала в лекциях 7 – 12 покрывается более систематическим и в значительной степени более детальным изложением в других книгах. Почему же эти лекции должны были бы быть сейчас опубликованы? Существует, по крайней мере, три серьезных аргумента для подобной публикации. Во-первых, еще не было подобного педагогического опыта столь необычного подхода к основаниям общей теории относительности, который впервые был предложен Фейнманом (среди других авторов). Этот подход, представленный в лекциях 3 – 6, развивает теорию безмассового поля спина 2 (гравитона), взаимодействующего с тензором энергии-импульса вещества, и демонстрирует,

<sup>1</sup> Русский перевод некоторых глав этой книги опубликован в УФН [Фейн 86\*].  
(Прим. перев.)

что усилия, направленные на то, чтобы сделать теорию самосогласованной, неизбежно приводят к эйнштейновской теории относительности. (Именно благодаря этому, записи лекций стали хорошо известными в физическом сообществе). Во-вторых, записи лекций содержат увлекательные отступления и отклонения по поводу оснований физики и других вопросов, что делает эти записи лекций поучительными и интересными для чтения. В-третьих, эти записи имеют историческую ценность. В то время, когда Фейнман читал эти лекции, он напряженно размышлял в течении нескольких лет о фундаментальных проблемах гравитации, и представляется полезным иметь записи его размышлений и его точки зрения того времени. Некоторые из его взглядов кажутся нам сейчас, 32 года спустя, весьма проницательными, в то время как другие его гипотезы, естественно, кажутся наивными или неверными. В некоторых случаях его взгляды быстро эволюционировали в процессе чтения этих лекций. Это, в частности, верно для материала лекции 14 о релятивистских звездах, о чем ниже мы поговорим несколько подробнее.

Эти лекции представляют особую ценность для того, чтобы обучить нас точке зрения Фейнмана на гравитацию, но они не являются самым удачным текстом для обучения начинающего студента современной геометрической формулировке общей теории относительности или вычислительному аппарату и приложениям теории. Такие книги, как написанные Волдом [Wald 84], Шутцем [Schu 85], и Мизнером, Торном и Уилером [MTW 73], решают эту педагогическую задачу значительно лучше. Даже догматически негеометрическая точка зрения, которую предпочитал Фейнман, более систематически и полно изложена Вайнбергом [Wein 72]. Но нет другого источника, который бы содержал уникальные размышления Фейнмана и его подход к основаниям данного предмета.

Эти записи лекций могут быть прочитаны на нескольких различных уровнях читателями, имеющими различный уровень начальной подготовки:

- Для того, чтобы понять лекции полностью, читатели должны иметь продвинутый уровень подготовки в области теоретической физики. Фейнман предполагал, что для его аудитории привычны методы квантовой теории поля в такой степени, что эти знания позволяют получить информацию о том, как извлечь фейнмановские правила из действия и как использовать эти правила для того, чтобы вычислить древесные диаграммы. Тем не менее, эти методы теории поля серьезным образом используются только в лекциях 2–4 и 16, и даже в них ключевые идеи могут

схвачены без столь высокого уровня подготовки. Кроме того, другие лекции могут быть прочитаны более или менее независимо от этих лекций.

- Читатели с солидной подготовкой по физике могут найти эти лекции в большой степени понятными для себя, благодаря педагогическому мастерству Фейнмана. Тем не менее, такие читатели должны обладать некоторым эвристическим умением ухватить некоторые более технические детали изложения.
- Для почитателей Фейнмана, которые не имеют достаточного уровня подготовки по физике, эти лекции также содержат много ценного, хотя для того, чтобы извлечь это ценное потребуется значительное ознакомление с техническим материалом, который разбросан среди более земных интуитивных догадок и рассуждений.

Оставшаяся часть этого введения и следующий раздел, написанный Брайаном Хатфилдом, представляют собой краткое изложение лекций и обсуждение того, как они связаны с предшествующими исследованиями и последующим развитием теории. Как и сами лекции, это краткое изложение может быть прочитано на различных уровнях. Для того, чтобы помочь читателям, которые не имеют достаточного уровня подготовки в области теоретической физики, отмечены некоторые особенно технические разделы, которые читатели могут пропустить или только бегло просмотреть.<sup>1</sup>

#### *Вывод полевого уравнения Эйнштейна*

В период чтения этих лекций по гравитации Фейнман стремился к тому, чтобы прокантоновать гравитацию, т.е. создать синтез общей теории относительности и фундаментальных принципов квантовой механики. В целом подход Фейнмана к общей теории относительности сформирован его желанием получить квантовую теорию гравитации настолько непосредственным образом, насколько это возможно. Для этой цели тонкости геометрического подхода кажутся отвлечением от основной темы; в частности, общепринятый геометрический подход к гравитации затемжен разговором об аналогии между гравитацией и электромагнетизмом.

Используя ретроспективный взгляд, мы можем получить классическую электродинамику Максвелла, исходя из того наблюдения, что

---

<sup>1</sup> В русском переводе эти фрагменты набраны более мелким шрифтом. (Прим. перев.)

фотон является безмассовой частицей спина 1. Вид квантовой теории безмассовой частицы со спином 1, взаимодействующей с заряженной материей, в большой степени ограничивается фундаментальными принципами такими, как Лоренц-инвариантность и сохранение вероятности. Самосогласованная версия квантовой теории – квантовая электродинамика определяется в классическом пределе классическими полевыми уравнениями Максвелла.

Ободренный этой аналогией, Фейнман рассматривает квантовую теорию гравитации "просто как другую квантовую теорию поля", такую как квантовая электродинамика. Так, в лекциях 1 – 6 он задает вопрос: можем ли мы найти разумную квантовую теорию поля, описывающую безмассовые квантцы со спином 2 (гравитоны), взаимодействующие с веществом в обычном плоском пространстве-времени Минковского? Классический предел такой квантовой теории должен был бы определяться уравнением поля эйнштейновской теории относительности. Поэтому, для того, чтобы убедиться в виде классической теории, Фейнман привлекает внимание к характерные особенности квантовой теории, которые должны лежать в основании теории. Геометрические идеи проникают в обсуждение Фейнмана только через "черный вход" и развиваются первоначально как технические средства для того, чтобы помочь в построении приемлемой теории. Так, например, тензор кривизны (Римана), являющийся узловым пунктом общепринятой формулировки общей теории относительности, вводится Фейнманом первоначально (6.4) только как средство для построения членов в гравитационном действии, удовлетворяющем требуемым свойствам инвариантности. Действительно, только в лекции 9 (разделе 9.3) лекций Фейнман показывает, что кривизна имеет интерпретацию через параллельный перенос касательного вектора по искривленному пространственно-временному многообразию.

Критической особенностью квантовой теории является то, что безмассовый гравитон со спином 2 имеет только два состояния спиральности. Таким образом, классическое гравитационное поле также должно иметь только две динамические степени свободы. Тем не менее, классическое гравитационное поле, которое соответствует частице со спином 2, является симметричным тензором  $h_{\mu\nu}$  с десятью компонентами. На самом деле, четыре из этих компонент  $h_{00}, h_{0i}$  (при  $i = 1, 2, 3$ ) являются нединамическими связанными переменными, так что у нас остается только шесть динамических компонент  $h_{ij}$  для того, чтобы описать состояния с двумя физическими спиральностями. Из-за того, что есть несоответствие между числом состояний частицы и числом полевых компонентов, следует, что квантовая теория поля и отсюда также и соответствующая классическая

теория являются в большой степени теориями со связями.

Для того, чтобы разрешить это несоответствие, необходимо включить в теорию избыточность так, чтобы многие различные классические полевые конфигурации описывали одно и то же физическое состояние. Другими словами, это должна быть калибровочная теория. Для безмассового поля спина 2 может быть показано, что необходимый калибровочный принцип является условием общей ковариантности, что приводит к эйнштейновской теории.

В лекции 3 Фейнман построил квадратичное действие безмассового поля спина 2, которое линейным образом связано с сохраняющимся тензором энергии-импульса. Он объясняет калибровочную инвариантность результирующего линейного полевого уравнения в разделе 3.7 и дает комментарий в разделе 4.5 о том, что можно сделать вывод о нелинейном самовзаимодействии поля, основываясь на требовании калибровочной инвариантности амплитуд рассеяния. Но Фейнман не доводит эту программу до конца. (Он только замечает, что это довольно трудно было бы сделать.) Вместо этого, он использует довольно отличный от этого подхода метод для того, чтобы получить эйнштейновское нелинейное классическое полевое уравнение, метод, основное внимание в котором сосредоточено на *непротиворечивости*. Так как линейное полевое уравнение для свободного безмассового поля со спином 2 с необходимостью имеет калибровочную инвариантность (для того, чтобы устранить ненужные состояния спиральности), общие модификации такого полевого уравнения (такие, как модификации, которые возникают тогда, когда поле спина 2 связано с матерiąей) не допускают никаких решений. Новые члены в модифицированном уравнении должны удовлетворять нетривиальному условию *непротиворечивости*, которое существенным образом является требованием того, что новые члены удовлетворяют калибровочной симметрии. Это условие непротиворечивости оказывается достаточным при указании пути в направлении специфического эйнштейновского множества нелинейных связей и соответствующего нелинейного полевого уравнения.

