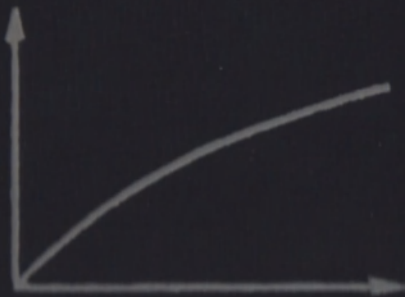


В. Л. Гинзбург

О ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ





АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН.

(фотография относится к периоду 1902 — 1909 гг., когда А. Эйнштейн работал в бюро патентов в г. Берне, Швейцария).

В. Л. Гинзбург

**О ТЕОРИИ
ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ**

Сборник статей



МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1979

22.313
Г 49
УДК 530.1

Г и н з б у р г В. Л. О теории относительности: Сб. статей.— М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979.

Частная и общая теории относительности занимают в современной физике, а также в астрофизике и космологии одно из центральных мест. Статьи, включенные в сборник, посвящены либо непосредственно теории относительности, либо тесно связанным с ней вопросам. Так, статья «Как устроена Вселенная и как она развивается во времени» представляет собой довольно элементарное введение в релятивистскую космологию. В статье «О сверхсветовых источниках излучения», рассчитанной на более подготовленных читателей, рассматриваются источники излучения, движущиеся со сверхсветовыми скоростями. Другая статья освещает состояние экспериментальной проверки общей теории относительности. В нескольких статьях внимание сосредоточено на истории создания теории относительности и ее основах.

Г $\frac{20402-096}{053(02)-79}$ 118-79. 1704020000

© «Наука». Главная редакция
физико-математической
литературы, 1979

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
ГЕЛИОЦЕНТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА И ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ (от Коперника до Эйнштейна)	7
1. ПТОЛЕМЕЙ	
2. КОПЕРНИК	11
3. ЧТО ЕСТЬ ИСТИНА?	17
4. ВОЗРОЖДЕНИЕ «БОРЬБЫ ВОЗЗРЕНИЙ НА СТРОЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ» ИЛИ НЕДОРАЗУМЕНИЕ?	22
5. НЬЮТОН	27
6. ЭЙНШТЕЙН	32
7. СОВРЕМЕННОСТЬ	49
КАК УСТРОЕНА ВСЕЛЕННАЯ И КАК ОНА РАЗВИВАЕТСЯ ВО ВРЕМЕНИ	62
КАКОЕ МЕСТО КОСМОЛОГИЯ ЗАНИМАЕТ В АСТРОНОМИИ	62
ПЕРВЫЕ КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ	64
О ЧАСТНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ	67
ОБ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ	71
СФЕРИЧЕСКИЙ МИР ЭЙНШТЕЙНА	77
НЕСТАЦИОНАРНАЯ КОСМОЛОГИЯ ФРИДМАНА И НЬЮТО- НОВСКИЕ МОДЕЛИ ВСЕЛЕННОЙ	80
КОСМОЛОГИЧЕСКОЕ КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ	85
РАДИОГАЛАКТИКИ И КВАЗАРЫ — СВИДЕТЕЛИ ДАЛЕКОГО ПРОШЛОГО	89
ЛЯМБДА-ЧЛЕН И КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛЕМЕТРА НАЗАД К «НАЧАЛУ». РЕЛИКТОВОЕ ТЕПЛОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ	93
ЕЩЕ БЛИЖЕ К «НАЧАЛУ»	97
КОСМОЛОГИЯ И ФИЛОСОФИЯ	100
КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМА	104
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	107
ПРИЛОЖЕНИЕ	111
	111

КАК И КТО СОЗДАЛ ТЕОРИЮ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ? (Опыт рецензии с предисловием и комментариями)	116
ПРЕДИСЛОВИЕ	116
РЕЦЕНЗИЯ	117
КОММЕНТАРИИ	124
1. ЧТО ТАКОЕ СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ?	125
2. КАК И КТО СОЗДАЛ СТОР	128
3. ЗАМЕЧАНИЯ О ПРИОРИТЕТЕ	133
4. ОБ ИСТОЧНИКЕ НАУЧНОГО ЗНАНИЯ	139
5. НАУКА И ПРАВСТВЕННОСТЬ	141
 АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН. СОБРАНИЕ НАУЧНЫХ ТРУДОВ (в четырех томах)	144
 ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОВЕРКЕ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ	157
 ПЕРЕХОДНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ПЕРЕХОДНОЕ РАССЕЯНИЕ	188
ВВЕДЕНИЕ	188
ПЕРЕХОДНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ	191
СЧЕТЧИКИ НА ПЕРЕХОДНОМ ИЗЛУЧЕНИИ	195
ОБ ОДНОЙ НЕУДАЧНОЙ ПОПЫТКЕ ИЗОБРЕСТИ СЧЕТЧИК ЧАСТИЦ (ЗАМЕЧАНИЕ АВТОБИОГРАФИЧЕСКОГО ХАРАКТЕРА)	199
ЕЩЕ РАЗ О ПЕРЕХОДНОМ ИЗЛУЧЕНИИ	202
ПЕРЕХОДНОЕ РАССЕЯНИЕ	204
ПЕРЕХОДНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ПЕРЕХОДНОЕ РАССЕЯНИЕ В ВАКУУМЕ ПРИ НАЛИЧИИ СИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ	208
ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ	210
 О СВЕРХСВЕТОВЫХ ИСТОЧНИКАХ ИЗЛУЧЕНИЯ	212
 БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ СПРАВКА	237

Имя Альберта Эйнштейна принадлежит к числу самых известных и заслуженно почитаемых в истории науки и всей человеческой культуры. Поэтому столетие со дня рождения Эйнштейна (14 марта 1979 г.) является значительным событием. Этот юбилей приобретает особое звучание в связи с тем, что Эйнштейн — один из величайших физиков всех времен, является нашим современником или, во всяком случае, принадлежит нашему веку. Более того, развитие физики и астрономии происходило таким путем, что общая теория относительности, являющаяся вершиной творчества Эйнштейна, именно в настоящее время особенно широко используется и развивается. В результате Эйнштейновский юбилей принадлежит не столько истории науки, сколько представляет собой явление современной жизни, причем не только научной, но и общественной, поскольку гражданская активность Эйнштейна также имела выдающееся прогрессивное значение для нашей эпохи.

Сказанное объясняет почему юбилей Эйнштейна будет отмечаться во всемирном масштабе и его предполагается ознаменовать большим числом специальных заседаний, симпозиумов и публикаций. Среди последних и издание трудов Эйнштейна, и сборники оригинальных работ, в которых развивалась теория относительности, и различные монографии по физике и истории физики и, наконец, научно-популярные статьи и книги.

Автор надеется, что среди всей этой литературы найдет свое место и настоящий сборник. В него включены статьи и рецензии, уже публиковавшиеся ранее, а также специально написанная статья об экспериментальной проверке общей теории относительности. Все статьи либо непосредственно касаются теории относительности, либо посвящены вопросам, тесно с ней связанным. В тех случаях, когда это казалось необходимым, в статьи были внесены различные изменения, уточнения или дополнения. Поскольку речь идет не об оригинальных работах, а о статьях обзорного, публицистического или научно-популярного типа, такой подход представляется естественным (характер внесенных изменений отмечен в библиографической справке, помещенной в конце сборника). По своему уровню статьи довольно

сильно отличаются друг от друга. Так, статья «Как устроена Вселенная и как она развивается во времени» рассчитана на широкие круги читателей. В то же время статья «О сверхсветовых источниках излучения» предназначена для физиков. Остальные статьи в отношении степени их доступности занимают промежуточное положение. Подобная неоднородность содержания имеет свои недостатки, но, с другой стороны, открывает перед читателями большую свободу выбора.

Появление большинства статей было обусловлено тем сильным впечатлением, которое на меня производили и производят научные труды, а также различные статьи и опубликованные выступления Эйнштейна. В этом впечатлении, только усиливающемся с годами, слито воедино и ощущение какой-то несравненной и совершенно недостижимой мощи и одновременно ясности и близости. Трудно передать это чувство, вероятно, оно родственно тому, которое испытывают, глядя на самые выдающиеся шедевры живописи, скульптуры или архитектуры. Вместе с тем ценить и любить произведения искусства, увлекаться искусством способны далеко не только профессионалы. Для того чтобы скульптура произвела впечатление, не нужно знать технику ее изготовления, свойства материала и т. п. В физике же положение другое — чтобы увидеть красоту физических построений, образов, идей и результатов, необходимо в той или иной мере знать физику. Поэтому, очевидно, нельзя просто раскрыть перед читателем работу Эйнштейна и сказать: смотрите, как это замечательно. Другими словами, если искусствоведческие пояснения, во всяком случае, не обязательны, а иногда вызывают даже чувство досады, то существование научно-публицистической и научно-популярной литературы просто необходимо. Коротко говоря, почти все включенные в сборник статьи были написаны потому, что это давало выход чувству восхищения теорией относительности и стремлению способствовать лучшему пониманию ее основ, истории создания и развития. Совершенно ясно, что содержащийся в сборнике материал — это только капля в море, но по своему характеру и целям, как я надеюсь, он подходит для одного из изданий, приуроченных к юбилею Эйнштейна.

Апрель 1978 г.

В. Л. Гинзбург

Гелиоцентрическая система и общая теория относительности

(от Коперника до Эйнштейна)

С радостью и благодарностью мы чтим сегодня память человека, который больше, чем кто-либо другой на Западе; способствовал освобождению умов от церковных оков и догматизма в науке... В наше время нелегко постигнуть, какая независимость мысли, редкая интуиция и мастерское владение астрономическими фактами были нужны для доказательства превосходства гелиоцентрических воззрений. Это великое достижение Коперника не только проложило дорогу к современной астрономии; оно способствовало также решительному изменению отношения людей к космосу...

А. ЭЙНШТЕЙН. К 410-й
годовщине со дня смер-
ти Коперника [1]

От Коперника, через Галилея, Кеплера и Ньютона к Эйнштейну и к нашим дням пролегает дорога длиной почти в пять столетий, по которой проходило развитие механики и теории всемирного тяготения. История этого развития, драма идей, с трудом пробивавших себе путь, представляют большой интерес. К сожалению, теме Коперник — Эйнштейн (или теме гелиоцентрическая система и общая теория относительности) в нашей литературе последних десятилетий в общем-то не повезло. Чаще всего дело сводилось к нескольким цитатам из популярной литературы (в том числе, как казалось, из «самого Эйнштейна»), в которых борьба между воззрениями Птолемея и Коперника объявлялась, в свете общей теории относительности, беспредметной или бессмысленной. Подобные утверждения затем опровергались с помощью аргументов, тон и содержание которых в значительной мере определялись

не существом вопроса, а господствующим в соответствующий момент стилем полемики. Тем самым создавалось впечатление о какой-то причастности если не самой общей теории относительности, то по крайней мере некоторых ее сторонников и пропагандистов к отрицанию прогрессивной роли коперниканства. Между тем последнее заключение беспочвенно, и, в частности, приведенные в качестве эпиграфа слова Эйнштейна говорят в этом отношении сами за себя. Несомненно, доказывать в наше время, сколь велика была роль Коперника, говорить о том, что он «не зря трудился», значит ломиться в широко открытую дверь. Вряд ли заслуживают сами по себе внимания и различные неточные или неудачные замечания и высказывания, встречающиеся в литературе, особенно в популярной, где авторы нередко больше всего заботятся о красоте слога и доступности изложения. Мне не раз приходилось поражаться, однако, сколь распространены неверные представления в отношении системы Птолемея, содержания труда Коперника и, наконец, действительной или мнимой связи гелиоцентрических представлений с общей теорией относительности. Поэтому, вероятно, не нуждается в специальном оправдании появление настоящей статьи, особенно в период, когда отмечается пятисотлетие со дня рождения Николая Коперника (1473—1543) и столетие со дня рождения Альберта Эйнштейна (1879—1955).

Необходимо вместе с тем подчеркнуть, что статья отнюдь не претендует на полноту, ее цель не выходит за пределы желания устранить некоторые недоразумения и содействовать более глубокому обсуждению материала. Другое дело, что некоторые замечания и заключения автора являются, вероятно, дискуссионными и могут вызвать возражения. Но это, само по себе, неплохо. Скорее, напротив, нет оснований писать статьи по вопросам, которые настолько всем ясны, что не вызывают никаких расхождений во взглядах.

1. ПТОЛЕМЕЙ

Первая развитая теория движения небесных тел (Солнца, Луны и планет), позволяющая вычислить их положение на небе, была создана в Древней Греции. Особенно выдающимся астрономом этой эпохи считается Гиппарх (II век до н. э.) Свое известное завершение астрономическая система греков нашла в труде Клавдия Птолемея (II век н. э.). В течение многих веков книга Птолемея «Синтаксис» (она получила название «Альмагест», что означает «величайшая») считалась венцом древней астрономии. Лишь в самое последнее время выяснилось [2], что Птолемей был недобросовестен в отношении сообщаемых им результатов астрономических наблюдений (попросту говоря, Птолемей подделывал те данные о положении небесных тел, которые он выдавал за свои

наблюдения). В этой связи можно поставить под сомнение и основную часть деятельности Птолемея, связанную с вычислением положений планет, и вообще усомниться в его репутации великого астронома. Однако этот вопрос в целом еще недостаточно ясен, а термин «система Птолемея» столь прочно укоренился, что изменить его не удастся. Во всяком случае, мы не будем этого делать в настоящей статье, условно связывая с именем Птолемея достижения древней астрономии, которые были вполне реальны и значительны ¹⁾. Подчеркнуть это обстоятельство необходимо в связи с тем, что система Птолемея у современной широкой публики ассоциируется с чем-то отжившим, мешавшим прогрессу науки, и т. п. Фактически же такое впечатление связано не с самой системой Птолемея, а с ее абсолютизацией церковью, с тем, что через много столетий после создания системы Птолемея она использовалась противниками коперниканства.

Как всем хорошо известно, система Птолемея является геоцентрической: в центре мира находится неподвижная Земля, вокруг которой вращаются Луна, Меркурий, Венера, Солнце, Марс, Юпитер и Сатурн. При этом движение небесных тел происходит так (в простейшем варианте): планета движется равномерно по малому кругу (эпициклу), центр которого тоже равномерно движется вокруг Земли по большому кругу (деференту). Интересно, что в более развитой схеме планетных движений Птолемей отказался [4а] даже от равномерного движения по кругу — этой философской догмы древних. Вообще Птолемей стремился в первую очередь объяснять наблюдения, факты и научиться предвычислять положение небесных тел, не заботясь особенно о требованиях современной ему философии. Это видно, например, из такого его высказывания: «Пусть не возражают против этих гипотез, что их трудно усвоить из-за множества способов, которыми мы пользуемся. Ибо какое сравнение можно сделать между земным и небесным и какими примерами можно было бы отразить вещи столь различные? Надлежит применять к небесным движениям, насколько это возможно, гипотезы простейшие; но, если их недостаточно, нужно отыскивать другие, более подходящие» [4б].

Оценить этот подход в должной мере можно, только не забывая о господствовавших тогда требованиях древних философов. Например, Платону (V—IV вв. до н. э.) приписывается такое положение: «Платон принимает, как основное правило, что небесные тела движутся круговыми, равномерными и вполне пра-

¹⁾ См. [3, 4а и 4б] и другие книги и статьи по истории астрономии. Мы не собираемся подробно останавливаться на соответствующем материале, но тем не менее приводим ниже довольно большое количество цитат, поскольку они весьма выразительны сами по себе и передают колорит эпохи. В ряде случаев, чтобы не загромождать изложение, ссылки на источники не приводятся, в основном это книги и статьи, которые мы цитируем.