Более подробно: задача, как она сформулирована в разделе 6.2, состоит в том, чтобы найти функционал действия  $F[h]$  для поля спина 2 такого, что гравитационное полевое уравнение

$$\frac{\delta F}{\delta h_{\mu\nu}} = T^{\mu\nu} \quad (\text{II.1})$$

согласуется с уравнением движения вещества. Здесь  $T^{\mu\nu}$  есть тензор энергии-импульса вещества. В лекции 3 Фейнман находит квадратичное выражение для  $F$ , которое удовлетворяет согласованному линейному полевому уравнению до тех пор, пока сохраняется тензор энергии-импульса вещества (для случая специальной теории относительности)  $T^{\mu\nu}{}_{;\nu} = 0$ . Беспокойство возникает тогда, когда поле  $h_{\mu\nu}$  взаимодействует с веществом так, что вещество действует как источник  $h_{\mu\nu}$ , уравнение движения вещества модифицируется гравитационными силами и величина  $T^{\mu\nu}{}_{;\nu}$  не оказывает-

ся более нулевой. Таким образом, полевое уравнение для  $h_{\mu\nu}$  и уравнение движения вещества оказываются несовместными; эти уравнения не допускают одновременных решений. В этом состоит проблема непротиворечивости (линейной теории).

Используя требования того, что полевое уравнение удовлетворяется тензором  $h_{\mu\nu}$  совместно с уравнением движения материи, Фейнман сделал вывод о том, что нелинейные поправки более высокого порядка должны быть добавлены к действию  $F$ . Требование непротиворечивости может быть облачено в форму принципа инвариантности, которому удовлетворяет действие, (с учетом этого принципа действие есть инвариант при общих координатных преобразованиях). После этого фейнмановский анализ стал довольно общепринятым и привел к заключению о том, что достаточно общее согласованное полевое уравнение, которое включает в себя не более двух производных, есть уравнение Эйнштейна (с космологической постоянной).

Результирующие нелинейные поправки имеют приятную физическую интерпретацию. Без этих поправок гравитация не имеет связи сама с собой. Когда нелинейные поправки включаются в рассмотрение, источник для гравитационного поля (как он рассматривается в плоском пространстве-времени Минковского) есть полный тензор энергии-импульса, включающий вклад, обусловленный собственно гравитационным полем. Другими словами, удовлетворяется (сильный) принцип эквивалентности. Закон сохранения, удовлетворяемый энергией-импульсом вещества, становится эйнштейновским ковариантным законом,  $T^{\mu\nu}_{;\nu} = 0$ , который в сущности допускает обмен энергией и импульсом между веществом и гравитацией.

Мы знаем из фейнмановских комментариев, сделанных в 1957 году на конференции в Чапел Хилл [DeWi 57], что уже тогда он работал над вычислениями, описанными в лекциях 2 – 6. Мюррей Гелл-Манн сообщал [Gell 89], что Фейнман и он обсуждали различные вопросы квантовой гравитации в течении рождественских каникул в 1954 – 55 годах, и что уже тогда Фейнман достиг "значительного прогресса" в этой области.

Требование того, что единственная разумная теория взаимодействующего безмассового поля спина 2 является по существу общей теорией относительности (или хорошо аппроксимируется общей теорией относительности в низкоэнергетическом пределе), довольно часто высказывается и сегодня. (Например, доказывается, что так как теория суперструн содержит безмассовые частицы спина 2, это может быть теория гравитации). Фактически, Фейнман не был самым первым, кто высказал это требование.

Полевое уравнение для свободного безмассового поля спина 2 было выписано Фирцем и Паули в 1939 году [FiPa 39]. С того времени идея рассмотрения эйнштейновской гравитации, как теории поля спина 2 в плоском пространстве, изредка встречалась в литературе. Тем не менее, насколько мы знаем, первая опубликованная попытка вывести нелинейные связи в теории Эйнштейна в рамках такого подхода появилась в работе Сурая Гу-

пты в 1954 году [Gupt 54]. Гупта заметил, что действие в теории должно подчиняться нетривиальному условию непротиворечивости, которое удовлетворяется в общей теории относительности. Тем не менее, он не привел никакого детального аргумента в пользу единственности полевого уравнения Эйнштейна.

Грубо говоря, аргумент Гупты состоит в следующем. Мы хотим построить теорию, в которой "источник", связанный с безмассовым полем спина 2, есть тензор энергии-импульса, *включающий* энергию-импульс самого поля спина 2. Если выбрать источник поля таким образом, что он есть тензор энергии-импульса  ${}^2T^{\mu\nu}$  теории свободного поля (которая квадратична по  $h$ ), то связь этого источника с тензором  $h_{\mu\nu}$  приводит к появлению кубического члена в лагранжиане. Из этого кубического члена в лагранжиане может быть выведен соответствующий кубический член  ${}^3T^{\mu\nu}$  в тензоре энергии-импульса, который тогда включается в источник. Этим порождается член четвертого порядка  ${}^4T^{\mu\nu}$  и так далее. Эта итерационная процедура порождает бесконечные ряды, которые могут быть просуммированы для того, чтобы получить полные нелинейные уравнения Эйнштейна. Гупта кратко описал эту процедуру, но на самом деле не довел ее до завершения. Первая полная (и особенно элегантная) версия была опубликована Дезером в 1970 году [Dese 70]. Дезер также заметил, что теория Янга – Миллса может быть выведена, исходя из подобного подхода.

За несколько лет до работы Гупты, Роберт Крайчман, тогда 18-летний студент Массачусетского Технологического Института, также изучал проблемы вывода общей теории относительности как непротиворечивой теории безмассового поля спина 2 в плоском пространстве. Он описал свои результаты в неопубликованной диссертации на степень бакалавра [Krai 47]. Крайчман продолжил исследования по этой проблеме в Институте Перспективных Исследований в 1949 – 1950 годах. Он вспоминает, что хотя он и получил некоторое одобрение от Брайса Де Витта, очень немногие из его коллег поддерживали его усилия. Эта группа определенно включала в себя самого Эйнштейна, который пришел в ужас от такого подхода к гравитации, отвергавшего его собственное геометрическое понимание, полученное им в результате огромной проделанной работы. Крайчман не публиковал никакие из своих результатов до 1955 года [Krai 55, Krai 56], когда он наконец нашел вывод, который его удовлетворил. В отличие от Гупты, Крайчман не предполагал, что гравитация взаимодействует с полным тензором энергии-импульса. Скорее всего он, как и Фейнман, выводил свой результат как следствие непротиворечивости полевых уравнений. Кажется вероятным, что Фейнман совершенно ничего не знал о работах Гупты и Крайчмана.

Мы должны были бы указать на то, что анализ Фейнмана весьма далек от наиболее общего анализа, который можно было бы провести (анализ Фейнмана является существенно менее общим, чем анализ Крайчмана). Фейнман предполагал некоторый частный вид для действия вещества (которое соответствует действию для релятивистской частицы) и далее

предполагал строго линейную связь поля вещества спина 2 (которая была бы невозможна для более общего действия для материи). В частности, отметим, что все физические предсказания теории не меняются, если проводится нелинейное локальное переопределение поля спина 2; мы вольны сделать замену  $h_{\mu\nu}(x)$  на  $\bar{h}_{\mu\nu}(h(x)) = h_{\mu\nu}(x) + O(h(x)^2)$ . Фейнман косвенным образом устранил эту свободу для того, чтобы делать подобные переопределения исходя из требования, что взаимодействие с материей должно быть линейно по  $h$ . (Полевые переопределения рассматривались детально Боулваром и Дезером [BoDe 75].) Значительно более общий анализ условия непротиворечивости для полевого уравнения проводился позднее Волдом [Wald 86] и привел его в конце концов к заключениям, аналогичным тем, к которым пришли Крайчман и Фейнман.

Совершенно другой подход к выводу формы гравитационного взаимодействия был разработан Вейнбергом [Wein 64a, Wein 64b]. Сделав весьма разумные предположения об аналитических свойствах амплитуд рассеяния при гравитон-гравитон взаимодействии, Вейнберг показал, что теория взаимодействующей безмассовой частицы со спином 2 может быть лоренцинвариантной, только если частицы взаимодействуют с материей (включая взаимодействие с самой собой) с некоторой универсальной силой, другими словами, только если удовлетворяется сильный принцип эквивалентности. До известной степени аргументация Вейнберга – наиболее глубокая и мощная, так как свойство того, как гравитон взаимодействует с тензором энергии-импульса, выводится из других более общих принципов. Как только принцип эквивалентности установлен, можно продолжить построение эйнштейновской теории [Wein 72].

Наконец, существует вопрос о том, как должны быть исключены члены в лагранжиане, включающие в себя производные выше второго порядка от тензора  $h_{\mu\nu}$ . В лекциях Фейнмана этому вопросу удалено очень мало внимания, за исключением замечания в разделе 6.2, что включение членов с двумя производными (или менее) приведет к “наипростейшей” теории. (См. также в разделе 10.3 связанное с этим замечание в слегка другом контексте.) Фейнман, по-видимому, не предвосхитил современную точку зрения [Wein 79], что члены с более высокими производными обязательно присутствуют в лагранжиане, но эти члены оказывают пренебрежимо малое влияние на предсказания теории, когда кривизна пространства-времени мала. Философия, лежащая в основе этой точки зрения, состоит в том, что лагранжиан эйнштейновской теории является просто “эффективным лагранжианом”, который описывает низко-энергетическую феноменологию более фундаментальной теории – теории, которая могла бы включать в себя новые степени свободы (суперструны?) на масштабах длины порядка планковской длины  $L_P = (G\hbar/c^3)^{1/2} \simeq 10^{-33}$  см. В эффективном лагранжиане допускаются все члены, согласованные с общими принципами, включая члены с произвольным числом производных. Тем не менее, основываясь на соображениях размерности, член с более высокими производными имеет коэффициент, пропорциональный более высокой степени  $L_P$ . Таким образом,

в процессе, включающем в себя характерный радиус кривизны порядка  $L$ , члены в лагранжиане с четырьмя производными дают эффекты, которые подавлены по сравнению с эффектами, вызываемыми членами со второй производной, подавлены множителем порядка  $(L_P/L)^2$ , который чрезвычайно мал для любых разумных процессов. В таком случае мы можем понять, почему усеченная теория, включающая только члены со второй производной и ниже, была бы в замечательном согласии с экспериментом.

С другой стороны, то же самое рассуждение также приводит к ожиданию появления "космологического" члена (в котором нет производных) с коэффициентом порядка 1 в единицах  $L_P$ . То, что космологическая постоянная является фактически необычайно малой сравнительно с такими наивными ожиданиями, остается одной из великих неразрешенных тайн физики гравитации [Wein 89].

### *Геометрия*

После проведения исследований в целях построения разумной теории, которая описывает взаимодействия безмассовых полей спина 2 в плоском пространстве, Фейнман не отказался от того, чтобы высказать восхищение (как в разделе 8.4), что получившаяся в результате теория имеет геометрическую интерпретацию: "... этот факт состоит в том, что поле спина 2 имеет геометрическую интерпретацию; это не является чем-то легко объяснимым, это является просто удивительным." В лекциях 8 – 10 при развитии теории используется геометрический язык, который является более традиционным, чем тот подход, который использовался в его более ранних лекциях.

В разделе 9.3 Фейнман замечает, что он не знает геометрической интерпретации тождества Бианки, и он кратко описывает, как можно было бы обнаружить этот геометрический смысл. Геометрическая интерпретация, которую он представляет, была в явном виде описана в работе французского математика Эли Картана в 1928 году [Cart 28]; тем не менее, она была неизвестна широким кругам физиков, даже кругам профессиональных релятивистов в 1962 году. Эта геометрическая интерпретация была высказана на языке дифференциальных форм, на котором Фейнман не говорил. Интерпретация Картана состояла в том, что "граница границы равна нулю", как было в конце концов извлечено из идей Картана Чарльзом Мизнером и Джоном Уилером в 1971 году, что сделало эту интерпретацию широко доступной; см. например, часть 15 монографии [MTW 73] на техническом уровне и часть 7 книги [Whee 90] на популярном уровне.

### *Космология*

Некоторые из идей Фейнмана о космологии имеют современное звучание. Хороший пример – это его внимание к вопросу о происхождении материи. Идея о непрерывном образовании вещества в стационарной

космологической модели серьезно не раздражает его (он замечает в разделе 12.2, что в космологии Большого Взрыва существует проблема (причем довольно неприятная), как объяснить, откуда берется вся материя в *самом начале*). В разделе 1.2 и вновь в разделе 13.3 он подчеркивает, что полная энергия вселенной могла бы быть в действительности равной нулю, и что образование вещества возможно, поскольку энергия покоя вещества на самом деле сокращается энергией гравитационного потенциала. "Дух захватывает от мысли о том, что *ничего* не стоит образовать новую частицу...". Это близко к популярному взгляду на то, что вселенная есть "бесплатный обед", ничто или почти ничто взрывается до космологического размера, проходя через чудо инфляции [Guth 81]. Фейнман беспокоился более о необходимости несохранения барионного числа, если вселенная возникает из "*ничего*".

Фейнман также выразил предпочтение для "критического" значения плотности в разделе 13.1, и этот предрассудок довольно широко распространен сейчас [LiBr 90]. В разделе 13.2 он дал интересный (и качественно правильный) аргумент в поддержку того, что плотность близка к критической: он замечает, что существование скоплений и сверхскоплений галактик приводит к тому, что "гравитационная энергия того же самого порядка, что и кинетическая энергия расширения, это позволяет мне предположить, что средняя плотность должна быть очень близка к критической плотности всюду." В 1962 году это был довольно непривычный аргумент.

Очевидно, что уже в начале 60-х годов Фейнман признал необходимость новых фундаментальных принципов физики, которые могли бы обеспечить нас предварительным описанием начальных условий вселенной. В начале этих лекций, в разделе 2.1, он отклоняется на обсуждение оснований статистической механики, чтобы выразить убеждение в том, что второй закон термодинамики должен иметь космологическое происхождение. Отметим его утверждение "...вопрос состоит в том, как в квантовой механике описать ту идею, что состояние вселенной в прошлом было чем-то особым." (Подобная интуитивная догадка также появилась в книгах "Фейнмановские лекции по физике" [Feyn 63a] и "Характер физических законов" [Feyn 67], которые были датированы тем же самым периодом.) Таким образом, по-видимому, Фейнман предвидел то увлечение квантовой космологией, которое начало овладевать вниманием значительной части физического сообщества около двадцати лет назад. Он также выражает в разделах 1.4 и 2.1 неприемлемость копенгагенской интерпретации квантовой механики в космологическом контексте.

### *Сверхзвезды*

В 1962 – 63 годах, когда Фейнман читал свои лекции по гравитации, КАЛТЕХ был взволнован новыми открытиями "сильных радиоисточников".

В течение 30 лет астрономы были озадачены выяснением природы этих наиболее сильных из всех объектов, излучающих в радиодиапазоне. В 1951 году Уолтер Бааде [Baad 52] использовал новый оптический 200-дюймовый телескоп КАЛТЕХ'а на горе Паломар для того, чтобы открыть наиболее яркий из радиоисточников – Лебедь А (*Cyggnus A*), который не являлся (как это ожидали астрономы) звездой в нашей собственной Галактике, но был связан с некоторой особенной, довольно удаленной галактикой. Двумя годами позже Р.К.Дженнисон и М.К.Дас Гупта [JeDG 53], изучая источник Лебедь А с помощью нового радиоинтерферометра в Джодрелл Бенк, Англия, открыли, что большая часть радиоволн приходит не от внутренней части галактики, а от двух гигантских полостей, расположенных с противоположных сторон от галактики, которые имеют размер около 200 000 световых лет и около 200 000 световых лет между этими полостями. Радиоинтерферометр КАЛТЕХ'а, расположенный в ущелье Оуэнса, вошел в строй в конце 50-х годов, и в 1962–63 годах, времени чтения лекций Фейнмана, этот интерферометр использовался совместно с оптическим 200-дюймовым телескопом на горе Паломар для того, чтобы идентифицировать многие другие радиоисточники с двойными полостями. Некоторые, как и Лебедь А, размещены в центре галактик; другие объекты размещены на звездо-подобных точечных источниках света (которые, как обнаружил 5 февраля 1963 сотрудник КАЛТЕХ'а Мартин Шмидт, имеют гигантские значения красного смещения [Schm 63], а позже в том же году Хонг Йи Чиу, назвал эти объекты *квазарами*). В 1962 году и в начале 1963 года, тогда как астрономы КАЛТЕХ'а соревновались друг с другом для того, чтобы провести новые и лучшие наблюдения этих странных объектов и проинтерпретировать их спектры, астрофизики соревновались в построении моделей этих объектов.<sup>1</sup>

Одна особенно многообещающая модель была представлена летом 1962 года сотрудником Кембриджа Фредом Хойлом и сотрудником КАЛТЕХ'а Уильямом Фаулером [HoFo 63]. В рамках этой модели предполагается, что мощность для каждого сильного радиоисточника приходит от сверхмассивной звезды в центре галактики. Громадная величина энергии радиополостей (оцененная Джоффри

<sup>1</sup> Для ознакомления с дальнейшими историческими деталями, см., например, часть 9 [Thor 94] и ссылки в этой книге.

Бербиджем как  $10^{58} - 10^{60}$  эрг, т.е. эквивалент энергии  $10^4 - 10^6$  солнечных масс) требует, чтобы эта система управлялась бы сверхмассивной звездой, имеющей массу  $\sim 10^6 - 10^9$  солнечных масс. По сравнению с верхним пределом массы нормальных звезд, равным  $\sim 100$  солнечных масс, эти объекты Хойла – Фаулера были на самом деле "сверхмассивными." Эти объекты стали называться в некоторых кругах *сверхзвездами*.

Где-то в начале 1963 года (вероятно в феврале или марте) Фред Хайл делал доклад на семинаре (SINS)<sup>1</sup> в Лаборатории излучения (Лаборатории Келлога) КАЛТЕХ'а о модели сверхзвезды для сильных радиоисточников. Во время, когда задавали вопросы, Ричард Фейнман высказал возражение о том, что эффекты общей теории относительности должны были бы делать все сверхзвезды неустойчивыми, по крайней мере, в том случае, если они невращающиеся. Они должны были бы коллапсировать для того, чтобы образовать то, что в настоящее время называется черными дырами.