вильными (т. е. направленными всегда в одну сторону) движениями, и он ставит тогда перед математиками следующую задачу: найти, с помощью каких, подлежащих заданию, равномерных и правильных круговых движений окажется возможным спасти явления, представляемые планетами».

Аристотель (IV в. до н. э.) считал необходимым, кроме того, чтобы вращение небесных тел происходило по окружностям, в центре которых находится Земля. Но без нарушения этого требования видимые на небе движения планет «спасти» никак не удавалось. Нужно было, напротив, предположить, что расстояние от планет и Луны до Земли изменится со временем. Так и появилась у Гиппарха и затем была развита Птолемеем уже упомянутая система с эпициклами. Система Птолемея с ее круговыми (но неравномерными) движениями вокруг пустых точек (центров эпициклов) решительно расходится с предначертаниями Платона, Аристотеля и их последователей. В средние века это привело даже к известной борьбе против системы Птолемея с аристотелевых позиций! Любопытно, что и Коперник в этом отношении был ближе к Аристотелю, чем Птолемей. Действительно, Коперник писал: «Тем не менее следует признать, что их движения должны быть круговыми или составленными из нескольких круговых. . .», так как «. . . только круг может возвратить прошедшее» и «. . . потому, что невозможно, чтобы первичное небесное тело двигалось неравномерно по одной орбите (на одном единственном круге). Ибо это может происходить или вследствие непостоянства движущей силы, или . . . вследствие несовершенства обращающегося тела. А так как и то и другое противно разуму, и недостойно предполагать что-либо подобное в том, что устроено в высшей степени совершенно, то следует допустить, что неравномерные движения тел кажутся нам неравномерными. . .» [5].

Упомянутые нападки (см. [46]) на систему Птолемея (так сказать, «критика справа») не имели особого успеха, видимо; только в силу реальных достижений построений и расчетов Птолемея и его последователей; эти расчеты справедливо характеризуются как «подлинная теоретическая астрономия» [4а]. Система Птолемея — это в общем-то Солнечная система, какой она видна с Земли. Разумеется, в таком смысле система Птолемея широко используется в астрономии и сейчас: астроном обычно определяет положение светила на небесной сфере в координатах, связанных с Землей, а уже затем производит переход к другим координатным системам.

При той точности наблюдений (около 10 минут дуги) и тех методах вычислений, которые существовали даже во время Коперника, расчеты на базе системы Птолемея хотя и с большим трудом, но отвечали требованиям, предъявлявшимся при составлении календаря (актуальная проблема в то время) и при предсказании

небесных явлений (затмения и т. п.). Это обстоятельство объясняет многое.

Становится понятным, или, точнее, более понятным, почему ростки гелиоцентрических воззрений, возникшие еще в древности, не разрослись и были почти забыты (последнее не относится к Копернику, который о них хорошо знал и их упоминает). Так, Аристарх Самосский (IV—III вв. до н. э.) поместил Солнце в центре, вокруг которого вращается Земля, вращающаяся также вокруг своей оси [3]. Но ни сам автор этой гелиоцентрической системы, ни другие астрономы, высказывавшие аналогичные идеи, не развили их до той степени, чтобы выдержать соревнование с несравненно лучше разработанной системой Птолемея. Только Коперник смог возродить гелиоцентрическую систему в результате не только физических аргументов, на которых мы еще остановимся ниже, но развив свою схему расчетов и создав новое руководство по астрономии, способное заменить собой руководство Птолемея. Но все же в чисто практическом плане (составление таблиц и т. п.) преимущества системы Коперника вплоть до работ Тихо Браге (1546—1601) и Кеплера (1571—1630) еще не были достаточно впечатляющими, эффективными в отношении наблюдаемых астрономических предсказаний. Тем самым становится ясной и одна из причин сравнительно медленной и очень трудной победы воззрений Коперника. Другие причины, более существенные, — это возражения физического характера и, наконец, роль церкви ²⁾. Система Птолемея была по сути дела канонизирована церковью и пронизала все мировоззрение эпохи; в качестве примера можно указать на то, что «Божественная комедия» Данте (1265—1321), в особенности ее третья часть «Рай», построена по схеме птолемеевой системы.

2. КОПЕРНИК

Достигнутая в рамках системы Птолемея высокая (по тем временам) точность расчетов предъявляла, естественно, большие требования к гелиоцентрической системе, способной соревноваться с уже развитой геоцентрической системой, — так можно резюмировать последнюю часть предыдущего раздела. Тем самым мы, однако, еще не касаемся причины, по которой древние приняли, развивали и совершенствовали именно геоцентрическую систему. Здесь нельзя сослаться и на церковь, ибо канонизация геоцентрической системы произошла позже, а не предшествовала ее распространению.

²⁾ Все три названные причины переплетались и их трудно разделить. Как поэтому, так и в силу недостаточного знакомства с первоисточниками (документами того времени) автору трудно определить удельный вес различных факторов, хотя это и небезынтересно.

Вряд ли можно сомневаться в том, что все дело просто в близости геоцентрической системы к непосредственному восприятию небесных явлений с Земли. Переход к гелиоцентрическим представлениям, легкий при современном развитии науки и культуры, был в древности и, разумеется, еще во времена Коперника труднейшим актом, требовавшим смелости мысли, умения абстрагироваться и т. д. По своему типу трудности здесь аналогичны возникшим на пути понимания шарообразности Земли, теории электромагнитного поля, теории относительности и квантовой механики. И всегда наблюдалось одно и то же: существенно новые представления возникали и, особенно, побеждали только под давлением фактов, которые все труднее и труднее становилось понимать, описывать и «спасать» на основе старых, менее совершенных схем и теорий. При этом, очевидно, чем меньше известно фактов, чем грубее измерения и наблюдения, тем легче оставаться на старых позициях и тем труднее доказать необходимость или хотя бы преимущество новых взглядов. История развития астрономии служит иллюстрацией этих утверждений, уже достаточно тривиальных в наши дни.

Вернемся поэтому непосредственно к теме статьи, отметив, что Птолемей знал о мнении, согласно которому Земля вращается, а небо неподвижно, и даже отмечал, что «при всей большой простоте такого построения, поскольку речь идет о явлениях звездного неба, ему ничто не препятствует». Но тут же Птолемей объявляет это мнение смешным и отбрасывает его, ссылаясь на физические соображения и взгляды, распространенные в то время. Эти соображения сводятся, по сути дела, к непониманию относительности движения, к мнению, что вращение Земли (а не неба) сказалось бы на земных явлениях: на вращающейся Земле бушевал бы ураган, все тела падали бы не вертикально и т. п. Подобную точку зрения Галилей (1564—1642) очень ясно изложил в «Послании к Инголи», написанном в 1624 г., т. е. примерно через столетие после того, как начала распространяться система Коперника. Галилей пишет: «Вместе с Аристотелем и другими Вы говорите: если бы Земля обращалась вокруг самой себя в 24 часа, то камни и другие тяжелые тела, падающие сверху вниз, например с высокой башни, не могли бы удариться о Землю у подножия башни, — указывая, что за то время, пока камень находился бы в воздухе, опускаясь к центру Земли, сама Земля, двигаясь с великой скоростью к востоку и неся на себе основание башни, по необходимости должна была бы оставить камень на таком же расстоянии позади себя, на какое за то же самое время ее уносит кружение; а это составило бы много сотен локтей» [6].

Все «Послание к Инголи», а оно занимает пятьдесят страниц печатного текста, как раз и посвящено опровержению подобных возражений против гелиоцентрической системы. Среди возраже-

ний были, конечно, и астрономические, а не только физические (цитированное замечание Птолемея не должно в этом отношении вводить в заблуждение). Так, по словам Галилея: «Все эти противники Коперника утверждают на основании своих вычислений, что годичное обращение Земли по ее орбите, производящее столь значительные и достойные изумления изменения положения планет, только в том случае не вызвало бы подобных же явлений в положениях звезд, если бы звездная сфера была настолько удаленной, что любая звезда могла бы обладать той видимой величиной, в какой она нами наблюдается. Но это, только если бы она сама была во много раз больше всей земной орбиты и, следовательно, во много тысяч раз превосходила размерами само Солнце; а все это они считают величайшей нелепостью. Однако мои вычисления обнаруживают, что дело обстоит совершенно иначе» [6].

Итак, физические и астрономические доводы против гелиоцентрической системы (речь идет отнюдь не о церковной догматике) серьезно обсуждались через столетие после смерти Коперника и выхода из печати в том же 1543 г. его основного труда. Что же здесь говорить о докоперниковском периоде. Вполне понятно поэтому, что одной из главных задач (и заслуг) Коперника было опровержение возражений против гелиоцентрических представлений. Действительно, Коперник ясно понял и сформулировал основы принципа относительности (пусть и в простейшем и неполном виде). Он пишет: «Ведь всякое видимое изменение положения происходит вследствие движения наблюдаемого предмета или наблюдателя или же вследствие перемещения, разумеется, неодинакового, их обоих. Ибо при равном движении того и другого, т. е. наблюдаемого и наблюдателя, в одном и том же направлении движение незаметно. Но Земля есть то место, с которого мы наблюдаем небосвод, откуда он открывается нашему взору. Следовательно, если предположить какое-нибудь движение у Земли, оно непременно будет обнаруживаться во внешних частях Вселенной, но как идущее в обратном направлении, как бы мимо Земли» [5].

Если здесь речь идет об относительности механического движения с точки зрения его наблюдения или, если угодно, о кинематической относительности (фиксировать можно лишь изменение взаимного расположения), то дальше Коперник переходит и к динамической относительности (равноправности равномерно и прямолинейно движущихся друг относительно друга систем отсчета)³⁾.

³⁾ С точки зрения не только Коперника, но и Галилея Земля рассматривалась и с доступной им точностью могла рассматриваться, говоря современным языком, в качестве инерциальной системы отсчета. Поэтому утверждение о том, что явления на корабле, равномерно и прямолинейно движущемся относительно Земли, происходят так же, как на самой Земле, полностью отвечает принципу относительности — утверждению о равноправности всех систем отсчета, равномерно и прямолинейно движущихся относительно какой-либо инерциальной системы отсчета.

Действительно, Коперник замечает: «И почему нам не отнести видимость суточного вращения к небу, а его действительность к Земле? . . . Потому что, когда корабль идет по спокойной воде, все, что находится вне его, представляется морякам движущимся в соответствии с движением корабля; сами же они со всем, с ними находящимся, будто бы стоят на месте. Это же, без сомнения, может происходить и при движении Земли, так что можно прийти к мнению, будто вращается вся Вселенная. Что же теперь сказать нам об облаках и обо всем остальном, так или иначе парящем, опускающемся и поднимающемся в воздухе, как не то, что движется не только суша вместе со связанной с ней водной стихией, но и немалая часть воздуха и все, что так или иначе соединено с Землей. . . .»

. . . Поэтому ближайший к Земле воздух вместе со всем в нем парящим должен казаться нам спокойным, если, как это случается, его не гонит то туда, то сюда ветер или любая другая внешняя сила» [5].

Привести эти довольно длинные выдержки здесь оказалось необходимым, чтобы подчеркнуть, что именно Коперник стоит у истоков современной механики и был в этом отношении прямым предшественником Галилея (называвшего, кстати, Коперника своим учителем).

Таким образом, первое основное достижение Коперника состояло в опровержении доводов против возможности движения Земли, в доказательстве допустимости такого предположения с точки зрения физики и астрономии.

Второе основное достижение, тесно связанное, разумеется, с первым, состоит в развитии самой гелиоцентрической системы. Ход рассуждений Коперника таков: «Итак, раз ничто не противоречит подвижности Земли, я полагаю, следует рассмотреть, приличествует ли ей также несколько движений, чтобы можно было считать ее одной из планет. Что она не есть общий центр всех обращений, доказывают явная неравномерность движения планет и непостоянство их расстояний до Земли, а это необъяснимо при помещении Земли в едином центре кругов концентрических. Если же существует несколько центров, то не напрасен будет вопрос и о центре мира, а именно, является ли им центр тяжести Земли или же нечто иное. По моему мнению, тяжесть есть не что иное, как естественное устремление, которым божественное провидение творца миров одарило части для сочетания и соединения их в единое целое в форме сферы» [5].

Предполагая затем, что Земля совершает годичное движение вокруг Солнца, Коперник указывает, что при этом «будет также очевидным, что стояния, попятные и прямые движения планет принадлежат не им, а Земле, которая как бы в обмен создает лишь видимость этих планетных движений. Отсюда придем к заключе-



АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН.

Скульптор Вадим Сидур, 1967 г. (бюст подарен Академией наук СССР Национальной лаборатории им. Ферми, Батавия, США).

нию, что в центре мира находится Солнце. Во всем этом нас убеждают строгий порядок последовательности и смены явлений и гармония всего мироздания».

Все эти цитаты приведены из первых нескольких глав первой книги сочинения Коперника «Об обращениях небесных сфер», состоящего из шести книг [7]. Большая часть остального, доминирующего по объему, текста посвящена расчетам движения небесных тел, пересчету на основе новой системы результатов наблюдений и вычислений, проведенных на базе системы Птолемея. То, что делает Коперник, — сегодня это решение довольно простой кинематической задачи: отнесение движения системы точек к новому центру. Но, не говоря уже о принципиальной стороне проблемы, во времена Коперника соответствующие пересчеты были сложны и громоздки. Последнее естественно также, если учесть, что фактически планеты неравномерно движутся по эллипсам (при неучете возмущений), в одном из фокусов которых находится Солнце, Коперник же сводил все только к равномерным движениям по окружностям (грубо говоря, это отвечает аппроксимации неравномерного движения по эллипсам несколькими — по числу вводимых окружностей — членами ряда Фурье). Поэтому в его системе эпициклы отнюдь не были изгнаны, лишь число их уменьшилось, да и то лишь примерно в два раза ⁴).

Таким образом, новая система при всей ее гармоничности и простоте в целом оказывалась исключительно сложной в деталях. Этот фактор, как мы уже подчеркивали, задержал, замедлил процесс перехода астрономии на новые рельсы. Тем не менее система Коперника даже в ее первом варианте была и для вычислений проще системы Птолемея, а ее потенциальные возможности с точки зрения практической астрономии были еще более значительны. Поэтому, несомненно, главным препятствием на пути торжества учения Коперника явился разрыв со старыми представлениями, глубоко укоренившимися в сознании людей, буквально пронизывавшими науку того времени и к тому же еще канонизированными церковью.

Но это другой вопрос, который еще будет затронут. Сейчас же нужно отметить, что оба основных замечательных достижения Коперника, — во-первых, понимание относительности движения и

⁴) В одном из последних вариантов системы Птолемея (Франкастр, 1538 г.) для описания движения Солнца, Луны и планет вводилось 73 круга. Коперник же ввел 34 круга (4 для Луны, 3 для Земли, 7 для Меркурия и по 5 для Венеры, Марса, Юпитера и Сатурна). Правда, роль (радиус) эпициклов у Коперника меньше, чем в системе Птолемея, в связи с малостью эксцентриситета эллиптических орбит планет (например, $e = 0,093$ для Марса и $e = 0,017$ для Земли). Поэтому в гелиоцентрической системе уже одна окружность является не столь плохим приближением к реальной орбите планеты. В геоцентрической же системе планеты движутся более сложно и, например, иногда описывают на небе петлю (относительно звезд).