Хайл и Фаулер находились в сомнении, но в течение нескольких месяцев они и независимо от них Ико Ибен [Iben 63] (старший научный сотрудник в Лаборатории Келлога, в которой работал Фаулер) проверили и убедились в том, что Фейнман наиболее вероятно был прав. С. Чандрасекар из Чикагского Университета независимо открыл неустойчивость в рамках общей теории относительности и вполне определенным образом проанализировал эту неустойчивость.

По словам Хойла и Фаулера замечание Фейнмана было "громом среди ясного неба", полностью неожиданным и не имело видимого основания, за исключением изумительной физической интуиции Фейнмана. На Фаулера это произвело такое впечатление, что он описывал этот семинар и интуитивную догадку Фейнмана многим коллегам по всему миру, добавляя, тем самым, еще одну (правдивую) историю к легенде Фейнмана.

На самом деле интуиция Фейнмана не возникала без труда. Здесь, как и где-нибудь в другом месте, эта интуиция основывалась на огромном объеме детальных вычислений, проводимых из-за любознательности Фейнмана. И в этом случае, в отличие от других, Фейнман оставил нам моментальный снимок его напряженной работы, в результате которой им было сделано открытие: это лекция 14 в этом томе.

Мы собрали вместе обстоятельства, окружающие лекцию 14, главным образом основываясь на записках января 1963 года Ико Ибена и

<sup>1</sup>"Stellar Interiors and Nucleosynthesis" – "внутреннее строение звезд и нуклеосинтез" – серия семинаров, которые организовал и проводил Фаулер.

на его воспоминаниях, кроме того, на беседе между Фейнманом и Торном, произошедшей где-то в районе 1971 года, и фрагментах воспоминаний Джеймса Бардина, Стивена Фраути, Джеймса Хартля и Уильяма Фаулера.

Где-то в конце 1962 года или в начале января 1963 года Фейнману должно было прийти в голову, что на сверхзвезды Хойла – Фаулера должны были бы оказывать сильное влияние силы общей теории относительности. Согласно запискам Ибена, Фейнман пришел в его комнату в Лаборатории Келлога где-то до 18 января, поднял вопрос о том, как влияет общая теория относительности на сверхзвезды, показал Ибену уравнения общей теории относительности, которые описывают структуру сверхзвезды и которые Фейнман выписал для самого себя, исходя из первых принципов, и спросил о том, как астрофизики, такие как Ибен, действуют при построении ньютоновских звездных моделей из аналогичных ньютоновских уравнений. После этого обсуждения, Фейнман ушел и вернулся где-то на неделе (21 – 25 января). "Фейнман ошарашил меня", вспоминал Ибен, "тем, что он пришел и сказал мне, что он [уже] решил ... уравнения. Он сказал мне, что он провел некоторые консультации с компьютерной фирмой и решил эти уравнения в реальное время, как это должно было бы быть сделано на поколении компьютеров типа рабочей станции".

В понедельник 28 января, имея только несколько дней для того, чтобы обдумать численные решения (и, предположительно, затратив достаточно много времени на различные другие дела, так как он должен был готовить лекцию для второкурсников в тот же самый понедельник), Фейнман прочитал лекцию 14 из этой книги. (Заметим, что это было всего за восемь дней до открытия Мартином Шмидтом красных смещений квазаров.)

Лекция 14 пришла на середину усилий Фейнмана, направленных на то, чтобы представить себе, как должны вести себя сверхзвезды, эта лекция была *до* того, как он осознал, что эффекты общей теории относительности дестабилизируют эти сверхзвезды. Как результат, посвященные интерпретации фрагменты лекции 14 (разделы 14.3 и 14.4) в большой степени неверны, но несмотря на это представляется интересным указать те пути, которые использовал Фейнман при своем интуитивном подходе к решению этой задачи.

Фейнман никогда не просматривал напечатанную Моринги и Вагнером версию лекции 14; и в 1971 году, когда он одобрил лекции 12 – 16 для распространения, он скорее всего забыл, что часть лекции 14, связанная с интерпретацией, представляет собой отчет о рассуждениях, которые однако не принесли достойного плода.

Фейнман начал свою лекцию 14 введением модели сверхзвезды, "которая очень проста, но может, тем не менее, обладать огромным множеством атрибутов реальных процессов. После того, как мы поймем, как обходиться с решением такой простой задачи, мы можем позаботиться об усовершенствованиях в модели." (Усовершенствования – это учет влияния электрон-позитронных пар, испускания нейтрино, ядерного горения, вращения, неустойчивостей – будут добавлены позднее в 1963–64 годах Ибеном [Iben 63], Куртисом Майклом [Mich 63], Фаулером [Fowl 64] и Бардином [Bard 65] при значительных обсуждениях с Фейнманом и постановке им некоторых задач.)

Поскольку цель Фейнмана состояла в изучении эффектов общей теории относительности, его модель сверхзвезды была полностью общерелятивистская, в отличие от предыдущих моделей Хойла – Фаулера, которые были ньютоновыми. С другой стороны, там, где Фаулер и Хайл включили в рассмотрение вклад газа, и излучения в давление звезды и внутреннюю плотность энергии, Фейнман упрощает модель, игнорируя вклад газа в давление  $p_{\text{газ}}$  и во внутреннюю энергию  $\epsilon_{\text{газ}}$ . Это представляется разумным, так как основное внимание Фейнмана сосредоточено на сверхзвезде с массой  $M = 10^9 M_{\text{sun}}$ , а Хайл и Фаулер показали, что в ньютоновском пределе сверхзвезды сильно радиационно-доминированы при

$$\beta \equiv \frac{p_{\text{газ}}}{p_{\text{излучение}}} = \frac{2\epsilon_{\text{газ}}}{\epsilon_{\text{излучение}}} = 8.6 \left( \frac{M_{\text{sun}}}{M} \right)^{1/2} \simeq 3 \times 10^{-4} \left( \frac{10^9 M_{\text{sun}}}{M} \right)^{1/2}. \quad (\text{П.2})$$

(Здесь для простоты мы предполагаем, что газ является чистым водородом). Поскольку такие звезды в большой степени являются конвективными, их энтропия на нуклон есть величина, не зависящая от радиуса, что означает в свою очередь, что величина  $\beta$  есть  $8 \times (\text{Постоянная Больцмана}) / (\text{энтропия на нуклон})$ , есть также величина, не зависящая от радиуса; и этот факт остается справедливым и для общерелятивистского случая, как отдавал себе в этом отчет Фейнман, хотя уравнение (П.2) меняется на множитель порядка единицы.

Пренебрегая вкладом  $p_{\text{газ}}$  и  $\epsilon_{\text{газ}}$ , Фейнман приступил в разделе 14.1 и 14.2 лекции 14 к построению общерелятивистских уравнений, описывавших структуру сверхзвезд, он сообщает, что он проинтегрировал их численно и представил результаты в таблице 14.1. Эта таблица может быть проинтерпретирована с помощью уравнений (14.2.1), в которых параметр Фейнмана  $\tau$  есть

$$\tau = \frac{4/3}{\text{энтропия на нуклон}} = \left( \frac{\text{масса покоя нуклона}}{\text{Постоянная Больцмана}} \right) \frac{\beta}{6} \simeq 1800\beta, \quad (\text{П.3})$$

так как Фейнман использует единицы, в которых масса покоя нуклона и температура  $10^9$  °К кладутся равными единице.

При обсуждении моделей Фейнмана и его (неверной) интерпретации их, полезно было бы использовать рисунок П.1. Этот рисунок показывает некоторые признаки семейства моделей сверхзвезд, которые построил Фейнман (толстая кривая), совместно с их продолжением на почти ньютоновский режим (верхняя тонкая линия) и их продолжением на почти ньютоновский режим (нижняя тонкая линия) – эти продолжения были вычислены позднее Ибеном [Iben 63], Фаулером [Fowl 64], Бардиным [Bard 65] и Тупером [Toop 66]. По вертикальной оси откладывается гравитационная энергия связи звезды со знаком "минус"; по горизонтальной оси откладывается радиус звезды. В практически ньютоновском режиме (затененная область кривой связи энергии), который Фейнман не исследует, нельзя пренебречь величинами  $r_{\text{газ}}$  и  $\epsilon_{\text{газ}}$ , энергия связи задается (как показал Фаулер [Fowl 64], как отклика на "гром среди ясного неба" Фейнмана) следующим тонким балансом между газовым давлением (первым членом) и эффектами общей теории относительности (второй член):

$$\frac{M - M_{\text{rest}}}{M_{\text{rest}}} \simeq -\frac{3\beta}{8} \left( \frac{2M}{R} \right) + 1.3 \left( \frac{2M}{R} \right)^2. \quad (\text{П.4})$$

Здесь  $2M$  – радиус Шварцшильда черной дыры с той же самой массой, что и масса сверхзвезды.

При интерпретации моделей в разделе 14.3 Фейнман начал с того, что спросил об эволюции сверхзвезды, состоящей из фиксированного количества нуклонов (т.е. фиксированной нуклонной массы покоя  $M_{\text{rest}}$ ), которая постепенно излучает тепловую энергию, что, тем самым, приводит к уменьшению полной массы  $M$  и делает звезду более плотно связанный. Он обнаружил странную эволюцию: когда звезда излучает, ее радиус увеличивается (движение вниз и направо по толстой кривой на рис. П.1) и ее температура в центре уменьшается. Это противоречит поведению большей части других звезд, которые, когда они излучают, сжимаются и нагреваются, в том случае, если в них не происходит горения термоядерного топлива. (Если вместо того, чтобы иметь дело с полностью релятивистской областью слева от точки минимума кривой связи, Фейнман сохранил бы учет влияния газа и провел вычисления в почти ньютоновской области справа, он обнаружил бы противоположное поведение: сверхзвезда должна была бы сжиматься и нагреваться, когда она излучает).

Фейнман поставил вопрос о том, являются ли его модели сверхзвезд устойчивыми. "Устойчивость нашей звезды не изучена [количественно]", подчеркивает он и затем продолжает представлять исходные рассуждения по данному вопросу: "[Модели, которые имеют] одно и то же количество нуклонов и одно и то же значение  $\tau$  [одно и то же значение энтропии], могут сравниваться как по значению радиуса, так и по температуре в центре. Факт, состоящий в том, что очевидно имеется минимальное значение радиуса [наиболее левый изгиб на рис. П.1], ... является очень соблазнительным; звезда может иметь устойчивую конфигурацию". Здесь Фейнман интуитивно идет к методу анализа устойчивости, создание которого было

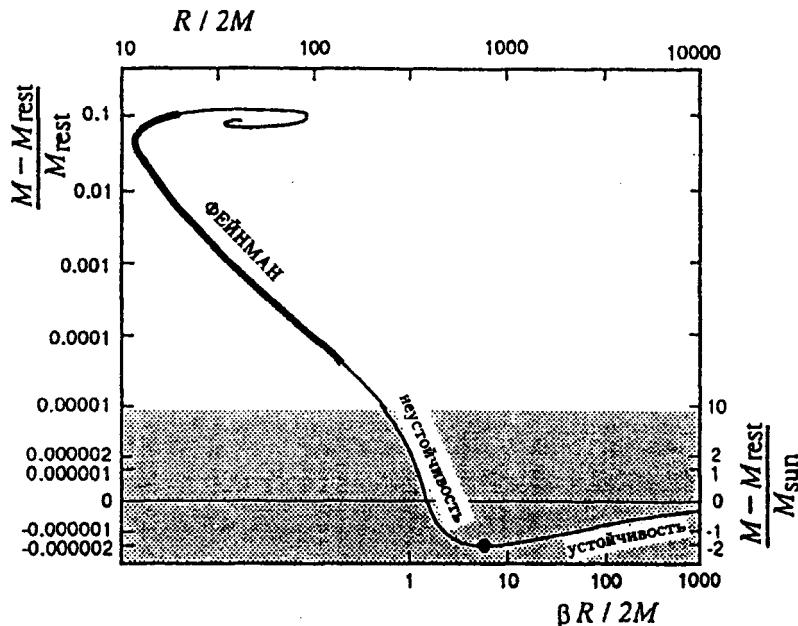


Рис. П.1. Энергия связи звезды, состоящей из водорода. На вертикальной оси слева отложена отрицательная величина относительной энергии связи, т.е.  $(M - M_{\text{rest}})/M_{\text{rest}}$ , где  $M$  – полная масса звезды и  $M_{\text{rest}}$  – полная масса покоя всех нуклонов звезды; по горизонтальной (верхней) оси отложен радиус звезды в единицах радиуса Шварцшильда  $2M$  черной дыры с той же самой массой. Масштабы, отложенные на левой оси и верхней оси, справедливы в белой области для сверхзвезд любой массы, но в (почти ньютонаской) затененной области только при  $M = 10^6 M_{\text{sun}}$ . На вертикальной правой оси отложена отрицательная величина от относительной энергии связи в единицах массы Солнца  $M_{\text{sun}}$ ; на нижней горизонтальной оси отложена величина  $R/2M$ , умноженная на отношение  $\beta$  газового давления и полного давления. Правый и нижний масштабы оказываются справедливыми для сверхзвезд любой массы в почти ньютоновской затененной области, но они оказываются неверными в полностью релятивистской белой области. Вертикальный масштаб является арктангенсом, т.е. он почти линеен при  $|(M - M_{\text{rest}})/M_{\text{sun}}| \lesssim 1$ , и логарифмическим при  $|(M - M_{\text{rest}})/M_{\text{sun}}| \gtrsim 1$ . Толстая часть кривой следует из вычислений Фейнмана, изложенных в лекции 14, тонкие части связаны с работами Ибена [Iben 63], Фаулера [Fowl 64], Бардина [Bard 65] и Тупера [Tooper 66].

завершено год или более спустя Джеймсом Бардином, когда он стал аспирантом Фейнмана. Завершенная Бардином версия аргумента Фейнмана [Bard 65, BTM 66] показала, что когда мы движемся вдоль кривой, описывающей энергию связи, ограничивая себя только фиксированными значениями массы  $M_{\text{rest}}$ , энтропия меняется от одной модели к другой, за исключе-

нием области в окрестности каждого минимума или максимума связи, где конфигурация является стационарной. Это означает, что звезда обладает модой деформации с нулевой частотой для каждого значения минимума или максимума, модой, которая переносит сверхзвезду от одной равновесной модели к другой с тем же самым значением энтропии, энергии связи и массой покоя. Это в свою очередь означает, что одна мода радиальных колебаний меняет устойчивость в каждом экстремуме связи. Анализируя эти конфигурации и рассматривая моды собственных функций, которые должны иметь место, Бардин выводит, что если кривая связи поворачивается по часовой стрелке, когда по ней перемещаемся через экстремум, тогда эта мода становится неустойчивой; если эта кривая поворачивается против часовой стрелки, тогда эта мода становится устойчивой. (Это утверждение является справедливым вне зависимости от того направления, в котором мы движемся по кривой.) Анализ Бардина, приложенный к рис. П.1, показывает, что практически ньютоновские модели в нижнем правом углу (которые сжимаются, когда они излучают) являются устойчивыми, и они должны терять устойчивость и колапсировать для того, чтобы образовать черную дыру, когда они достигают минимума кривой связи; эти модели за точкой минимума (включая все модели Фейнмана) обладают одной неустойчивой модой радиальной пульсации; эти модели за первым пиком в кривой связи (верхняя левая часть рис. П.1) обладают двумя неустойчивыми модами и т.д.

Фейнман, конечно, не отдавал себе в этом отчет 28 января 1963 года; так что он приступил к лекции 14 для того, чтобы достичь понимания относительно устойчивости его моделей с помощью других методов. Он представляет себе, что взята одна из таких моделей сверхзвезды с барионной массой покоя  $M_{rest}$  и затем этот объект раскалываем на две сверхзвезды, каждая из которых имеет массу покоя  $M_{rest}/2$ , в то время как сохраняется фиксированное значение энтропии на один нуклон. "Получим ли мы работу в результате этого процесса, или мы должны затратить работу для того, чтобы получить [звезды], расколотую на две части?" Из его таблицы 1 и уравнений (14.2.1a-14.2.1b) он выводит, что "два объекта ... должны были быть более массивными; требуется работа для того, чтобы расколоть такую систему. Это наводит на мысль о том, что звезда не могла бы выбрасывать вещество, но сохранялась бы в одном коме", т.е. звезда могла бы быть устойчивой.

На первый взгляд это кажется убедительным аргументом. Тем не менее, на самом деле этот аргумент является обманчивым (как осознал Фейнман предположительно где-то между этой лекцией и семинаром Хойла). Эти две новые звезды, которые Фейнман образовал, раскололи свою первоначальную звезду, находятся много выше толстой кривой энергии связи, изображенной на рис. П.1, т.е. они много более релятивистские, чем первоначальная звезда. Тем не менее, имеются также две звездных модели с теми же самыми значениями массы покоя и энтропии на нуклон, на устойчивой, почти ньютоновской ветви кривой связи в нижнем правом углу рис. П.1.

Если первоначальная звезда разбивается на эти две звезды, то будет выделяться энергия, что правильно наводит на мысль о том, что первоначальная звезда является на самом деле неустойчивой. Фейнман пропустил эту аргументацию потому, что ни он, ни кто-либо 28 января 1963 еще не знали вида кривой связи в затененной области. Разумно сделать предположение, тем не менее, что он сделал достаточно много предположений, связанных с этим вопросом, до того, как на семинаре Хойла была замечена его ошибка.

Проведя неверный анализ устойчивости звезд, Фейнман переходит в разделе 14.4 к тому, чтобы предложить направления дальнейших исследований сверхзвезд. Он начинает с предложения вариационного принципа, с помощью которого можно построить равновесные модели полностью релятивистских, изэнтропических сверхзвезд: "найти конфигурацию с наименьшей массой, исходя из заданного числа нуклонов" (и с заданной энтропией на нуклон). Два года спустя работающий в Париже Джон Кок [Cock 65] разработал, предположительно независимо от предложения Фейнмана, детальный вариационный принцип, эквивалентный фейнмановскому (в котором сохраняется масса и число нуклонов и максимизируется энтропия), и использовал этот принцип для построения общерелятивистских звездных моделей.