устранение возражений против движения Земли и, во-вторых, создание и развитие гелиоцентрической системы — являются, если угодно, абсолютным завоеванием науки. Нам неизвестно, чтобы не только в XX и XIX вв., но даже и в XVIII столетии в научных кругах отрицалось подобное утверждение. Нужно только оговорить, что именно называть гелиоцентрической системой. На современном языке система Коперника может быть описана примерно так. В декартовой системе координат, центр которой совпадает с центром Солнца (или с центром тяжести Солнечной системы), а оси направлены на звезды ^{б)}, все планеты (включая Землю, вращающуюся также вокруг своей оси) движутся весьма закономерным образом: они вращаются все в одну сторону по орбитам, близким к круговым, и к тому же плоскости этих орбит близки друг к другу.

Сам Коперник и его последователи вкладывали в понятие о гелиоцентрической системе нечто большее: они видели в Солнце «центр мира», в этом отношении оно заняло место, отводившееся Земле в геоцентрической системе: «В середине всех этих орбит находится Солнце; ибо может ли прекрасный этот светоч быть помещен в столь великолепной храмине в другом лучшем месте, откуда он мог бы все освещать собой?..» [5].

Место одного абсолюта занял другой.

Но, как мы хорошо знаем, в действительности Солнце может претендовать на положение «центра мира» не с большим основанием, чем Земля. Никакого такого центра вообще не существует. Солнце движется относительно ближайшей звезды со скоростью около 20 км/с, оно вращается вокруг центра Галактики со скоростью порядка 300 км/с, вся Галактика движется относительно других галактик, составляющих Местную Группу ^{в)}, которая движется относительно других скоплений, а скопления принимают участие в расширении Вселенной.

Но главным делом Коперника и коперниканцев было, конечно, «сдвинуть» Землю, лишить ее абсолютной неподвижности и центрального положения. После этого отказаться от подобных же допущений в отношении Солнца было нетрудно, и нам неизвестно, чтобы отсюда проистекли какие-либо споры. Это является лишним доказательством того факта, что заслуги Коперника сводятся в первую очередь к указанным выше двум моментам, но никак не к абсолютизации гелиоцентрической системы. Или, лучше сказать, эта абсолютизация, естественная в свое время, не

^{б)} В этой системе само Солнце вращается с периодом, равным примерно 28 дням.

^{в)} Сравнительно небольшое скопление галактик, к которому, помимо нашей Галактики и еще несколько большей спиральной галактики M31 — Большой туманности в созвездии Андромеды, принадлежат также десятка два небольших галактик.

сыграла в дальнейшем особой отрицательной роли и была безболезненно отброшена.

Казалось бы, все достаточно ясно. И тем не менее до сих пор еще слышны отголоски споров о том, «что вокруг чего вертится», какие системы отсчета равноправны или неравноправны, какие из них «истинны» и какие нет и не зря ли сражались друг с другом сторонники систем Птолемея и Коперника.

3. ЧТО ЕСТЬ ИСТИНА?

Евангелическая легенда повествует, что на вопрос Понтия Пилата «Что есть истина?» Христос не ответил. Через полторы тысячи лет, во времена Коперника и Галилея, христианская церковь уже твердо знала, что «истинно» и что «ложно» или является «заблуждением». В историческом плане вполне естественно, что особенно быстрой и резкой была реакция новых ревнителей веры — протестантов. Их глава Лютер так реагировал на учение Коперника: «Этот дурак хочет перевернуть все астрономическое искусство. Но, как указывает Священное писание, Иисус Навин велел остановиться Солнцу, а не Земле». Меланхтон также отстаивал неподвижность Земли, утверждал, что «публичное подтверждение бессмысленных теорий неприлично и показывает вредный пример», и требовал обуздать этого «астронома, который заставляет Землю двигаться, а Солнце стоять на месте». По ряду причин, частично ясных из дальнейшего, католическая церковь вначале не противодействовала опубликованию и использованию труда Коперника, который был самим Коперником посвящен папе Павлу III (это посвящение было принято или, как теперь бы сказали, было согласовано). Вообще Коперник, каноник католического монастыря, лично или по переписке знакомый со многими иерархами католической церкви, действовал осторожно. Анонимное предисловие, помещенное при издании книги Коперника, также способствовало тому, что разрыв с церковными «истинами» оказался замаскированным. Автор предисловия (им был богослов и математик ОсиаNDER) пишет: «Но если рассмотреть внимательнее, то найдем, что автор этого сочинения не сделал ничего, достойного порицания; ибо задача астронома состоит в том, чтобы с помощью тщательных и искусных наблюдений составить себе понятие о движении небесных тел; после того он старается исследовать причины этих движений, а в случае невозможности найти оные придумывает гипотезы, на основании коих посредством геометрических теорем можно бы вычислить эти движения для будущего, а равно для прошедшего времени. Общим этим условиям искусство автора удовлетворяет отлично. Гипотезы его могут быть и несправедливыми, могут быть даже невероятными; достаточно, если они приводят нас к вычислениям, удовлетворяющим нашим наблюдениям» [5].

Таким образом, система Коперника, пока она была известна лишь узкому кругу астрономов, не вызвала особого беспокойства и была использована для составления астрономических таблиц («Прусские таблицы», 1551) и при реформе календаря («Новый стиль» был введен в 1582 г.). Положение изменилось, когда гелиоцентрические воззрения вышли на более широкий простор и стали реально угрожать церковному авторитету. В 1600 г. был сожжен на костре Джордано Бруно, а в 1616 г. сочинение Коперника было внесено в «Индекс запрещенных книг» на основании следующего заключения одиннадцати «богословов-классификаторов» (т. е. цензоров)⁷): «Положение, что Солнце является центром мира и неподвижно, ложно и абсурдно в философском отношении, формально еретично и явно противоречит изречениям Священного писания во многих его местах как по смыслу слов писания, так и по общему истолкованию святых отцов и ученых богословов; положение же, будто Земля не лежит в центре мира и движется, вдобавок обладая суточным вращением, ложно и нелепо с философской точки зрения, с богословской же является по меньшей мере заблуждением в вопросах веры».

Отношение религии к науке достаточно выразительно определено формулой Тертулиана «Верую, ибо нелепо» или отражено в замечании кардинала Барония: «Намерения святого духа заключаются в том, чтобы научить нас, как взойти на небеса, а не тому, как движутся небеса». Но в XVI и XVII вв. уже нельзя было оставаться на такой позиции, ибо наука приходила во все большее противоречие с церковными догмами. Поэтому и совершался переход на позиции, нашедшие отражение в предисловии Осияндера и ярко выраженные также в письме главного «увещателя» Галилея кардинала Беллормино [9], посланном в 1615 г. коперниканцу патеру Фоскарини: «Мне кажется, что Вы и сеньор Галилео поступили бы осторожно, если бы удовлетворились высказываниями *ex suppositione* (предположительно), но не абсолютно; так говорил, как я всегда думал, и Коперник. Действительно, когда утверждают, что в предположении, будто Земля движется и Солнце стоит неподвижно, все наблюдаемые явления спасаются лучше, чем при задании эпициклов и эксцентров, то это прекрасно сказано и не включает в себе никакой опасности; а этого и достаточно для математики; но когда начинают говорить, что Солнце

⁷) Какова инерция бюрократической (помимо всего прочего) церковной машины, видно из того факта, что запрет с сочинения Коперника был снят лишь в 1822 г. и только с 1835 г. труды Коперника, Галилея и Кеплера больше не включались в «Индекс запрещенных книг». Под влиянием православной церкви учение Коперника находилось в России под запретом еще в период царствования Елизаветы, умершей в 1761 г., и окончательно получило права гражданства лишь в екатерининский период. В защиту гелиоцентрической системы выступал Ломоносов, в частности в 1752 и 1761 гг. (подробнее см. [8]).

действительно стоит в центре мира и что оно только вращается вокруг самого себя, но не движется с востока на запад, и что Земля находится на третьем небе (третья по порядку планета от Солнца) и с большой скоростью вращается вокруг Солнца, то это вещь очень опасная и не только потому, что она раздражает всех философов и ученых богословов, но и потому, что она вредит Св. вере, поскольку из нее вытекает ложность Св. писания».

Милостивое разрешение «спасать» явления и заниматься математикой, но не касаться реальности, существа дела вызывало бешенство у Галилея, и это вполне понятно⁸). Он пишет (в послании герцогине Лотарингской): «Профессора-богословы не должны присваивать себе права регулировать своими декретами такие профессии, которые не подлежат их ведению, ибо нельзя навязывать естествоиспытателю мнения о явлениях природы... Мы проповедуем новое учение не для того, чтобы посеять смуту в умах, а для того, чтобы их просветить; не для того, чтобы разрушить науку, а чтобы ее прочно обосновать. Наши же противники называют ложным и еретическим все то, чего они не могут опровергнуть. Эти ханжи делают себе щит из лицемерного религиозного рвения и унижают Священное писание, пользуясь им как орудием для достижения своих личных целей... Предписывать самим профессорам астрономии, чтобы они своими силами искали защиты против их же собственных наблюдений и выводов, как если бы все это были один обман и софистика, означало бы предъявлять к ним требования более чем невыполнимые; это было бы все равно, что приказывать им не видеть того, что они видят, не понимать того, что им понятно, и из их исследований выводить как раз обратное тому, что для них очевидно».

Замечательные слова, звучащие вполне современно и через столетия после эпохи Галилея!

Мы закончим экскурс в историю словами А. Эйнштейна из написанного им в конце жизни предисловия к английскому изданию «Диалога о двух главных системах мира» Галилея: «Коль скоро представление о центре Вселенной с полным правом было отброшено, идея о неподвижности и вообще об исключительной роли Земли лишилась своего основания. Тем самым вопрос о том, что следует считать «находящимся в покое» при описании небесных тел, стал вопросом удобства. Следуя Аристарху и Копернику,

⁸) Не следует забывать, однако, что с позиций поисков реальной картины можно критиковать и совершенно правильные, в действительности, физические теории. Так, Ф. Бэкон квалифицировал (в 1622 г.) построения Коперника «как спекуляции человека, который не заботится о том, какие фикции он вводит в природу, если только это отвечает его вычислениям». Весьма слабая аргументация Бэкона против системы Коперника основана не на схоластических принципах, а на требованиях «здорового смысла». Такие требования всегда звучат тем громче, чем хуже известен предмет со всеми деталями, количественными соображениями и т. д.

обычно подчеркивают преимущества, связанные с выбором Солнца в качестве тела, находящегося в состоянии покоя (по Галилею этот выбор является не чистым соглашением, а гипотезой, которая может быть «истинной» или «ложной»). Указывают, что проще рассматривать вращение Земли вокруг своей оси, чем общее вращение всех неподвижных звезд вокруг Земли. Кроме того, предположение о вращении Земли вокруг Солнца устраняет различие в движении внутренних и внешних планет и доставлявшее много хлопот возвратное движение внешних планет, позволяя объяснить его движением Земли вокруг Солнца.

Как ни сильны все эти аргументы, в особенности если рассматривать их в связи со сделанным Галилеем открытием, состоящим в том, что Юпитер со своими лунами в каком-то смысле представляет коперниканскую систему в миниатюре, все же все эти аргументы носят качественный характер. В самом деле, поскольку мы, люди, привязаны к Земле, наши наблюдения никогда не дадут нам непосредственно «истинные» движения планет, а дадут лишь движение точки пересечения луча зрения (направление Земля — наблюдаемая планета) со «сферой неподвижных звезд». Подтверждение правильности коперниканской системы, выходящее за рамки чисто качественных аргументов, стало возможно лишь после того, как были определены «истинные» орбиты планет. Эту проблему почти непреодолимой трудности поистине гениально решил Кеплер (еще при жизни Галилея). Но этот существенный прогресс не оставил никаких следов в работе Галилея — яркая иллюстрация того, что творческие личности не всегда обладают легкостью восприятия» [10].

Несмотря на всю перегруженность настоящей статьи цитатами, автор не мог удержаться от соблазна привести здесь еще несколько фраз из того же предисловия Эйнштейна: «Лейтмотив, явственно звучащий по всей книге Галилея, — это страстная борьба против любого рода догм, основанных на авторитете. Только эксперимент и строгие рассуждения он считал критерием истины. Сейчас нам трудно даже представить себе, сколь раздражающими и революционными казались подобные взгляды во времена Галилея, когда одно лишь сомнение в истинности мнений, основанных на одном только авторитете, являлось тяжким преступлением и каралось в соответствии с этим. С тех пор, как бы мы ни льстили себе, в этом отношении мало что изменилось, но по крайней мере в теории победил принцип непредвзятого мышления, и многие следуют ему, хотя и не вполне искренне» [10].

Вернемся, однако, непосредственно к теме Птолемей — Коперник.

Дискуссия о строении Солнечной системы оказалась, как мы видели, перенесенной на почву философских рассуждений об истине. Учитывая это, а также уровень господствовавших представ-

лений о движении и об устройстве Вселенной⁹⁾, можно понять возникшее в те времена противопоставление: Земля покоится в центре Вселенной, а Солнце вращается вокруг нее — такова одна возможная истина (условно, птолемеева истина); либо же Солнце покоится (или находится) в центре Вселенной, а Земля вращается вокруг него — это другая возможная истина (коперниканская). Одна из этих истин должна быть верной, другая ложной.

Между тем все дальнейшее развитие физики, начатое в этом отношении Коперником и Галилеем, шло в направлении более глубокого понимания понятий покоя и движения, понимания относительности таких понятий и смысла этой относительности.

Н. Бору приписывают (см., например, [11]) такое определение глубокого утверждения или замечания: «Для того чтобы определить, какое утверждение является глубоким, нужно раньше определить, что такое ясное утверждение. Утверждение является ясным, если противоположное утверждение или правильно, или ложно. Глубокое утверждение должно обладать тем свойством, что противоположное утверждение также является глубоким». В этом смысле, да и с других точек зрения, движение и покой являются глубокими утверждениями.

Систему отсчета (систему координат)¹⁰⁾ можно связать с Землей, и в этой системе Солнце вращается вокруг Земли. Такая система не более «ложна» и не более «истинна», чем система, связанная с Солнцем (и, скажем, со звездами), в которой, разумеется, Земля вращается вокруг Солнца. Подобная равноправность, допустимость разных систем отсчета в рамках кинематики давно уже не вызывает ни тени сомнений. То же относится к упомянутому факту, что Солнце не неподвижно в системах отсчета, связанных с ближайшими звездами или с другими галактиками. Ясно, таким образом, что термины «истинная система отсчета» и «ложная система отсчета» неприменимы для характеристики систем Птолемея и Коперника, да и вообще систем отсчета, как и многих других понятий, отличающихся некоторой сложностью и глубиной. Истина же в данном случае состоит совсем в другом — в особенностях и всей совокупности параметров, определяющих строение Солнечной системы и могущих отражаться и описы-

⁹⁾ Не лишним, может быть, будет напомнить, что даже Кеплер в первом выпуске книги «Сокращение (или очерки) коперниковой астрономии», вышедшей в 1618 г. и в следующем же году занесенной в «Индекс запрещенных книг», отвергал идеи Дж. Бруно и утверждал, что существует сфера неподвижных звезд, которая «состоит из льда или из кристалла».