Фейнман в разделе 14.4 продолжает свои рассуждения словами: "После того, как мы исследовали статические решения, мы можем повернуть наше внимание к полной динамической задаче. Дифференциальные уравнения выглядят ужасающе". Фактически, Фейнман выписал сам такие уравнения. Они впоследствии были выведены независимо и решены численно М.А. Подурцом [Podu 64] в СССР<sup>1</sup> и Майклом Мейем и Ричардом Уайтом [MaWh 66] в США, с использованием потомков компьютерных алгоритмов, которые были разработаны для создания ядерного оружия. Этот результат хорошо известен: звезды, которые испытывают релятивистскую неустойчивость Фейнмана – Чандraseкара, взрываются внутрь для того, чтобы образовать черные дыры.

В течении примерно 10 лет после прочтения Фейнманом лекции 14 вращающиеся сверхзвезды остаются сильным соперником на рынке всевозможных моделей квазаров и сильных радиоисточников, характеризующихся огромным энерговыделением. Постепенно в 1970-х годах модели, основанные на быстро вращающихся сверх массивных черных дырах, приобрели господство; и сегодня сверх массивные звезды обычно рассматриваются как достаточно привлекательные, но

<sup>1</sup> Вид уравнений, решаемых по разностной схеме, которая была составлена В.Л.Загускиным, в работе М.А. Подурца следует признать неудачным из-за наличия в них корневой особенности, и их нельзя использовать в случаях, когда сжатие может смениться расширением. Впоследствии эта особенность была устранена более удачным выбором переменных [ННП 78\*]. (Прим. перев.)

нестационарные объекты в ядрах галактик, движущиеся (по эволюционной траектории) в сторону образования сверхмассивных черных дыр, что впоследствии приводит к их преобладанию над сверх массивными звездами [Thor 94].

### Черные дыры

Понятие черной дыры только появлялось в начале 60-х годов, и взгляды Фейнмана могли быть слегка позади концепций, существовавших в то время. Таким образом, наиболее серьезно устаревшими являются вероятно лекции 11 и 15, в которых рассматривается решение Шварцшильда и его приложения.

В некотором смысле то, что мы теперь называем черной дырой, уже было известно в 1916 году, когда Карл Шварцшильд нашел свое решение полевого уравнения Эйнштейна [Schw 16]. Но в течении десятилетий большая часть физиков упорно сопротивлялись таким "возмутительным" приложениям решения Шварцшильда. (Эта часть физиков включала в себя и самого Эйнштейна, который написал в 1939 году вызывающую сожаление статью, в которой доказывал, что черные дыры не могут существовать [Eins 39]). Даже замечательный и вполне определенный анализ (опубликованный также в 1939 году) гравитационного коллапса, проведенный Оппенгеймером и Снайдером [OpSn 39], оказывал удивительно малое влияние на научную общественность в течении многих лет. Оппенгеймер и Снайдер изучили коллапс сферически симметричной "звезды" с однородной плотностью и нулевым давлением и заметили, что такой взрыв звезды внутрь, как это видит стационарный наблюдатель, который остается вне коллапсирующей звезды, будет медленно приближаться и, в конце концов, застынет, когда поверхность звезды приблизится к сфере Шварцшильда. Кроме того, они ясно показали, что никакого такого "застывания" коллапса не видели бы наблюдатели, движущиеся вместе с коллапсирующей материей, такие наблюдатели должны были бы пересечь критическую поверхность за конечное собственное время, и с того времени они не могли бы послать сигнал, который мог бы достигнуть наблюдателя, находящегося вне коллапсирующей звезды. Это предельное отличие между описанием в двух различных системах отсчета доказывается исключительно сложно для легкого восприятия. Эти два описания не были приведены в соответствие до 1958 года, когда Давид Финкельштейн [Fink 58] проанализировал решение Шварцшильда, используя координатную систему, что позволило наглядно представить себе одновременно мировые линии полевых частиц, которые падают внутрь критической поверхности, и мировые линии выходящих фотонов, которые застывают на критической

поверхности. Этот анализ открыл необычную "структуре причинности" пространства Шварцшильда: ничто, находящееся внутри "горизонта", не может избежать того, чтобы быть затянутым внутрь сферы все меньшей и меньшей площади. Появившаяся картина указала (некоторым ученым), что как только звезда падает через критическую поверхность, ее сжатие, которое приводит к образованию пространственно-временной сингулярности, становится неизбежным. То, что это на самом деле верно независимо от любых предположений, идеализирующих картину, таких как сферическая симметрия и нулевое давление, было доказано Роджером Пенроузом в 1964 году [Penr 65].

Таким образом, время чтения лекций Фейнмана по гравитации является неудачным. "Золотая эпоха" исследований черных дыр только начиналась, в течение следующего десятилетия было достигнуто значительное понимание сути физики этого явления. Эти результаты, которые не могли быть предугаданы в 1962 – 63 году, полностью преобразовали изучение общей теории относительности и способствовали созданию новой дисциплины – релятивистской астрофизики.

В 1962 – 63 году взгляды Фейнмана на решение Шварцшильда находились под большим влиянием Джона Уилера. Уилер в течение многих лет считал, что заключения Оппенгеймера и Снайдера не могут вызывать доверия; он находил их физически неразумными. Даже в 1958 году он отстаивал то, что если при анализе гравитационного коллапса использовать более реалистичное уравнение состояния, то могут быть получены качественно отличные результаты [HWWh 58]. (Эта точка зрения оказалась менее надежной, когда структура причинности геометрии черной дыры стала соответствующим образом понята). Постепенно, тем не менее, Уилер пришел к тому, чтобы принять неизбежность гравитационного коллапса, приводящего к образованию черной дыры в соответствии с заключениями Оппенгеймера и Снайдера. (Этому сдвигу точки зрения Уилера способствовали результаты Мартина Крускала [Krus 60], который независимо от Финкельштейна, также прояснил структуру причинности черной дыры; фактически, столь значительная статья Крускала была в большей степени написана Уилером, хотя некоторые интуитивные догадки и вычисления принадлежали Крускалу). Но в течение тех лет, когда он был скептически настроенным, Уилер реагировал довольно специфическим способом, он редко упоминал результаты Оппенгеймера - Снайдера в своих публикациях. Это обнаруживается, когда в разделе 11.6 Фейнман делает замечание о том, что стоило

бы поинтересоваться изучением коллапса пыли. Он кажется не знающим того, что Оппенгеймер и Снайдер детально изучили коллапс пыли 23 года тому назад! В разделе 15.1 он рассуждает, основываясь на (неверных!) размышлениях лекции 14, что звезда, образованная из "реального вещества", не может коллапсировать внутрь ее критической поверхности.

Фейнман приводит несколько ссылок на программу "геометродинамики", которую Уилер развивал, начиная с середины 50-х годов, и все еще продолжал ее развивать (может быть менее энергично) в 1962 году; см. [Whee 62]. Уилер и его соавторы надеялись проинтерпретировать элементарные частицы как геометрические объекты, возникающие из (квантовых версий) классических решений гравитационных полевых уравнений при отсутствии материи. Уилер в особенности был увлечен концепцией "заряда без заряда"; он отмечал, что если силовые линии электрического поля захватываются нетривиальной топологией "кротовой норы" в пространстве, то каждая горловина кротовой норы должна была бы появляться как точечный заряженный объект для наблюдателя, чье разрешение оказывается недостаточным для того, чтобы ощутить эту малосенькую горловину [MiWh 57]. Уилер подчеркивал, что решение Шварцшильда обладает пространственными сечениями, в которых две асимптотически плоских области связываются узкой горловиной, и таким образом, реализует модель геометрии кротовой норы, которую Уилер представлял себе.

Фейнман явным образом был влюблена в понятие кротовой норы, он описывает эти идеи кратко в разделе 11.5 и затем в разделах 15.1 и 15.3. Заметим, что Фейнман называет звезду, ограниченную внутри своего гравитационного радиуса, "кротовой норой"; термин "черная дыра" не был придуман (Уилером) до 1967 года. Для того, что мы называем теперь "горизонтом" черной дыры, Фейнман использует более старый термин "сингулярность Шварцшильда". Это особенно неудачный оборот речи, поскольку при этом имеется риск внести путаницу с действительной сингулярностью, областью в центре черной дыры, где имеется бесконечная кривизна. Фейнман никогда подробно не обсуждает эту настоящую сингулярность.

- К 1962 году структура причинности решения Шварцшильда была достаточно хорошо понята. Она достаточно хорошо пояснена Фаллером и Уилером в работе [FuWh 62], т.е. в работе, на которой, как упоминает Фейнман, основано изложение в разделе 15.1. (В этой работе, одной из очень немногих, цитируемых в лекциях Фейнмана, использовались координаты Крускала для того, чтобы построить полную,

аналитически продолженную геометрию Шварцшильда, и предстается "диаграмма Крускала", которая явно демонстрирует свойства времениподобных и нулевых геодезических). Фейнман цитирует основной вывод: решение Шварцшильда не является на самом деле кротовой норой того рода, которым интересуется Уилер, поскольку горловина кротовой норы является на самом деле динамическим объектом и сожмется до того, как любая частица сможет пересечь эту горловину. Тем не менее, в работе Фаллера и Уилера не упоминались никакие более широкие приложения этой структуры причинности для проблемы гравитационного коллапса, и Фейнман не демонстрирует понимание таких приложений.