¹⁰⁾ В литературе, особенно в последнее время, часто подчеркивают различие между системой отсчета и системой координат. Действительно, не всякая координатная система может описывать реальное пространство-время или быть реализована реальными телами и т. п. (см., например, [12]). В настоящей статье нет оснований касаться этого вопроса подробнее, и все упоминаемые координатные системы могут отождествляться с системами отсчета.

ваться как в геоцентрических, так и в гелиоцентрических координатах. Все это, разумеется, ни в какой мере не противоречит возможности признания тех или иных преимуществ, особых свойств и т. п., присущих той или иной системе отсчета. Довольно характерна в этом отношении (и справедлива по содержанию) и выписка из книги А. Рея, которую В. И. Ленин сделал в «Философских тетрадах»: «...система Птолемея показывает нам опыт, загроможденный индивидуальными представлениями, зависящими от земных условий астрономического наблюдения: это звездная система, как она видна с земли.

Система Коперника — Галилея гораздо более объективна, так как она упраздняет условия, зависящие от того факта, что наблюдатель помещается на земле» [13].

4. ВОЗРОЖДЕНИЕ «БОРЬБЫ ВОЗЗРЕНИЙ НА СТРОЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ» ИЛИ НЕДОРАЗУМЕНИЕ?

С тех пор как сказанное в конце предыдущего раздела было в достаточной мере понято, что, во всяком случае, имело место до создания общей теории относительности, кто-либо вполне мог бы в популярной книге заявить: «Птолемей и Коперник в одинаковой мере правы. Чье мнение предпочесть — вопрос удобства» или «Борьба между воззрениями Птолемея и Коперника, столь жестокая в ранние дни науки, была бессмысленна. Любая система координат может применяться с одинаковым основанием. Два предложения — «Солнце покоится, а Земля движется» и «Солнце движется, а Земля покоится» — означают только два различных соглашения о двух различных системах координат».

Что можно было бы заметить по поводу подобных высказываний? Можно, конечно, обвинять их авторов идеалистами, реакционерами и даже сторонниками инквизиции. Но это явилось бы либо невежеством, либо демагогией (впрочем, оба эти качества прекрасно уживаются друг с другом). Правильная же реакция должна быть примерно такой. Реальная борьба между воззрениями Птолемея и Коперника была связана с тем, что сторонники системы Птолемея считали Землю неподвижной в некотором абсолютном смысле этого понятия и отрицали возможность движения Земли. Они отрицали также заключения, сделанные Коперником и его последователями в отношении строения Солнечной системы, и конкретно не признавали реальности закономерностей в движении планет, выявляющихся в гелиоцентрической системе. По обоим пунктам коперниканцы были совершенно правы, и их борьба против старых взглядов была, конечно, вполне осмысленной. Авторы же приведенных «цитат», вопреки исторической действительности, свели разногласия между воззрениями Птолемея и Коперника к другому вопросу — о возможности пользоваться

разными системами отсчета и равноправности этих систем. Естественно думать, что основной причиной этого явилось стремление заострить внимание, не говоря уже просто о «манере выражаться» (*façon de parler*). Манеру эту нельзя признать удачной, поскольку она породила недоразумения, но это уже другой вопрос.

Читатели, вероятно, удивлены, а быть может, и возмущены: выдуманы какие-то цитаты, а потом они произвольно комментируются, разве это что-нибудь доказывает? Все дело в том, однако, что эти цитаты не выдуманы. Первая из них взята из широкоизвестной у нас популярной книги М. Борна [14], а вторая, хотя и в несколько измененном виде (см. также ниже), приведена из еще более известной популярной книги А. Эйнштейна и Л. Инфельда «Эволюция физики» [15]. Что же касается наших комментариев, то они базируются и полностью обоснованы всем контекстом, связанным с этими цитатами, а также другими вполне ясными высказываниями их авторов. Правда, теперь речь идет не о кинематике, а о роли и следствиях общей теории относительности в вопросе о динамической равноправности систем отсчета. Но в том-то и дело, что это обстоятельство только еще больше удаляет дискутируемые вопросы от исторической действительности.

Итак, с общей теорией относительности оказалась связанной не реальная, историческая тема Птолемей — Коперник, а в лучшем случае ее отголоски и более общий (и более современный, но несравненно менее острый) вопрос о существовании привилегированных в динамическом отношении систем отсчета.

Один из вариантов постановки этого вопроса, особенно интересный в плане нашего изложения, ясен из статьи В. А. Фока [16], в которой о системах Птолемея и Коперника говорится следующее: «В узкомеханической постановке речь идет о кинематике Солнечной системы. Птолемей во втором веке предлагал одну кинематическую схему Солнечной системы. Коперник в шестнадцатом веке предложил другую. Истинной оказалась схема Коперника. Вопрос об истинности схемы Коперника может быть решен только динамикой, только наукой, изучающей массы и силы как причины движения. Только динамика может дать ответ на вопрос о природе ускорения: имеет ли ускорение абсолютный или относительный характер. Но этот вопрос тесно связан с вопросом о существовании привилегированных систем отсчета. Здесь возможны две точки зрения. Согласно одной из них возможно выделение привилегированных систем отсчета, обладающих тем свойством, что если ускорение равно нулю относительно одной из них, то оно равно нулю и относительно любой другой. Это значит, что существование ускорения, отличного от нуля, есть факт объективный, от выбора привилегированной системы отсчета не зависящий. (Это мы и разумеем под словами «абсолютный харак-

тер ускорения».) Если ускорение имеет в этом смысле абсолютный характер, то прав Коперник: для Солнечной системы привилегированной является система отсчета с началом в центре инерции Солнца и планет и с осями, направленными на три неподвижные звезды (а также другие системы отсчета, движущиеся относительно первой прямолинейно и равномерно). Но возможна и другая точка зрения, согласно которой привилегированных систем отсчета не существует и ускорение имеет, подобно скорости, относительный характер. С этой точки зрения обе системы — Коперника и Птолемея — равноправны. Первая связана с Солнцем, вторая — с Землей, но ни одна из них не имеет преимущества перед другой. В этом случае спор между сторонниками системы Коперника и системы Птолемея становится беспредметным. Таким образом, вопрос о том, можно ли отдать гелиоцентрической системе решительное предпочтение перед геоцентрической, тесно связан с вопросом о существовании привилегированных систем отсчета».

В дальнейшем В. А. Фок цитирует уже упоминавшиеся книги М. Борна и А. Эйнштейна и Л. Инфельда. Нам придется и здесь привести из последней книги [15] ту цитату, которая в нашей литературе всегда воспроизводится, когда заходит речь об «ошибках» Эйнштейна и о связи гелиоцентрической системы с общей теорией относительности: «Можем ли мы сформулировать физические законы таким образом, чтобы они были справедливыми для всех систем координат, не только для систем, движущихся прямолинейно и равномерно, но и для систем, движущихся совершенно произвольно по отношению друг к другу? Если это можно сделать, то наши трудности разрешены. Тогда мы будем в состоянии применять законы природы в любой системе координат. Борьба между воззрениями Птолемея и Коперника, столь жестокая в ранние дни науки, стала бы совершенно бессмысленной. Любая система координат могла бы применяться с одинаковым основанием. Два предложения — «Солнце покоится, а Земля движется» и «Солнце движется, а Земля покоится» — означали бы просто два различных соглашения о двух различных системах координат. Могли бы мы построить реальную релятивистскую физику, справедливую во всех системах координат, физику, в которой имело бы место не абсолютное, а лишь относительное движение? Это, в самом деле, оказывается возможным!»

Об этой цитате еще пойдет речь ниже. Из нее (и, главное, из других материалов) следует, что Эйнштейн и Инфельд (и многие другие) считают, что в свете общей теории относительности какие-то привилегированные системы отсчета, аналогичные в этом отношении инерциальным системам классической механики, ввести нельзя, их не существует. В. А. Фок, напротив, отстаивает тезис [16, 17] о существовании и в общей теории относительности

привилегированных систем отсчета, откуда «вытекает абсолютный (в указанном выше смысле) характер ускорения в теории тяготения Эйнштейна» [16]. Здесь имеются определенные разногласия физического характера, хотя и со значительной примесью расхождений терминологического, а потому и малосущественного происхождения. На этом мы остановимся в следующих разделах статьи. Но к какому бы выводу мы здесь ни пришли, исторический спор Птолемей — Коперник отношения к этому по существу не имеет, он не станет ни беспредметным, ни бессмысленным. Разве что привилегированную систему отсчета, если она существует, желающие смогут называть истинной, а непривилегированную ложной, от чего достоинства одной и недостатки другой не уменьшатся и не увеличатся.

В свете сказанного автор не может, очевидно, согласиться с А. Д. Александровым, который в статье с многозначительным заглавием «Истина и заблуждение» [18] характеризует дискуссию, связанную с общей теорией относительности, следующими словами: «Старая, полная драматизма борьба воззрений на строение Вселенной, которая привела когда-то к суду над Галилеем, возродилась вновь» и далее «сложившаяся ситуация по-своему драматична потому, что оказался поднятым такой острый в былые времена и, казалось, уже давно решенный вопрос...» Между тем, как мы пытались напомнить и подтвердить, давно решенный вопрос действительно давно решен (Земля не является абсолютно неподвижным центром мира), а вместо возрождения «борьбы воззрений на строение Вселенной» речь идет о недоразумениях, связанных с неточным и небрежным изложением, встречающимся в литературе (в первую очередь в научно-популярных книгах). Кроме того, продолжается, уже в свете общей теории относительности, не затихавшая и до этого дискуссия о возможности введения инерциальных или каких-то других привилегированных систем отсчета; к строению Вселенной этот вопрос имеет в лучшем случае лишь весьма отдаленное отношение.

В заключение настоящего раздела хотелось бы сделать одно частное замечание, касающееся изучения творчества Эйнштейна. Как человек Эйнштейн восхищает своей скромностью, самокритичностью, полным отсутствием той «величавой надутости» и элементов «мании величия», которые не так уж редко встречаются среди ученых мужей. Тем меньше оснований (и без того, конечно, отсутствующих) канонизировать Эйнштейна, и, напротив, вполне уместен и интересен анализ его заблуждений и ошибок. Да и вообще, в историческом плане, ошибки и заблуждения великих людей не менее поучительны, чем их сильные стороны. Одно от нас безусловно требует уважение к великому человеку, в данном случае к Эйнштейну, — бережного отношения к его литературному наследству. В свете такого требования нельзя, по

нашему мнению, не признать, что «Эволюция физики» [15] не может служить источником анализа взглядов Эйнштейна, особенно если речь идет о конкретных формулировках и вообще о самом тексте. Сказанное становится ясным всякому, кто ознакомится с биографической книгой Л. Инфельда [19] и его воспоминаниями [20]. Стипендия, позволившая Л. Инфельду жить и работать в Принстоне, кончилась, и как выход из денежных затруднений у него возникла идея написать научно-популярную книгу. Но для финансового успеха книги на ней должно было стоять в первую очередь имя Эйнштейна. И Эйнштейн согласился на это, видимо, как из доброты, так и для сохранения возможности работать вместе с Инфельдом над выводом уравнений движения материальных точек из уравнений теории гравитационного поля (т. е. уравнений общей теории относительности для метрического тензора g_{ik}). До какой-то степени Эйнштейн затем, вероятно, даже увлекся идеей написать совсем уж популярную книгу, что ему самому никогда не удавалось. Но писал книгу только Л. Инфельд, причем в силу плохого знания английского языка ему помогали друзья. Затем он читал текст Эйнштейну, который часто говорил: «Мне все равно, как Вы напишете. Вам виднее. Но эта идея обязательно должна быть в книге». Далее Л. Инфельд рассказывает: «Когда прислали авторские экземпляры, я принес их Эйнштейну. Он совершенно не заинтересовался книгой, даже не посмотрел, как она выглядит, так же как не взглянул на нашу работу, когда была прислана верстка» [19, 20]. Говоря о последующем обсуждении книги в печати, Л. Инфельд пишет [20]: «Одним из обвинений, до того неумных, что трудно даже на него ответить, было то, будто мы выступаем против теории Коперника, пишем, что теории Коперника и Птолемея — одно и то же, ибо все зависит от системы отсчета, а система отсчета в теории относительности произвольна. Поэтому мы, как утверждали некоторые рецензенты, обскуранты («поповщина») и, видимо, также (это я уж добавляю от себя) сторонники инквизиции. Действительно, упомянутый пункт был у нас недостаточно четко сформулирован, но делать из этого вывод, что теория относительности в какой-то мере недооценивает дело Коперника, значит выдвигать обвинение, которое не стоит даже опровергать». Об этом в настоящей статье, по существу, уже шла речь ранее. Сейчас же мы хотели лишь пояснить, почему «Эволюция физики» не может использоваться как источник для изучения взглядов Эйнштейна. В таком использовании тем меньше нужды, что даже весьма неполное (в отношении публицистики, пишем и т. д.) собрание трудов А. Эйнштейна, изданное у нас в 1965 — 1967 гг., состоит из четырех толстых томов. Хотелось бы надеяться, что злополучная цитата из «Эволюции физики», которую и нам пришлось привести, не будет больше фигурировать в литературе.

5. НЬЮТОН

Система понятий и законов, составляющих основу классической механики, приобрела в известном отношении законченный вид только в трудах И. Ньютона (1643 — 1727), опубликовавшего свои «Математические начала натуральной философии» в 1687 г. Таким образом, понадобилось около полутора столетий, чтобы благодаря Копернику, Галилею, Кеплеру и, разумеется, многим другим (чьи имена в лучшем случае можно найти лишь в книгах по истории науки) удалось преодолеть и заменить новыми выработанные в древности представления, основанные на повседневных наблюдениях и «здравом смысле»¹¹⁾.

Законы механики были сформулированы Ньютоном следующим образом [21]:

«I. Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние.

II. Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует.

III. Действие всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе — взаимодействия двух тел друг на друга равны и направлены в противоположные стороны».

Все эти три закона в применении к важнейшему в принципиальном отношении случаю системы материальных точек, силы между которыми зависят лишь от расстояния точек друг от друга, в настоящее время записываются обычно в такой форме:

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = \sum_k \mathbf{F}_{ik}(\mathbf{r}_{ik}), \quad (1)$$

$$\mathbf{F}_{ik}(\mathbf{r}_{ik}) = -\mathbf{F}_{ki}(\mathbf{r}_{ik}), \quad (2)$$

где m_i — масса точки (тела) i ; $\mathbf{r}_i(t)$ — отвечающий этой точке радиус-вектор и $\mathbf{F}_{ik}(\mathbf{r}_{ik})$ — сила, действующая на точку i со стороны точки k , находящейся от нее на расстоянии $r_{ik} = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_k|$.

Мы вовсе не собираемся здесь останавливаться на анализе физического содержания различных понятий¹²⁾ и законов классической механики и коснемся лишь имеющего прямое отношение

¹¹⁾ В античной механике за основу принимался закон движения, согласно которому тело движется равномерно, да и вообще не находится в покое, только пока на него действует сила, что как раз и отвечает действительности в повседневных условиях (особенно в условиях того времени) — при наличии значительных сил трения. Только Галилей ясно и решительно отказался от этого принципа и пришел к противоположному — к закону инерции (при отсутствии сил тело движется равномерно и прямолинейно; см. ниже).

¹²⁾ Имеется в виду, например, понятие массы, которое подробно обсуждается в книге [22].