Можно также увидеть из комментариев Фейнмана, сделанных в разделах 15.2 и 15.3, что он не понимал структуры причинности решения ("Райсснера – Нордстрема"), описывающего заряженную черную дыру, которая рассматривалась в работе Грейвса и Брилла 1960 года [GrBr 60]. Приведем замечание "... не представляется немыслимым, что может оказаться, что отраженная частица вылетает наружу раньше, чем она влетает внутрь!" Фактически, в аналитически продолженной геометрии геодезическая проходит в "новую вселенную" за конечное собственное время скорее, чем выходит обратно из черной дыры (см., например, [HaEl 73]). Тем не менее, известно, что внутренняя часть этого решения является неустойчивой при действии общих возмущений [ChHa 82]; для "реалистического" случая заряженной черной дыры, образуемой в процессе гравитационного коллапса, ситуация является качественно отличной и остается все еще не понятой до конца, хотя кажется в высшей степени вероятным, что ядро дыры является настолько сингулярным, что ничто не может перейти в "новую вселенную", по крайней мере в области общей теории относительности [BBIP 91].

### *Гравитационные волны*

Очень давно в 1957 году на конференции в Чапел Хилле еще было возможно проводить серьезное обсуждение того, предсказывает ли теория Эйнштейна существование гравитационного излучения [DeWi 57]. Это недоумение возникло в значительной степени потому, что это довольно тонкая материя, как определить строго энергию, переносимую гравитационной волной, затруднение состоит в том, что гравитационная энергия не может быть выражена через интеграл локально измеряемой плотности.

На этой конференции в Чапел Хилле Фейнман направил этот вопрос в прагматическое русло, описывая, как антенна гравитационных волн могла бы быть в принципе сконструирована так, чтобы она

могла бы поглощать энергию, "переносимую" этой волной [DeWi 57, Feyn 57]. В лекции 16 он явным образом приводит к описанию варианта такого прибора, когда эти записи резко обрываются: "Следовательно, мы покажем, что они [гравитационные волны] могут на самом деле нагревать стену, так что нет вопроса относительно содержания энергии в гравитационных волнах". Вариант антенны Фейнмана был опубликован Бонди [Bond 57] вскоре после конференции в Чапел Хилле (заметим иронически, что когда-то Бонди высказывался скептически относительно реальности гравитационных волн), но Фейнман никогда ничего не публиковал на эту тему. Наилучшее оставшееся описание этой работы содержится в письме к Виктору Вайсскопфу, написанному в феврале 1961 года [Feyn 61]. Это письмо содержит кое-что из того же материала, что и был изложен в лекции 16, но затем Фейнман продвигается несколько дальше и выводит формулу для мощности, излучаемой в квадрупольном приближении (этот результат также цитировался на конференции в Чапел Хилле). Затем это письмо описывает фейнмановский детектор гравитационных волн: это просто две бусинки, свободно скользящие (но с малым трением) по твердому стержню. Когда волны проходят через стержень, атомные силы оставляют длину стержня фиксированной, но соответствующее расстояние между двумя бусинками осциллирует. Таким образом, две бусинки трут стержень, выделяя в результате тепло. (Фейнман включил это письмо в Вайсскопфа в материал, который он распространял среди студентов, слушающих его курс лекций).

Несмотря на то, что заключения Фейнмана могли казаться спорными некоторым участникам конференции в Чапел Хилле, эти выводы о гравитационных волнах едва ли были новыми. На самом деле, в классическом учебнике Ландау и Лифшица, который был написан на русском языке в 1939 году и появился в английском переводе в 1951 году [LaLi 51], имеется несколько разделов, посвященных теории гравитационных волн. Их изложение было ясным и правильным, однако было проведено в характерной сжатой манере. В письме к Вайсскопфу Фейнман вспоминает конференцию 1957 года и комментирует ее: "Для меня было удивительным обнаружить, что целый день на конференции был посвящен этому вопросу и что "эксперты" были смущены. Это обсуждение возникло из поисков тензоров, сохраняющих энергию и т.д., вместо того, чтобы спрашивать о том, "могут ли эти волны производить работу?" "

На самом деле, несмотря на его глубокое почтение к Джону Уилеру, Фейнман испытывал в конце 50-х годов и начале 60-х нескрываемое презрение к сообществу специалистов по общей теории отно-

сительности. Это возможно наиболее резко выражалось в письме к его жене Гвенет, которое он написал с конференции в Варшаве в 1962 году [Feyn 88]:

Я ничего не получил на этой конференции. Я не узнал ничего нового. Поскольку в этой области нет экспериментов, эта область науки находится в неактивном состоянии, так что только очень немногие из лучших людей работают в ней. Результат состоит в том, что здесь имеется огромное количество дурмана и это сказывается неблагоприятным образом на моем артериальном давлении: такие бессмысленные вещи говорятся и серьезным образом обсуждаются, что я спорю с участниками вне формальных сессий (скажем, на ланче) всякий раз, когда кто-либо задает мне вопрос или начинает мне рассказывать о своей "работе". Эта "работа" всегда является: (1) полностью непонятной, (2) неясной и неопределенной, (3) кое-что правильно, что является ясным и самоочевидным, но что разрабатывается с помощью длинного и трудного анализа и представляется как важное открытие, или это (4) некоторая претензия, основанная на глупости автора, относительно некоторого очевидного и правильного факта, принятого и проверенного много лет назад; фактически, претензия, которая является неверной (это является хуже всего: никакие доводы не убедят глупца), (5) попытка сделать что-либо, вероятно, невозможна, но определенно не имеет никакой пользы, и эта попытка, как в конце концов обнаруживается, приводит к провалу или (6) очевидным образом является неверной. В эти дни проводится огромная "деятельность в этой области", но эта деятельность главным образом состоит в демонстрации того, что прельзущая "деятельность" кого-то еще приводит к ошибке или не приводит ни к чему полезному или приводит к чему-то, что подает надежды. Это выглядит как множество червяков, пытающихся вылезти из бутылки, переползающих один через другого. Это не потому, что задача трудна, это потому, что лучшие люди занимаются другими вещами. Напомни мне о том, чтобы не ездить больше ни на какие конференции по гравитации!

Столь экстремальная оценка не могла бы быть полностью оправдана даже в 1962 году, и не кажется вероятным, что это письмо отражает истинные ощущения Фейнмана со 100-процентной точностью. Брайс Де Витт, который принимал участие в конференциях в Чапел Хилле и Варшаве, предложил такой комментарий:

Я могу определенным образом симпатизировать реакции Фейнмана к конференции в Варшаве, потому что у меня были подобные ощущения. (У меня жив в памяти выход там его

эмоций, которые выплеснулись в сторону Иваненко через самую изощренную брань, какую я только слышал). Но те, кто опубликовал его частное письмо без описания полной картины, наносят ущерб исторической правде. Хотя он и думал, что некоторая часть дискуссии на конференции в Чапел Хилл не имела смысла (как впрочем думал и я), я считаю, что у него там было достаточно много полезно проведенного времени. Я помню, что он был довольно заинтересован, когда я показывал ему, что его интеграл по траекториям в искривленном конфигурационном пространстве приводит к уравнению Шредингера со скалярным членом Риччи в нем. Специалисты, которые были на этой конференции (такие как Бонди, Хойл, Шиама, Меллер, Розенфельд, Уилер), не являлись глупцами и достаточно умно вели беседу с Фейнманом. (Я сам выбирал участников конференции – это была закрытая конференция). Определенно, что опыт Фейнмана его участия на конференции в Чапел Хилле должен был оказывать какое-то влияние на его намерение принять приглашение для участия в конференции в Варшаве (этот конференция была открытой). Даже на конференции в Варшаве он и я проводили обсуждения вне формальных сессий, и я пытаюсь не верить тому, что он на самом деле определил меня в одну из шести категорий, упоминаемых в его письме.

Однако, эмоциональные комментарии Фейнмана, могли ли бы они иметь или не иметь место в 1962 году, должны были бы вскоре прекратиться. Начиналась заря "золотой эры" исследований черных дыр.

### *Философия*

Замечательной особенностью этих лекций является то, что Фейнман часто обращается к философским вопросам. (Он обычно выказывал презрение к философам науки и к слову "философский", которое он любил насмешливо произносить как "фило-ЗАВ-ский", тем не менее, он почитается, по крайней мере, физиками за свои философские рассуждения). Например, в разделе 1.4 он рассуждает о том, действительно ли необходимо применять квантовую механику к макроскопическим объектам. (Аргумент, который он кратко описывает там для того, чтобы поддержать требование того, что квантование гравитации в действительности необходимо, был представлен на конференции в Чапел Хилле в 1957 году, где это вызвало оживленную дискуссию). Другой пример – это его пристрастие к принципу Маха. Идея Маха, состоящая в том, что инерция возникает из взаимодействия тела с удаленными телами, порождает неясное сходство с интерпретацией электродинамики, предложенной Фейнманом и Уилером, когда Фей-

нман был студентом [WhFe 45, WhFe 49], состоящей в том, что сила реакции излучения, действующая на ускоряющийся заряд, возникает от взаимодействия с удаленными зарядами вместо того, чтобы возникать от взаимодействия с локальным электромагнитным полем. Так что не слишком удивительно, что в разделах 5.3 и 5.4 кажется, что Фейнман выражает симпатию ко взглядам Маха. Он нашупывает квантово-механическую формулировку принципа Маха в разделе 5.4 и вновь рассматривает принцип Маха в космологическом контексте в разделе 13.4. Нежелание Фейнмана в разделах 9.4 и 15.4 принять идею кривизны без источника вещества также отдает идеями Маха.

Философские размышления выходят на первый план в большом числе кратких отвлечений от основной темы. В разделе 8.3 Фейнман оценивает значение утверждений, что пространство является "в действительности" искривленным или плоским. В разделе 7.1 он объясняет, почему второй закон Ньютона не есть просто тавтология (а определение "силы"). Он делает несколько попыток обсуждения строгости построения теории в разделе 10.1 ("факты составляют существо дела, а не доказательства") и в разделе 13.3 ("нет такого способа показать математически, что физическое заключение является неверным или непоследовательным"). А в разделе 13.4 он подвергает сомнению то представление, что простота должна быть руководящим принципом в поиске истины о Природе: "... простейшее решение, намного превосходящее все остальные решения, было бы такое решение, где нет ничего, так что не было бы совсем ничего во вселенной. Природа многое более изобретательна, чем такая картина, так что я отвергаю то, чтобы носиться с мыслью о том, что Природа всегда должна быть просто устроена."

Это также обнаруживается, когда Фейнман упрямо занимается обсуждением в разделах 2.3 и 2.4 беспersпективной идеи, состоящей в том, что гравитация вызвана обменом нейтрино. Это предметный урок того, как Фейнман понимает то, как ученый должен реагировать на появление нового экспериментального феномена: он должен всегда внимательно искать объяснение на языке известных принципов перед тем, как начать увлекаться рассуждениями о новых законах. Несмотря на это, в то же самое время Фейнман подчеркивает снова и снова важность сохранения скептицизма относительно принимаемых идей и сохранения мысли открытой для идей, которые "падают хлопьями". Квантовая механика может потерпеть неудачу (разделы 1.4 и 2.1), вселенная может быть неоднородной на больших масштабах (разделы 12.2 и 13.2), может оказаться, что верна модель стационарной вселенной (раздел 13.3), может быть оправдана интуиция Уилера

относительно кротовых нор (раздел 15.3) и т.д.

### *Однопетлевая квантовая гравитация*

Исследования Фейнмана в области квантовой гравитации привели его в конце концов к конструктивному открытию (которое, тем не менее, не описано в этой книге, за исключением краткого упоминания в разделе 16.2). Это открытие состоит в том, что поле "духа" должно вводиться в ковариантную квантованную теорию для того, чтобы сохранить унитарность в однопетлевом порядке теории возмущений. Время этого открытия может быть установлено довольно точно. Фейнман докладывал этот результат в своем сообщении на конференции в Варшаве в июле 1962 года [Feyn 63b] и привел комментарий относительно того, что проблема унитарности в однопетлевом порядке была "полностью приведена в порядок только за неделю до того, как я приехал сюда". Таким образом, все эти результаты получены им до того, как он читал лекции по гравитации.

Вычисляя однопетлевые амплитуды с использованием наивных ковариантных правил, Фейнман обнаружил, что вклады состояний нефизической поляризации гравитона не удается полностью сократить, что приводит к нарушению унитарности. Некоторое время он был не в состоянии решить эту загадку. Затем Мюррей Гелл-Манн посоветовал Фейнману, чтобы тот попытался проанализировать простейший случай безмассового поля теории Янга – Миллса (Гелл-Манн напоминает, что он высказал это предложение в 1960 году [Gell 89].) Фейнман обнаружил, что он мог бы решить эту проблему в теории Янга – Миллса в однопетлевом приближении, и затем, что можно использовать этот метод для гравитации. В своем сообщение в Варшаве Фейнман докладывает, что он решил проблему унитарности в однопетлевом приближении, но теперь он вновь застрял и не знает как обобщить этот метод на случай двух и более петлей. Тем не менее, он выражает: "Джентльмены, у меня была всего одна неделя". Однако он никогда не разрешил эту проблему.

Был интересный обмен мнениями во время, когда задавали вопросы по докладу Фейнмана в Варшаве [Feyn 63b],<sup>1</sup> и Брайс Де Витт давил на Фейнмана для выяснения больших деталей относительно того, каким образом унитарность достигается в однопетлевом порядке, а Фейнман сопротивлялся. Но Де Витт настаивал, и наконец Фейнман смягчился и предложил длинное объяснение, предварив его комментарием "Сейчас я покажу вам, что тоже могу написать уравнения, которые никто не сможет понять." Это было забавно, поскольку в конце концов именно Де Витт [DeWi 67a, DeWi 67b] (а также независимо Фаддеев и Попов [FaPo 67]) решили проблему обобщения ковариантного квантования теории Янга – Миллса и гравитации на произвольный петлевой порядок. Стоит заметить, что собственная техника Фейнмана интегрирования по траекториям оказала решающее значение для получения этой общей формулировки и что наиболее полные

<sup>1</sup> Русский перевод этого доклада опубликован в журнале [Грав 96\*]. (Прим. перев.)

результаты Де Витта и Фаддеева – Попова явным образом были вызваны построением Фейнмана для однопетлевого приближения.

Последние лекции Фейнмана по теории гравитации (которые не воспроизведены в этой книге) имеют отношение к петлевым поправкам в квантовой гравитации и теории Янга – Миллса. Он описывал результаты в однопетлевом приближении, которые докладывались в Варшаве, и его попытки обобщить эти результаты на более высокие порядки. По общему мнению эти лекции были переусложнены и трудны для того, чтобы следовать ходу их рассуждений, и иногда в лекциях очевидным образом ощущалось крушение планов. Мы предполагаем, что Фейнман испытывал замешательство от того, что проваливались его попытки найти удовлетворительную формулировку обобщения теории возмущений, поэтому он никогда не разрешал распространение записей этих лекций.

Фейнман написал детальный отчет о своих результатах только много позднее [Feyn 72] в двух статьях для тома в честь 60-летнего юбилея Джона Уилера. Эти статьи никогда не были бы написаны, если бы не было постоянного приставания одного из нас (К. Торна). По взаимному соглашению Торн звонил Фейнману домой раз в неделю в заранее установленное время для того, чтобы напомнить ему, что необходимо поработать над статьей для праздничного тома в честь Джона Уилера. Это продолжалось до тех пор, пока статьи не были полностью завершены. Было ясно, что Фейнман вернулся к квантовой гравитации только с некоторыми страданиями и сожалением.

Одна из целей Фейнмана состояла в том, чтобы навести порядок в вопросе о перенормируемости этой теории. На конференции в Варшаве он говорил, что он не уверен в том, что эта теория может быть перенормируема, но в разделе 16.2 он приводит более сильное утверждение: "Я полагаю, что эта теория не перенормируема." Даже это утверждение Фейнмана звучит сейчас для нас удивительно осторожно. В любом случае Фейнман всегда относился неохотно к тому, чтобы использовать перенормируемость в качестве критерия для оценки теории, и он открыто заявляет в разделе 16.2, что он не знает, является ли неперенормируемость "действительно существенным возражением".

### *Заключение*

Любая книга по гравитации, подготовленная более 30 лет тому назад, неизбежно сегодня оказывается устаревшей, по крайней мере, в некоторых аспектах. Ясно, что эта книга не является исключением. Более того, мы считаем, что эти лекции не оправдали бы собственных ожиданий Фейнмана даже в то время, в которое они читались.

У него была надежда, что чтение этого курса поможет привести его работу по квантовой гравитации к связному заключению, но этого не произошло. В конце академического года (1962 – 63) стало очевидным для студентов, что Фейнман чувствует себя обескураженным и расстроенным. Таким образом, в соответствии с собственными желаниями Фейнмана лекции (от 17 до 27), которые были нацелены на обсуждение вопросов квантовой гравитации, не включены в эту книгу.

Однако, мы думаем, что в этой книге, содержащей лекции 1 – 16, много того, что будет оценено по достоинству физиками, студентами, историками и почитателями Фейнмана. Более того, эти лекции очень веселы. Многие отрывки предлагают мимолетный взгляд великого ума, обладающего большой глубиной обсуждения проблемы, и бросающие вызов вопросы, возникающие из рассмотрения проблемы в истинном свете. Фейнман размышлял долго и напряженно в течении нескольких лет, однако по этому вопросу он публиковал крайне мало. Это умные лекции и обладают характерной (для творчества Фейнмана) ясностью, и эти лекции являются содержательным добавлением к его уже опубликованному наследию, появление которых можно было бы приветствовать.

Мы благодарны Джиму Бардину, Стенли Дезеру, Брайсу Де Витту, Уилли Фаулеру, Стиву Фраутчи, Джуди Гудстейн, Джиму Хартлю, Ико Ибену, Бобу Крайчману, Чарльзу Мизнеру, Фернандо Морингиго, Джиму Пиблсу, Аллану Сенделджу и Биллу Вагнеру за ценную помощь, которая была использована при подготовке этого предисловия.

*КАЛТЕХ, май 1995 года*

Джон Прескилл и Кип С. Торн