к теме статьи вопроса о системах отсчета. Важность этого вопроса очевидна, поскольку законы Ньютона I, II и III просто бессодержательны, пока не указана система отсчета (включая сюда и способ измерения или отсчета времени), относительно которой определяются векторы $r_i(t)$. Достаточно указать, что равномерное и прямолинейное движение материальной точки в некоторой системе отсчета K в других системах отсчета K' может быть уже неравномерным и криволинейным (это имеет место, например, если система K' вращается относительно системы K или если часы в системе K' обладают неравномерным ходом по сравнению с часами в системе K и т. д.). Таким образом, законы Ньютона (в своей совокупности и в указанной форме) справедливы только для определенного класса систем отсчета. Такие системы в настоящее время называют инерциальными, но это понятие получило более или менее полное право гражданства довольно поздно (лишь в XIX в.; см. ниже). Ньютон же стремился трактовать свои законы как нечто абсолютно точное и считал их справедливыми в некоем абсолютном пространстве и при использовании абсолютного времени, определяемых следующим образом:

«Абсолютное, истинное, математическое время само по себе и по самой своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно и иначе называется длительностью. Относительное, кажущееся, или обыденное, время есть или точная, или изменчивая, постигаемая чувствами, внешняя, совершаемая при посредстве какого-либо движения, мера продолжительности, употребляемая в обыденной жизни вместо истинного, математического времени, как-то: час, день, месяц, год.

Абсолютное пространство по самой своей сущности, безотносительно к чему бы то ни было внешнему, остается всегда одинаковым и неподвижным. Относительное (пространство) есть его мера или какая-либо ограниченная подвижная часть, которая определяется нашими чувствами по положению его относительно некоторых тел и которое в обыденной жизни принимается за пространство неподвижное...» [21].

Для современного читателя метафизический характер абсолютного пространства и абсолютного времени бросается в глаза. Но только через два столетия после создания теории относительности абсолютное пространство и абсолютное время, понимаемые как нечто неизменное и внешнее, оказались окончательно вытесненными из физики. В то же время критика ньютоновских представлений об абсолютных пространстве и времени, а также физическое определение систем отсчета, в которых справедливы законы Ньютона, содержатся в большом числе трудов, опубликованных значительно раньше (см., например, [23, 24], а также ряд ссылок в [25, 26]). Существо дела состоит в том, что фактически есть такие системы отсчета (они и получили название инерциаль-

ных), в которых законы Ньютона справедливы с той точностью, которая отвечает области применимости классической механики. Именно в таком утверждении можно видеть содержание первого закона Ньютона (закона инерции), между тем как в формулировке Ньютона этот закон является просто частным случаем второго закона¹³⁾. На практике как в физике, так и в астрономии инерциальная система вводится, определяется и используется путем вполне конкретных физических операций с использованием, например, маятника Фуко и таких опорных точек, как «неподвижные звезды» или, в действительности, реальные звезды или галактики. При таком подходе совершенно очевидно, что ни одна инерциальная система не может считаться таковой с какой-то абсолютной точностью¹⁴⁾.

Число инерциальных систем бесконечно велико, поскольку всякая система отсчета, движущаяся с постоянной скоростью $v = \text{const}$ относительно любой инерциальной системы, также является инерциальной системой. Это обстоятельство, основанное на данных опыта, составляет содержание принципа относительности классической механики. Формально этот принцип состоит в том, что уравнения движения (1) не изменяются, остаются в силе при преобразованиях Галилея:

$$r'_i = r_i - vt, \quad t' = t, \quad (3)$$

где r'_i и r_i — соответственно радиусы-векторы точки i в новой и старой системах координат, движущихся друг относительно друга с постоянной скоростью $v = \text{const}$.

Во всех инерциальных системах отсчета механические явления происходят, таким образом, совершенно одинаково (разумеет-

¹³⁾ Это так, если известно, что на тело не действуют никакие силы F_{ik} . С другой стороны, узнать, что на тело не действуют силы, можно, казалось бы, только если оно движется по инерции (т. е. движется равномерно и прямолинейно в инерциальной системе отсчета). Поэтому, чтобы избежать порочного круга, нельзя определять инерциальные системы как системы, в которых справедлив закон инерции. Из опыта следует, однако, что в некоторых системах отсчета (лучше всего в используемой в астрономии системе отсчета, связанной с центром тяжести Солнечной системы и «неподвижными» звездами; см. ниже) второй и третий законы Ньютона справедливы с высокой точностью и без привлечения каких-либо сил, кроме вызванных телами, входящими в состав Солнечной системы. В такой системе отсчета тело, достаточно удаленное от всех других тел, будет двигаться по инерции.

Если считать, что отсутствие сил (внешних воздействий), действующих на тело, можно гарантировать и контролировать (до какой-то степени это обеспечивается в случае достаточной удаленности всех других тел), то существование инерциальной системы отсчета можно отождествить с возможностью найти систему отсчета, по отношению к которой пространство однородно и изотропно, а время однородно (см. [27]).

¹⁴⁾ Другое дело, что вопрос о «степени инерциальности», или, другими словами, той точности, с которой данная система отсчета может считаться инерциальной, в большинстве случаев остается в тени (см. в этой связи [28, 29]).

ся, если одинаковы начальные условия). Равноправие всех инерциальных систем (принцип относительности) лишает возможности, по крайней мере в рамках механики, считать одну из них «абсолютной». Однако ускорение относительно всех инерциальных систем одинаково, и в этом отношении его можно было бы назвать «абсолютным». В частности, если тело вращается относительно одной инерциальной системы отсчета, то оно вращается и в других системах. Во вращающейся системе отсчета (в системе, связанной с телом, вращающимся относительно инерциальной системы) закон движения (1) уже несправедлив в том смысле, что, помимо сил F_{ik} (r_{ik}), появляются так называемые силы инерции — центробежная и кориолисова¹⁵). В результате их действия плоскость колебаний маятника, точка подвеса которого закреплена относительно вращающегося тела (таков маятник Фуко), все время поворачивается относительно тела. В частности, с помощью маятника Фуко можно доказать вращение Земли, доказать, что она не является инерциальной системой отсчета. Фактически, правда, опыт Фуко был впервые выполнен в середине прошлого века, когда вращение Земли относительно инерциальных систем и без того не вызывало сомнений.

В ньютоновской механике инерциальные системы отсчета явно выделены по сравнению с неинерциальными и могут с достаточным основанием быть названы привилегированными системами отсчета. Но эта привилегированность довольно относительна. Подлинно привилегированными действительно были бы ньютоновское абсолютное пространство и связанная с ним «наипривилегированнейшая» система отсчета. Все же реальные, применяемые на практике инерциальные системы классической механики и системы, им эквивалентные в силу принципа относительности, во-первых, образуют целое бесконечное семейство и, во-вторых, определены приближенно. С современных позиций последнее, как и вообще использование приближенных понятий, вполне естественно и не вызывает ни удивления, ни возражений. Но к такому отношению пришли в результате длинного пути. Вплоть до создания общей теории относительности инерциальные системы отсчета в той или иной мере абсолютизировались; считалось, что существуют какие-то «абсолютно точные», абсолютно привилегированные инерциальные системы, а ограниченная «степень инерциальности»

¹⁵) Вместе с тем, если в законе движения (1) не конкретизировать вида сил F , считая их зависящими только от r_{ik} , причем соблюдается условие (2), то закон движения (1) справедлив во всех системах отсчета — при векторной форме записи система отсчета вообще явно не фигурирует (во избежание недоразумений подчеркнем, что в неинерциальных системах отсчета сила F включает, разумеется, члены, отвечающие так называемым силам инерции). В этом отношении для записи уравнений механики в ковариантной форме (в одинаковой форме во всех системах отсчета) даже нет особой нужды вводить обобщенные координаты и записывать уравнения в лагранжевой форме.

всех используемых систем отсчета не является принципиальной. Оказалось же, что это не так, в чем и состоит один из существенных результатов общей теории относительности.

Прежде чем перейти к этому этапу в развитии физики, вернемся к вопросу о гео- и гелиоцентрических системах отсчета. Степень инерциальности системы отсчета, связанной с Землей, при наблюдении явлений на земной поверхности определяется отношением центробежного или кориолисова ускорения a к ускорению силы тяжести $g \approx 980 \text{ см/с}^2$. На экваторе, например, отношение центробежного ускорения к ускорению силы тяжести ¹⁶⁾ $a/g \sim 10^{-8}$. Такого же порядка и отношение ускорения, связанного с движением Земли вокруг Солнца, к ускорению силы тяжести g . Поэтому не только во времена Галилея (не говоря уже о Копернике), но и значительно позже Земля с вполне достаточной степенью точности могла рассматриваться, и фактически рассматривалась, в качестве инерциальной системы (это, правда, относится лишь к движению на земной поверхности или сравнительно недалеко от нее).

Таким образом, очевидно, что динамические соображения в смысле учета роли сил инерции или неинерциальности выбираемых систем отсчета при становлении системы Коперника не играли роли. Нам представляется несомненным, что если бы какие-либо эффекты, связанные с отличием гелиоцентрической системы отсчета от инерциальной, даже на несколько порядков величины превосходили фактически имеющую место неинерциальность гелиоцентрической системы (включая сюда и релятивистские поправки), это не было бы замечено Коперником и никак не отразилось бы на его исследованиях. Это замечание покажется, как можно надеяться, менее схоластическим (каким оно, несомненно, в известной мере является), если вместо нашей Солнечной системы иметь в виду планетную систему, связанную с одной из компонент двойной звезды. В подобных условиях в широкой области значений масс звезд и планет связанная с одной из звезд система отсчета (аналогичная в этом отношении гелиоцентрической системе) может оказаться значительно удобнее по сравнению с инерциальной системой, связанной с центром масс двойной звезды. Далее, для анализа движения многочисленных спутников Юпитера (их известно 12 или 13, Галилей открыл те 4 из них,

¹⁶⁾ Центробежное ускорение $a = v_g^2/r_g = \omega_g^2 r_g \sim 1 \text{ см/с}^2$, где $v_g = \omega_g r_g$ — скорость земной поверхности, $\omega_g = 2\pi/T_g \sim 6 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ — угловая скорость Земли и $r_g \sim 6 \cdot 10^8 \text{ см}$ — ее радиус. Ускорение Земли в результате ее движения вокруг Солнца $a = v_0^2/R = 0,6 \text{ см/с}^2$, так как скорость Земли на орбите $v_0 = 3 \cdot 10^6 \text{ см/с}$ и радиус орбиты $R = 1,5 \cdot 10^{13} \text{ см}$. Вдали от Земли связанная с Землей (геоцентрическая) система отсчета отличается от инерциальной системы, конечно, уже сильнее, чем на земной поверхности.

которые значительно больше всех других) самой удобной является система отсчета, связанная с Юпитером и в этом отношении аналогичная геоцентрической системе. Эти примеры (число их легко умножить; см., например, [28]) иллюстрируют тот тезис, что вопрос о динамической привилегированности гелиоцентрической системы не имеет существенного значения при оценке исторических заслуг Коперника и фактического содержания споров между коперниканцами и их противниками. Другими словами, спор между сторонниками систем Коперника и Птолемея ни в какой степени не стал бы беспредметным, если бы гелиоцентрическая система была гораздо менее близкой к инерциальной системе отсчета, чем это имеет место в действительности. Сказанное не означает, конечно, отрицания того несомненного факта, что использование именно гелиоцентрической системы в применении к анализу кинематики и динамики Солнечной системы существенно облегчило выявление законов Кеплера и законов движения Ньютона.

Сделанные замечания относятся, по нашему мнению, вообще ко всей проблеме привилегированных систем отсчета. Существуют такие системы или нет, является в значительной мере делом определения, а соответствующие дискуссии в большой мере связаны с историческими реминисценциями. Но в плане настоящей статьи, при обсуждении эволюции представлений о системах отсчета и физического содержания общей теории относительности, на привилегированных системах придется еще остановиться.

6. ЭЙНШТЕЙН

В дорелятивистской, доэйнштейновской физике, несмотря на невозможность в рамках механики выделить какую-либо инерциальную систему отсчета среди других таких систем, сохранялась все же вера в существование какой-то «абсолютной» или «наинерциальнейшей» системы отсчета, материализующей ньютоновское абсолютное пространство. Эта вера базировалась на трактовке электродинамических (в частности, оптических) явлений с помощью представлений об эфире и особенно о неподвижном эфире. Такой эфир идеально подходил для роли абсолютной (и абсолютно привилегированной) системы отсчета. Но неподвижный эфир оказался по существу столь же метафизической категорией, как и абсолютное пространство, и представление о нем было оставлено после создания в 1905 г. частной (специальной) теории относительности. Как заметил Эйнштейн (в 1920 г.): «Что касается механической природы лоренцева эфира, то в шутку можно сказать, что Г. А. Лоренц оставил ему лишь одно механическое свойство — неподвижность. К этому можно добавить, что все изменение, которое внесла специальная теория относительности в концепцию эфира, состояло в лишении эфира и этого по-



АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН.

Скульптор Якоб Эпштейн, 1933 г. (бюст установлен
в Принстоне, США).

следнего его механического свойства» [30]¹⁷⁾. Но если частная теория относительности похоронила надежду на то, что какую-либо из инерциальных систем отсчета каким-то образом все же удастся возвести в ранг «абсолютной системы отсчета», являющейся синонимом абсолютного пространства, то сами инерциальные системы и их выделенность, привилегированность еще полностью сохранились. Неудовлетворенность этим обстоятельством являлась одним из источников и мотивов, приведших Эйнштейна к созданию общей теории относительности.

Символично, что вопрос об инерциальных системах в связи с общей теорией относительности довольно подробно охарактеризован в последней публикации Эйнштейна, вышедшей в год его смерти (в 1955 г.) и посвященной попытке обобщить общую теорию относительности: «Существенное достижение общей теории относительности заключается в том, что она избавила физику от необходимости вводить «инерциальную систему» (или «инерциальные системы»). Это понятие неудовлетворительно по той причине, что оно без какого-либо обоснования выделяет из всех мысленно возможных систем координат некоторые системы. Затем делается предположение, что законы физики выполняются *только* для таких инерциальных систем (например, закон инерции и закон постоянства скорости света). Таким образом, в системе физики пространство как таковое наделяется ролью, выделяющей его из всех прочих элементов физического описания. Оно играет определяющую роль во всех процессах, не испытывая их обратного воздействия. Хотя подобная теория является логически возможной, но, с другой стороны, она выглядит не совсем удовлетворительной. Ньютон вполне сознавал этот недостаток, но он столь же ясно понимал, что иного пути для физики в то время не было. Среди физиков позднейшего времени особое внимание на это обстоятельство обратил Эрнст Мах.

Какие новые идеи в развитии основ физики после Ньютона позволили преодолеть исключительность инерциальных систем? Прежде всего, введение понятия поля в теорию электромагнитных явлений Фарадея и Максвелла, или, точнее, введение поля как независимого, ни к чему уже не сводимого фундаментального понятия. Насколько мы способны судить в настоящее время, общая теория относительности может мыслиться только как теория поля. Ее пельзя было бы создать, придерживаясь точки зрения, что реальный мир состоит из материальных точек, движущихся под

¹⁷⁾ Сказанное здесь содержится уже в основной работе Эйнштейна, посвященной частной теории относительности [31], где говорится: «...в предлагаемой теории не вводится «абсолютно покоящееся пространство», наделенное особыми свойствами, а также ни одной точке пустого пространства, в котором протекают электромагнитные процессы, не приписывается вектор какой-нибудь скорости».

влиянием сил их взаимодействия. Всякий, кто попытался бы объяснить Ньютону равенство инерциальной и гравитационной масс, исходя из принципа эквивалентности, обязательно должен был бы ответить на следующее возражение: правда ли, что в ускоренной системе координат тела испытывают такое же ускорение, как и вблизи поверхности притягивающего их небесного тела? Но где же находится в первом случае массы, производящие ускорение? Ясно, что теория относительности предполагает независимость понятия поля» (см. [32], стр. 854).

А теперь перенесемся почти на полстолетия назад, обратившись к первой работе Эйнштейна [33], в которой он в 1907 г. (не достигнув и тридцати лет) начал построение общей теории относительности почти сразу же после создания частной теории относительности¹⁸). Ввиду краткости § 17 статьи ([33], стр. 105), который озаглавлен «Ускоренная система отсчета и гравитационное поле», его можно привести здесь целиком.

«До сих пор мы применяли принцип относительности, т. е. требование независимости законов природы от состояния движения системы отсчета, только к неускоренным системам отсчета. Можно ли представить себе, что принцип относительности выполняется и для систем, движущихся относительно друг друга с ускорением?»

Правда, пока еще нет возможности подробно обсуждать здесь этот вопрос. Но поскольку этот вопрос должен возникнуть перед каждым, кто следил за применениями принципа относительности до настоящего времени, я не могу не высказать здесь своего мнения на этот счет.

Рассмотрим две системы отсчета $\bar{\Sigma}_1$ и Σ_2 . Пусть $\bar{\Sigma}_1$ движется с ускорением в направлении своей оси X , и пусть ее ускорение (постоянное во времени) равно γ . Предположим, что Σ_2 покоится, но находится в однородном гравитационном поле, которое сообщает всем телам ускорение $-\gamma$ в направлении оси X .

¹⁸) Соответствующие публикации (см. [31, 33]) разделены интервалом в два года, но, вероятно, над проблемой тяготения в рамках теории относительности Эйнштейн начал думать еще раньше. Такое заключение связано в первую очередь с упоминанием в статьях [34, 35] о том, что Эйнштейн вначале пытался построить скалярную релятивистскую теорию гравитационного поля. В статье же [33], основанной уже на принципе эквивалентности, об этой попытке даже не упоминается. Любопытно, что скалярную теорию гравитационного поля в 1912 г. начал развивать Г. Нордстрем, и эта теория была оставлена лишь после того, как в 1919 г. было доказано наличие отклонения световых лучей, проходящих вблизи Солнца (в скалярной теории этот эффект полностью отсутствует). Но смешанная, тензорно-скалярная теория тяготения обсуждается и сейчас [36, 37], причем может считаться одним из альтернативных по отношению к общей теории относительности вариантов в теории гравитационного поля, при известных предположениях (речь идет о выборе параметров и т. п.), не противоречащих опыту и наблюдениям (см. также ниже).

Как известно, физические законы относительно $\bar{\Sigma}_1$ не отличаются от законов, отнесенных к Σ_2 ; это связано с тем, что в гравитационном поле все тела ускоряются одинаково. Поэтому при современном состоянии наших знаний нет никаких оснований полагать, что системы отсчета $\bar{\Sigma}_1$ и Σ_2 в каком-либо отношении отличаются друг от друга, и в дальнейшем мы будем предполагать полную физическую равноценность гравитационного поля и соответствующего ускорения системы отсчета.

Это предположение распространяет принцип относительности на случай равномерно ускоренного прямолинейного движения системы отсчета. Эвристическая ценность этого предположения состоит в том, что позволяет заменить однородное поле тяжести равномерно ускоренной системой отсчета, которая до известной степени поддается теоретическому рассмотрению».

Так началось создание теории, которую очень многие (в том числе и автор настоящей статьи) считают непревзойденной вершиной теоретической физики.

Уже в приведенном отрывке речь идет об однородном гравитационном поле и равномерно ускоренной системе отсчета, но нет и намека на возможность «исключить» с помощью выбора системы отсчета любое гравитационное поле. В следующей же статье ([38], 1911 г.), посвященной построению общей теории относительности, Эйнштейн специально подчеркивает: «Конечно, нельзя *любое* поле тяжести заменить состоянием движения системы без гравитационного поля, точно так же, как нельзя преобразовать все точки произвольно движущейся среды к покою посредством релятивистского преобразования».

Приведем еще одно замечание Эйнштейна на этот счет [39]: «Нельзя утверждать, что если в системе K' существует *произвольное* гравитационное поле, то всегда найдется такая система K , по отношению к которой изолированная масса движется прямолинейно и равномерно, т. е. в которой нет никакого поля тяжести. Абсурдность такого утверждения очевидна. Например, если поле тяжести в системе K' создается покоящейся материальной точкой, то это поле для всей области вокруг материальной точки невозможно исключить никакими преобразованиями системы координат. Никким образом нельзя также утверждать, что поле тяжести в какой-либо мере объясняется чисто кинематически: «кинематическое, нединамическое понимание гравитации» невозможно. Мы не можем получить *любое* гравитационное поле посредством простого ускорения одной галилеевой системы координат относительно другой, поскольку таким путем возможно получать поля только определенной структуры, которые, однако, должны подчиняться тем же законам, что и все другие гравитационные поля. Это еще одна формулировка принципа эквивалентности (специально для применения этого принципа к гравитации)».

Приведенные выдержки, число которых легко умножить, не оставляют, на наш взгляд (см. также [40]), ни малейших сомнений в том, что Эйнштейн никогда не придерживался «кинематического» понимания гравитации и тем самым рассматривал принцип эквивалентности как носящий, вообще говоря, лишь локальный характер.

Принцип эквивалентности — это утверждение о полной тождественности всех физических процессов и явлений в однородном поле тяготения и в соответствующей равномерно ускоренной системе отсчета, причем в общем случае речь идет о достаточно малых (бесконечно малых) пространственно-временных областях¹⁹). Из принципа эквивалентности следует равенство инертной массы $m_{\text{и}}$ и тяжелой массы $m_{\text{т}}$, так как в противном случае уже механические движения в ускоренной системе отсчета и в поле тяжести протекали бы неодинаково²⁰). Но обратное утверждение неверно. Равенство инертной и тяжелой масс обеспечивает, конечно, соблюдение принципа эквивалентности в области классической (нерелятивистской) механики, но отнюдь не гарантирует его всеобщей справедливости, например, в области оптических явлений. Чтобы показать, насколько может быть велика здесь разница, приведем такой пример [43]. В классической механике принцип относительности, т. е. эквивалентность всех инерциальных систем отсчета, справедлив при использовании преобразований Галилея (3). Но тот же принцип при распространении на оптику и «всю физику» справедлив лишь при использовании преобразований Лоренца. Переход от равенства $m_{\text{и}} = m_{\text{т}}$ к принципу эквивалентности аналогичен распространению принципа относительности классической механики на всю физику. Правда, доказанная в настоящее время огромная точность равенства $m_{\text{и}} = m_{\text{т}}$ (согласно [44], $|m_{\text{и}} - m_{\text{т}}|/m_{\text{и}} < 10^{-12}$) позволяет сделать косвенный вывод и о соблюдении принципа эквивалентности в теории электромагнитных и сильных (а частично и слабых) взаимодейст-

¹⁹) О возможном расширении этой области во времени см. [41, 42]. Заметим, что в связи с ограничением малыми областями эквивалентность влияния поля и ускорения системы отсчета не распространяется на эффекты типа приливных явлений, зависящих от вторых производных от гравитационного потенциала ϕ или, в более общем случае, от вторых производных метрического тензора g_{ik} .

²⁰) Напомним, что инертной массой называются величины $m_i = m_{\text{и}}$, фигурирующие в уравнениях движения (1). Согласно ньютоновскому закону всемирного тяготения в этом случае сила притяжения $F_{ik} = Gm_i m_k / r_{ik}^2$, причем здесь массы m_i и m_k — представляют собой уже «тяжелые массы» $m_{i\text{т}}$ и $m_{k\text{т}}$ — характеристики гравитационного взаимодействия. В силу равенства инертной и тяжелой масс при движении любого тела в гравитационном поле (при отсутствии всех других сил) масса тела выпадает (сокращается) из уравнения движения. Именно поэтому все тела в заданном поле тяжести падают с одинаковым ускорением.

ний, но это уже другой вопрос. К тому же, поскольку понятия об инертной и тяжелой массах вводятся в классической механике, они сами без дальнейшего имеют весьма ограниченный смысл, в силу чего равенство $m_{\text{и}} = m_{\text{т}}$ тем более неспособно заменить значительно более широкий принцип эквивалентности.

Все эти замечания представляются здесь уместными, поскольку принцип эквивалентности является буквально фундаментом, физической основой общей теории относительности («по моему разумению, моя теория покоится исключительно на этом принципе», — так высказался на этот счет Эйнштейн [39]). Помимо всего прочего, как же иначе понять, почему гравитационное поле должно описываться именно с помощью метрического тензора $g_{\mu\nu}$, характеризующего геометрию и систему отсчета, а не какими-то другими величинами? Естественно, что по такому пути, — вводя вместо g_{ik} или наряду с ним другие величины, — и пытаются развивать теории гравитационного поля, отличные от общей теории относительности (см. [36, 37, 43, 45]). Вместе с тем, если общая теория относительности уже построена, то соблюдение принципа эквивалентности в любой достаточно малой области гарантировано, и об этом принципе можно при желании забыть, «похоронить повивальную бабушку с соответствующими почестями» [46] (критические замечания, касающиеся роли принципа эквивалентности, см. также в [16, 17]). Как ясно из сказанного, автор (как и большинство физиков; см., например, [12, 15, 42, 47—50]) ни в коей мере не разделяет такое мнение и придерживается точки зрения Эйнштейна.

Вернемся к основной для нас теме — вопросу о системах отсчета.

В силу принципа эквивалентности (а все известные данные его подтверждают, причем в ряде случаев с фантастической точностью [44]) нельзя отличить инерциальную систему от равномерно ускоренной системы (с ускорением g относительно инерциальной системы), в которой имеется однородное гравитационное поле, сообщающее телам ускорение — g . В обоих этих случаях изолированное тело будет двигаться по инерции (т. е. без ускорения). Тем самым частный принцип относительности (эквивалентность всех инерциальных систем отсчета) действительно расширяется²¹). Или, что в данном случае одно и то же, инерциальные системы нельзя отличить от значительно более широкого класса систем с постоянным ускорением и одновременно гравита-

²¹) Однородное во всем пространстве гравитационное поле и бесконечно протяженная равномерно ускоренная система отсчета — это абстракции, ограниченное значение которых в полной мере выяснила как раз общая теория относительности. Но с точки зрения критики классической механики, что не вводилось никаких ограничений на размеры систем отсчета, приведенное замечание представляется вполне убедительным.

ционном поле (в этой связи инерциальные системы можно также назвать ненаблюдаемыми [51]). Но это только начало, поскольку общая теория относительности, после того как она построена, обобщает классическую механику и теорию тяготения, содержит их как предельный случай и при этом не вводит и не использует инерциальных систем отсчета (для конечных, а тем более для неограниченно больших областей пространства-времени). «Истинное», неустранимое выбором системы отсчета гравитационное поле существует, но имеет такую же природу, как и ньютоновские силы инерции или однородное поле, и проявляется, согласно общей теории относительности, в неевклидовости (в появлении кривизны) пространства-времени. Этот важнейший момент заслуживает, конечно, более подробного обсуждения, что и делается во всех книгах (в том числе популярных), посвященных общей теории относительности. Здесь от такого обсуждения придется отказаться, ограничившись замечанием, что в неевклидовом (римановом) пространстве «пробное тело» (материальная точка, гравитационное поле которой достаточно слабо) при отсутствии сил, например электромагнитных, движется по геодезической линии. В пространствах с различной кривизной (в разных гравитационных полях) геодезические линии тоже, разумеется, разные, т. е. не имеет места универсальное в классической механике равномерное и прямолинейное движение по инерции.

Итак, в общей теории относительности, если не говорить о приближениях и предельных случаях, не существует привилегированных, инерциальных систем отсчета. В соответствии с этим теория развивается на основе уравнений, имеющих одинаковую (ковариантную) форму для очень широкого класса возможных систем отсчета. Поскольку ни одна из этих систем, вообще говоря, «не лучше» (не более привилегирована), чем другие, возникает равноправие всех систем. Именно на такой основе возникли термин «общий принцип относительности» и название «общая теория относительности». Несомненно, равноправие инерциальных систем (частный принцип относительности) имеет и другой смысл, можно сказать, имеет позитивное содержание: при одинаковых начальных условиях тело описывает во всех системах одинаковую траекторию (ограничиваемся этим простейшим примером). В произвольных же системах отсчета траектории при заданном движении тела тоже весьма произвольны. Но коль скоро не существует системы отсчета, а тем более бесконечного семейства систем отсчета с какими-то исключительными, выделенными свойствами, опять же возникает равноправие всех систем, хотя и другое (если угодно, равноправие негативного характера; см. также [37], стр. 306). Все это хотелось бы резюмировать словами самого Эйнштейна: «Пусть K — инерциальная система без поля тяжести, K' — система координат, равномерно ускоренная относительно K . Тогда

поведение материальных точек по отношению к K' будет таким же, как если бы K' была инерциальной системой, в которой существует однородное поле тяготения. Таким образом, в свете известных из опыта свойств поля тяжести определение инерциальной системы оказывается несостоятельным. Напрашивается мысль о том, что каждая, любым образом движущаяся система отсчета, с точки зрения формулировки законов природы, равноценна любой другой и что, следовательно, для областей конечной протяженности вообще не существует физически выделенных (привилегированных) состояний движения (общий принцип относительности). Последовательное проведение этой идеи требует еще более глубокого видоизменения геометрико-кинематических основ теории, чем специальная теория относительности... Обобщая, приходим к следующему результату: поле тяготения и метрика представляют собой лишь различные формы проявления одного и того же физического поля» [52].

Из приведенных отрывков из статей Эйнштейна уже ясно естественное происхождение названия — общая теория относительности. Разумеется, это есть теория гравитационного поля, но вполне определенная теория такого поля, основанная на введении лишь метрического тензора g_{ik} и на конкретных уравнениях для g_{ik} . Чтобы отличать эту теорию от многих других известных [36, 37, 45], пусть и несравненно менее совершенных (во всяком случае, по нашему мнению), нужно было бы пользоваться термином «теория гравитационного поля Эйнштейна, или теория тяготения Эйнштейна». Так иногда и поступают, что не может встретить никаких возражений. Нам хотелось бы в этой связи лишь подчеркнуть, что и название «общая теория относительности» вполне закономерно и нет оснований от него отказываться, не говоря уже о том, что замена этого названия представляется практически невозможной в силу установившейся традиции.

К сожалению, вопросы терминологии и словопотребления столь тесно переплетаются с существенными проблемами, что нередко мешают обсуждению этих проблем, навязывают форму дискуссии, заставляют спорить о словах. Правда, вопрос о названии теории (и конкретно о названии «общая теория относительности») столь явно терминологический, что не может породить расхождений по сути дела. Но этого, по-видимому, нельзя сказать о проблеме существования в общей теории относительности привилегированных систем отсчета. Мнение Эйнштейна на этот счет совершенно ясно уже из последнего цитированного нами отрывка. Нужно только пояснить, что оговорка об отсутствии привилегированных систем «для областей конечной протяженности» весьма важна. Для достаточно малых (формально, для бесконечно малых) областей пространства-времени в общей теории относительности, конечно, существует привилегированная система отсчета —

имеется в виду свободно падающая локально-инерциальная система отсчета (система отсчета в «падающем лифте»), в которой нет сил тяготения и справедлива частная теория относительности. Но такие системы не только локальны, но и не совпадают с инерциальными системами классической механики, по идее отнюдь не являющимися локальными и допускающими присутствие сил тяготения.

Для областей же конечной протяженности в общем случае мы не видим никакого подлинного аналога инерциальных систем, никаких систем, столь же «привилегированных». Но здесь-то и возникает возможность терминологических разногласий. Исследование конкретных физических задач всегда связано с каким-то упрощением, приближением, с идеализацией ситуации. Если, например, речь идет о динамике Солнечной системы, то в силу малости ускорения Солнца в Галактике, малой массы планет и малой угловой скорости вращения Солнца естественно воспользоваться центрально-симметричной системой отсчета, связанной с центром Солнца, евклидовой (галилеевой) на бесконечности и не учитывающей вращения Солнца (это обстоятельство, собственно, уже отражено в предположении о сферической, а не об аксиальной симметрии задачи). Соответствующая система отсчета и полученные в ней решения уравнений поля (особенно решение Шварцшильда) очень широко используются. В последнее время в применении к изолированным быстро вращающимся звездам и черным дырам все шире исследуется и используется аксиально-симметричная система отсчета и полученные в ней решения (в первую очередь речь идет о решении Керра; см. [53]). В космологии, при анализе космологических моделей, применяются в основном сопутствующие системы отсчета, в которых среднее по большим объемам распределение вещества покоится; при этом усреднение плотности вещества производится по объемам, содержащим много галактик и скоплений галактик. Все эти системы можно назвать привилегированными, они таковыми и являются в рамках используемых приближений и ограничений. Но совершенно очевиден частный характер такой привилегированности, сугубо отличный от той привилегированности, которой наделяла инерциальные системы классическая механика.

Последнее, по нашему убеждению, полностью относится и к так называемым гармоническим системам координат, которые В. А. Фок считает «привилегированными» до такой степени, что, только признав принципиальное значение существования привилегированной гармонической координатной системы, «можно говорить о правильности гелиоцентрической системы Коперника в том же смысле, в каком это было возможно в механике Ньютона. Непризнание же привилегированных координатных систем ведет к той точке зрения, согласно которой гелиоцентрическая

система Коперника и геоцентрическая система Птолемея будто бы равноправны» ([17], стр. 475).

Уравнения Эйнштейна для гравитационного поля (для метрического тензора g_{ik}) записаны в произвольной (в широких пределах) системе координат или, как говорят, являются общековариантными. Поэтому четыре координаты x_i можно подвергнуть произвольным преобразованиям и тем самым выбрать четыре из десяти компонент тензора g_{ik} . Другими словами, только шесть компонент g_{ik} являются независимыми и, следовательно, помимо уравнений поля, на g_{ik} можно наложить четыре дополнительных «координатных условия» (подробнее см., например, [12, 17, 46—48]). К числу таких координатных условий и принадлежат гармонические условия, введенные еще в 1921 г. [54] и с тех пор часто применяемые (особенно см. [17] и цитированную там литературу). Эти условия имеют вид ²²⁾

$$\frac{\partial \sqrt{-g} g^{ik}}{\partial x_i} = 0, \quad (4)$$

где g^{ik} — контравариантные компоненты тензора $g_{ik}(x_j)$ и g — определитель, состоящий из величин g_{ik} ($i, k = 0, 1, 2, 3$).

Для изолированной совокупности тел при условии, что метрика галилеева на бесконечности, и при соблюдении условия излучения (т. е. при отсутствии гравитационных волн, приходящих извне к рассматриваемой системе тел) гармонические условия (4) однозначно определяют координатную систему с точностью до лоренцева преобразования (с постоянными коэффициентами) ²³⁾. По последней причине ускорение частицы во всех гармонических системах одинаково, как и в случае всех инерциальных систем отсчета классической механики. Именно это обстоятельство роднит гармонические и инерциальные системы. Тем не менее гармонические системы остаются бледной тенью инерциальных систем. Действительно, последние вводились во всем пространстве и без всяких ограничений. Гармонические же системы определяют координатную систему с точностью до лоренцева преобразования раньше всего в предположении, что на бесконечности пространство является галилеевым, т. е. евклидовым (точнее, псевдоевкли-

²²⁾ Последующая весьма небольшая часть настоящего раздела, посвященная вопросу о гармонических условиях, поневоле написана на другом «техническом» уровне, чем статья в целом. Эта часть раздела может быть пропущена читателями; ее содержание составляет аргументация, согласно которой, по нашему мнению, введение гармонических координат не имеет принципиального значения.

²³⁾ Нам неясно, впрочем, справедливо ли доказательство [17] однозначности гармонических систем с точностью до лоренцевых преобразований при наличии особенностей, имеющих место в решениях Шварцшильда и Керра, а также, несомненно, и в более общих решениях, которые нужно рассматривать в случае коллапсирующих масс.

довым, если говорить о пространстве-времени). Но это практически то же самое, что и предположение о существовании инерциальных систем «на бесконечности», для которого нет абсолютно никаких оснований (более того, в космологии обычно рассматриваются модели, не обладающие таким свойством). Нет оснований также считать, что к рассматриваемой системе тел не приходит извне гравитационное излучение. Конечно, при приближенной постановке задачи это допущение, как и евклидовость метрики на бесконечности, часто вполне естественно и разумно. Но в том-то и дело, что в классической механике инерциальные системы были отнюдь не приближенным понятием. Наконец, инерциальные системы выделялись в классической механике по вполне определенным физическим признакам (по отсутствию сил инерции или эквивалентным образом). А имеют ли какое-либо физическое значение, кроме упомянутого ранее, условия (4)? В этом отношении системы отсчета, в которых имеется статическое гравитационное поле в случае сферической массы (решение Шварцшильда) или стационарное гравитационное поле вне вращающейся массы (решение Керра), можно считать «привилегированными» с гораздо большим основанием. Добавим, что условия гармоничности (4) близки по форме к известному условию — лоренцевой калибровке, накладываемой в псевдоевклидовом пространстве на потенциалы электромагнитного поля $A_i = \{A_1, A_2, A_3, A_0 = \varphi\}$. Эта калибровка имеет вид

$$\frac{\partial A_i}{\partial x_i} = \operatorname{div} \mathbf{A} + \frac{1}{c} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0; \quad (5)$$

в условиях, аналогичных используемым для определения гармонической системы координат, калибровка (5) однозначно определяет некоторый потенциал A_i при известных электрическом $\mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \operatorname{grad} \varphi$ и магнитном $\mathbf{H} = \operatorname{rot} \mathbf{A}$ полях. Но, как это хорошо известно, столь же успешно можно использовать, например, кулоновскую калибровку $\operatorname{div} \mathbf{A} = 0$, которая часто даже удобнее. Во всяком случае, в силу того, что при условии (5) и некоторых дополнительных предположениях можно ввести однозначный потенциал \mathbf{A} , никто не считает такой потенциал «привилегированным».

В общем, если не сводить дело к спору о смысле термина «привилегированная система отсчета», ситуация представляется достаточно ясной. Классическая физика вкладывала в понятие привилегированной инерциальной системы отсчета некоторый абсолютный смысл. Уже в недрах классической механики эта абсолютная привилегированность была метафизическим понятием, но сохранялась по ряду причин (в частности, в связи с понятием о неподвижном эфире). Частная теория относительности нанесла

еще один удар метафизической выделенности и привилегированности инерциальных систем, а общая теория относительности окончательно выяснила их приближенный и ограниченный характер. И никакой возврат к прошлому здесь, как и обычно в таких случаях, уже невозможен. Вводимые в рамках общей теории относительности системы координат одни удобнее в данном случае, другие более целесообразны в других условиях. Гармонические координаты принадлежат к числу таких широко используемых, часто весьма удобных координатных систем, но занять место инерциальных систем классической физики они никак не могут.

Что же касается спора «Птолемей — Коперник», то, как мы старались показать в предыдущих разделах статьи, его лишь с большой натяжкой вообще можно связать с вопросом о динамической привилегированности тех или иных систем отсчета. Если же это тем не менее сделать, то все равно нужно иметь в виду, что обе системы — гелиоцентрическая и геоцентрическая — не могут считаться инерциальными, хотя гелиоцентрическая система и значительно ближе к этому идеалу. Общая теория относительности здесь, непосредственно, не внесла ничего нового, она лишь выяснила, что упомянутый идеал принципиально недостижим, ибо его — строго инерциальных систем отсчета в конечных пространственно-временных областях — в природе вообще не существует. При этом поправки, связанные с учетом эффектов общей теории относительности, в пределах Солнечной системы очень малы даже по современным масштабам — они характеризуются параметром φ/c^2 , который даже на поверхности Солнца равен

$$\frac{|\varphi|}{c^2} = \frac{GM_{\odot}}{r_{\odot}c^2} = 2,12 \cdot 10^{-6}. \quad (6)$$

Здесь φ — ньютоновский потенциал сил тяготения, $G = 6,67 \cdot 10^{-8}$ см³/г·с² — гравитационная постоянная, $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33}$ г — масса Солнца и $r_{\odot} = 7 \cdot 10^{10}$ см — радиус солнечной фотосферы.

Единственный замеченный релятивистский эффект в отношении планет Солнечной системы — поворот перигелиев планет. Этот эффект больше всего для ближайшей к Солнцу планеты — для Меркурия, причем он составляет 43 угловых секунды в столетие, что в 12,5 раза меньше аналогичного поворота перигелия Меркурия в результате возмущений, вызванных другими планетами. Для Земли релятивистский поворот перигелия орбиты (т. е. ближайшей к Солнцу точки орбиты) составляет всего 3,8 угловой секунды в столетие. За это же время Земля, очевидно, делает сто полных оборотов вокруг Солнца, что соответствует повороту на $1,296 \cdot 10^8$ угловых секунд. Речь для Земли идет, таким образом, об эффекте порядка 10^{-8} (для земной орбиты как раз $|\varphi|/c^2 \approx GM_{\odot}/(Rc^2) \approx v_{\oplus}^2/c^2 = 10^{-8}$, где $R = 1,5 \cdot 10^{13}$ см — радиус

орбиты и $v_0 = 3 \cdot 10^8$ см/с — скорость Земли по орбите). Этот эффект так мал, что до сих пор его не удалось выделить на «фоне» других возмущений, которым подвержено движение Земли. Для Меркурия некоторый поворот перигелия, неизвестной тогда природы, был выявлен в XIX в. и объяснен лишь Эйнштейном в 1915 г. на основе общей теории относительности.

Совершенно очевидно, что не только Коперник, Галилей и Кеплер, но и Ньютон должны были думать о согласовании теории движения планет и наблюдений лишь с точностями, несравненно меньшими, чем необходимые при выделении релятивистских эффектов. Столь же понятна поэтому и возможность в те времена абсолютизировать инерциальные системы отсчета. Понятно, наконец, почему мы широко пользуемся приближенно инерциальными системами сегодня и почему ими всегда будут пользоваться. Труднее объяснить, по каким причинам через много лет после создания общей теории относительности все еще иногда не только стремятся сохранить какие-то «принципиально» привилегированные системы отсчета, подобные строго инерциальным системам, но и связывают с этим стремлением давно решенный вопрос об историческом, астрономическом и физическом значении труда Коперника. Для этого так же мало оснований, как и для утверждений, что общая теория относительности вообще как-то принципиально изменила оценку существа споров между коперниканцами и их противниками.

Выше мы не коснулись вопросов об абсолютности вращения и о принципе Маха, несмотря на их тесную связь с обсуждавшимися проблемами. Нужно отметить, что принцип Маха не только широко дискутировался в период создания общей теории относительности [55 — 58] и вскоре после этого [30, 59], но и продолжает привлекать внимание, причем по-разному оцениваться до сих пор [37, 49, 60]. Тем не менее придется ограничиться здесь лишь несколькими замечаниями на этот счет.

Ньютоновское «абсолютное пространство» особенно вышукло выступает в качестве источника или причины механического воздействия в случае вращения тел. Ньютон обсуждал этот вопрос на примере сосуда (ведра) с водой, вращающегося вокруг своей оси. Эйнштейн в своей статье [56], в известной мере завершившей в 1916 г. построение общей теории относительности (все основные результаты были, правда, получены на год раньше), пользуется другим примером — рассматривает два жидких тела, парящих в пространстве, причем одно из тел вращается относительно инерциальной системы отсчета. Поверхность этого вращающегося тела будет эллипсоидом вращения, в отличие от сферической поверхности покоящегося тела. В опытах с ведром вращение вызывает изменение поверхности воды. Причиной сплющивания вращающейся массы или изменения формы поверхности воды в ньютонов-

ской механике выступает абсолютное пространство, вращение относительно него. Аналогичен и опыт Фуко, в котором пространство «удерживает» плоскость колебаний маятника. Поскольку абсолютное пространство не было наделено никакими другими наблюдаемыми функциями, его действие, скажем, на маятник или вращающуюся жидкость рассматривалось Махом (имевшим в этом отношении таких предшественников, как Лейбниц и Беркли) как неудовлетворительное, фиктивное объяснение. Мах подчеркнул также то весьма важное и ниоткуда не вытекающее обстоятельство, что в инерциальных системах (фиксированных с помощью законов механики в применении ко всем телам Солнечной системы) звезды неподвижны (именно поэтому, конечно, в астрономии широко применяется система отсчета с осями, направленными на «неподвижные звезды») [61]. В настоящее время этот факт установлен с огромной точностью, составляющей 0,4 угловой секунды в столетие (см. [62]). Следующим шагом Маха было предположение, что такое совпадение систем отсчета, выделенных динамически (закон инерции и т. п.) и кинематически (по отсутствию вращения удаленных масс), не является случайным, и роль абсолютного пространства как раз и играют все удаленные массы (звезды, галактики). Эти массы создают как бы «поле инерции» или «направляющее поле» (Führungsfeld), обеспечивающее постоянство плоскости колебаний маятника Фуко и появление сил инерции в ускоренных системах отсчета.

Эта аргументация Маха в период создания общей теории относительности оказала на Эйнштейна несомненное влияние [55, 56]. Но постепенно его позиция трансформировалась [57, 58, 30, 35], и в опубликованных в 1949 г. (по поводу 70-летнего юбилея) «Автобиографических заметках» Эйнштейн пишет: «По мнению Маха, в действительно рациональной теории инертность должна, подобно другим ньютоновским силам, происходить от взаимодействия масс. Это мнение я долгое время считал в принципе правильным. Оно неявным образом предполагает, однако, что теория, на которой все основано, должна принадлежать к тому же типу, что и ньютонова механика: основными понятиями в ней должны служить массы и взаимодействия между ними. Между тем нетрудно видеть, что такая попытка решения не вяжется с духом теории поля» [35].

И действительно, мы наблюдаем непосредственно не звезды, а то, что можно назвать «звездным компасом» (Sternenkompass) — совокупность световых лучей, давным-давно испущенных звездами. Конечная скорость распространения света (и всех других, в том числе и гравитационных возмущений), дух теории поля — близкое действие — все это решительно не позволяет непосредственно связывать инерцию («направляющее поле») с удаленными массами. Правда, некоторая связь здесь возможна (об этом речь

ниже), но на вопрос о причинах постоянства плоскости колебаний маятника Фуко именно в определенных системах отсчета, на вопрос о природе сил инерции в ускоренных системах можно дать лишь один ответ: все дело в гравитационном поле, это гравитационное поле и есть, в частности, «направляющее поле», обеспечивающее движение по инерции. Пониманию этого факта препятствовало (и иногда препятствует даже теперь) то обстоятельство, что в классической механике в основе лежит понятие силы, и, в частности, гравитационное поле считается отсутствующим при отсутствии силы тяжести. Движение же по инерции считается свободным, происходящим при отсутствии поля. В общей же теории относительности гравитационное поле описывается метрическим тензором $g_{ik}(x_j)$, а движение «пробного тела» в таком поле всегда есть движение по инерции (движение по геодезической линии). В частном случае галилеевой метрики ($g_{00} = 1, g_{11} = g_{22} = g_{33} = -1$), описывавшей инерциальную систему, геодезическими линиями являются прямые: классическое движение по инерции есть движение в галилеевом гравитационном поле, т. е. данное конкретное поле (галилеево поле) является причиной движения именно по инерции (равномерного движения по прямой линии; разумеется, все другие поля считаются отсутствующими). Последняя формулировка отличалась бы от старой (ньютоновской) лишь по форме, если бы не тот фундаментальный факт, что в общей теории относительности поле $g_{ik}(x_j)$ не является заданным, внешним и неизменным, напротив, вещество влияет на это поле, меняет его, а поле в свою очередь влияет на вещество. В этой связи «вращение относительно гравитационного поля» отлично от абсолютного вращения (вращения относительно абсолютного пространства) уже потому, что абсолютное пространство было одно, а гравитационных полей может быть бесконечное множество. Конкретно, вблизи вращающейся достаточно массивной коллапсировавшей звезды (вращающейся «черной дыры») ²⁴⁾ плоскость колебаний маятника Фуко на какой-то «планете» или ось гироскопа удерживаются не везде в одном и том же положении, а в положении, зависящем от координат точки наблюдения относительно звезды и оси ее вращения (дело здесь во влиянии собственного гравитационного поля, обусловленного вращением звезды). Нечто аналогичное, впрочем, можно сказать и в отношении всех локально-инерциальных систем отсчета, а также вращения в этих системах.

Итак, на место абсолютного пространства и пространства «вообще» пришло гравитационное поле. «Согласно общей теории относительности не существует отдельно пространство как нечто

²⁴⁾ В принципе можно, конечно, рассматривать и вращающуюся планету (скажем, Землю) или обычную звезду, но в этом случае соответствующий эффект просто очень мал.

противоположное тому, что заполняет пространство и что зависит от координат. Таким образом, чисто гравитационное поле может быть описано с помощью g_{ik} (как функций координат) путем решения уравнений гравитации. Если мы представим себе, что гравитационное поле устранено, то не останется не только пространства типа (1)²⁵), но вообще *ничего*, в том числе и «топологического пространства». В самом деле, функции g_{ik} описывают не только поле, но и в то же самое время топологические и метрические структурные свойства многообразия. Пространство типа (1) с точки зрения общей теории относительности не есть пространство без поля, но представляет собой частный случай поля g_{ik} , когда в определенной системе координат, которая сама по себе не имеет объективного значения, функции g_{ik} имеют значения, не зависящие от координат. Пустое пространство, т. е. пространство без поля, не существует. Пространство-время существует не само по себе, но только как структурное свойство поля» [63] (см. также статью [30]).

В рамках теории поля идея Маха (и других) о роли удаленных масс может обсуждаться лишь с точки зрения роли этих масс при создании поля. В согласии с этим Эйнштейн в 1918 г. сформулировал: «Принцип Маха: G -поле (т. е. гравитационное поле g_{ik} — В. Г.) *полностью* определено массами тел» [58]. Далее следовало пояснение, что необходимость придерживаться принципа Маха «отнюдь не разделяется другими авторами, но я и сам считаю, что выполнение его не обязательно. По принципу Маха, согласно уравнениям гравитационного поля, не должно существовать никакого G -поля без материи. Очевидно, что постулат «b» (принцип Маха. — В. Г.) тесно связан с вопросом пространственно-временной структуры мира как целого, так как в порождении G -поля принимают участие все массы».

Уравнения общей теории относительности такому принципу Маха не удовлетворяют (это выяснилось после опубликования статьи [58], в которой Эйнштейн полагал, что принципу Маха удовлетворяют уравнения с Λ -членом, введенные в статье [57]). Естественность такого результата ясна на примере электродинамики: применение в этом случае требования, аналогичного сформулированному выше принципу Маха, означает требование об отсутствии всех соответствующих электромагнитным волнам свободных решений уравнений поля. В теории гравитационного поля также существуют свободные решения (гравитационные волны и другие решения), появляющиеся и при отсутствии вещества (включая сюда и электромагнитное поле). Тем не менее, как мы уже от-

²⁵) Выражение (1) в статье [63] — это галилеева метрика $ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - dx_4^2$.

мечали, принцип Маха продолжает довольно широко обсуждаться в различных формулировках как некоторый космологический принцип или принцип отбора решений, как требование к граничным условиям в теории гравитации и т. д. (см. [37, 60]; ситуацию неплохо отражает заглавие одной из статей в сборнике [37]: «Многоликий Мах»). Но все эти вопросы хотя и интересны, но не относятся к нашей теме и здесь нет оснований касаться их подробно.

Статьи, подобные настоящей, всегда до какой-то степени поверхностны, ибо они касаются общих идей и результатов, оставляя в тени весь математический аппарат, всю технику, необходимую для материализации идей и получения результатов. Между тем роль аппарата, математики в количественных теориях огромна, без этого многое невозможное кажется возможным и нет подлинных критериев отбора. В этом отношении представляется вполне справедливым замечание Куна (см. [3], стр. 184), что если бы «первая космологическая книга труда Коперника появилась одна (т. е. не сопровождалась другими книгами, содержащими астрономические расчеты. — В. Г.), коперниканская революция была бы известна под чьим-нибудь другим именем». То же можно сказать об общей теории относительности. Критика ньютоновской механики, принцип эквивалентности, общая идея о связи геометрии с материей — все то, чего мы выше касались, это еще не общая теория относительности: изумительно стройная, но и математически очень сложная количественная теория гравитационного поля. Чтобы прийти к этой теории в ее законченном виде, потребовался поистине титанический труд: «Позади остались долгие годы поисков в темноте, полных предчувствий, напряженное ожидание, чередование надежд и изнеможения и, наконец, прорыв к ясности» [34].

Еще в 1910 г., когда общей теории относительности не существовало и в этом направлении был сделан только первый шаг, Эйнштейном было так много сделано в физике, что другой великий физик, М. Планк, назвал его «Коперником 20-го столетия». После создания общей теории относительности сопоставление Эйнштейна с Коперником и Ньютоном стало нормой и, таким образом, подзаголовок к настоящей статье отнюдь не оригинален. Если следовать «букве» этого подзаголовка, то статью можно было бы на этом и закончить. Но поступить так было бы неверно, на наш взгляд, в свете реальной ситуации в современной физике и астрономии. Эта ситуация характеризуется огромным вниманием к общей теории относительности, которая только теперь «заработала» во всю свою мощь. Поэтому мы постараемся хотя бы весьма кратко и конспективно упомянуть о современных проблемах, возникающих в связи с общей теорией относительности, ее применениями и развитием.

7. СОВРЕМЕННОСТЬ

Своеобразие исторической судьбы общей теории относительности объясняется, по-видимому, в первую очередь тем, что эта теория в известном смысле опередила свое время. Действительно, стимулом для создания общей теории относительности послужила не необходимость устранить какие-то жгучие противоречия или объяснить совершенно непонятные явления, как это было в случае квантовой теории. Напротив, ньютоновская теория всемирного тяготения в общем прекрасно справлялась с астрономическими задачами того периода и, насколько нам известно, небольшой необъясненный поворот перигелия Меркурия и космологический парадокс Зеелигера никем не рассматривались как основание для пересмотра теории Ньютона. Такой пересмотр, точнее обобщение, диктовался лишь общетеоретическими соображениями о необходимости привести теорию тяготения в соответствие с частной теорией относительности (или, лучше сказать, с требованием конечности скорости распространения гравитации), а также критикой некоторых слабых сторон классической механики и, наконец, стремлением понять причину равенства инертной и тяжелой масс. Об этом уже была речь выше, сейчас мы лишь дополнительно поясняем, почему общая теория относительности при всей ее глубине и значительности дала сравнительно мало для экспериментальной физики и наблюдательной астрономии, особенно по сравнению с вкладом частной теории относительности и квантовой теории. Эйнштейн объяснил поворот перигелия Меркурия и предсказал еще два наблюдаемых эффекта: гравитационное смещение частоты излучения и отклонение световых лучей при их прохождении вблизи Солнца. Это отклонение при прохождении луча даже непосредственно вблизи солнечного диска составляет лишь 1,75 угловой секунды (под таким углом человек виден на расстоянии порядка 200 км, т. е., скажем, со спутника Земли). Предсказанное теорией отклонение впервые наблюдалось в 1919 г. во время полного солнечного затмения (только в таких условиях оптические наблюдения эффекта возможны и до сих пор), что явилось триумфом общей теории относительности и принесло ей огромную популярность. Но шли десятилетия, а заметно повысить точность измерений не удавалось, в результате чего формула Эйнштейна для отклонений лучей света в поле Солнца и до сих пор проверена лишь с точностью порядка 10%. Однако уже удалось (см. [446]) провести более точные измерения для радиоизлучения квазаров, причем наблюдаемое отклонение лучей сходится с вычисленным по формуле Эйнштейна с точностью порядка 1% ²⁸⁾. Долгие годы искали и наблюдали грави-

²⁸⁾ В настоящем разделе мы не предполагаем давать много ссылок на современную литературу, которая огромна. Поэтому в отношении экспери-

тационное (красное) смещение) частоты в спектре Солнца, но результаты оставались противоречивыми вплоть до недавнего времени, когда как для Солнца, так и для Земли (с помощью гамма-лучей и эффекта Мессбауэра), результат общей теории относительности был подтвержден с весьма скромной точностью порядка 1% (кстати сказать, этот эффект следует по существу уже из принципа эквивалентности и малочувствителен к более конкретной форме теории). Что же касается поворота перигелия Меркурия, самого тонкого и чувствительного к форме теории из всех упомянутых трех эффектов, то долгое время совпадение в этом случае теории с наблюдениями с точностью до 1% считалось лучшим подтверждением общей теории относительности. В дальнейшем (в шестидесятые годы) возникли некоторые сомнения по этому поводу, в связи с предположением о существовании у Солнца значительного квадрупольного момента, вызывающего заметное изменение орбиты Меркурия. В настоящее время, однако, есть все основания считать, что квадрупольный момент Солнца достаточно мал и вытекающее из общей теории относительности значение для поворота перигелия Меркурия действительно сходится с наблюдениями (в пределах достигнутой точности измерений, составляющей около 1%).

В последние годы появились некоторые, хотя и предварительные, но более точные результаты и, главное, разрабатываются различные проекты, которые позволят проверить общую теорию относительности в слабых полях (в Солнечной системе) с точностью до долей процента или даже до 0,01%. Однако в целом процесс в области проверки общей теории относительности за шестьдесят лет нельзя назвать особенно впечатляющим, особенно в связи с тем, что происходило это на фоне несравненно более яркого и радикального развития атомной и ядерной физики, зародившейся в тот же период (имеем в виду модель атома Резерфорда — Бора). Причина, разумеется, весьма проста — дело раньше всего в малости эффектов общей теории относительности в пределах Солнечной системы. Как уже упоминалось, речь идет об эффектах порядка $|\varphi|/c^2 \sim 10^{-6}$ для Солнца (см. (6)), $\sim 10^{-8}$ на земной орбите и $|\varphi|/c^2 = GM_{\oplus}/(r_{\oplus} c^2) = 7 \cdot 10^{-10}$ на Земле (здесь $M_{\oplus} = 6 \cdot 10^{27}$ г — масса Земли и $r_{\oplus} = 6,37 \cdot 10^8$ см — ее радиус). Кроме того, существенно, конечно, что доступные точность наблюдений и экспериментальные возможности не позволяли здесь продвинуться далеко вперед, например измерять эффекты порядка $(\varphi/c^2)^2$.

ментальной проверки общей теории относительности ограничимся упоминанием уже цитированных источников [12, 14, 36, 37, 43—45, 48], а также помещенной ниже в настоящем сборнике другой статьи автора (стр. 157). Аналогичным образом будем стараться поступать и в дальнейшем.

Эффекты общей теории относительности и соответственно отклонения от ньютоновской механики велики в сильных гравитационных полях, когда параметр $| \varphi | / c^2$ не мал. В 40-е годы было начато теоретическое изучение таких релятивистских объектов — нейтронных звезд и коллапсирующих звезд (черных дыр), но они вышли на авансцену астрофизики лишь еще через тридцать лет, в наши дни.

Подлинный успех общей теории относительности, успех огромного принципиального значения, оказался ранее связанным только с космологией. Это и понятно: гравитационное поле во Вселенной «в целом» является сильным, и как теоретически рассматривать модели Вселенной, раньше вообще оставалось неясным. Современная космология родилась поэтому на основе общей теории относительности в 1917 г., когда Эйнштейн предложил свою статическую, но замкнутую космологическую модель [57]. Последующие теоретические работы де Ситтера, Фридмана, Леметра и других, а также наблюдения ряда астрономов (в первую очередь Хаббла) показали, что эта модель является лишь одной из огромного числа возможных и, главное, не отвечает наблюдениям, свидетельствующим о расширении Вселенной. Теория расширяющейся Вселенной, связанные с ней космологические исследования — одно из крупнейших научных завоеваний нашего века. Но и эта проблема, как и вся космология, до недавнего времени оставалась несколько изолированной даже в астрономии. Причина та, что с конца 20-х годов, когда было доказано существование космологического красного смещения, свидетельствующего о расширении Вселенной, приток новых данных, важных для развития космологии, на долгие годы почти прекратился в связи с отсутствием адекватных средств для их получения. Если еще раз подчеркнуть, что в области атомной и ядерной физики, в области изучения «элементарных частиц», ситуация была совсем иной, станет понятным тот факт, что еще лет пятнадцать — двадцать назад общей теорией относительности занимались очень немногие, ее практически не преподавали студентам, она до какой-то степени превратилась для широких кругов физиков и астрономов в прекрасное произведение древнего искусства. О нем полагается знать, им полагается восхищаться, но само оно находится где-то далеко, в музее.

Положение существенно изменилось в последние два десятилетия в результате бурного развития астрономии (включая сюда соответствующие космические исследования). Астрономия, оставшаяся оптической астрономией со времени ее зарождения в древности и практически до конца второй мировой войны, на наших глазах превращается, а до известной степени уже превратилась во всеволновую астрономию. Радиодиапазон уже стал в астрономии равноправным партнером с оптическим диапазоном; сейчас особенно успешно происходит освоение рентгеновского диапазона,

ведутся исследования в области инфракрасного, ультрафиолетового и гамма-диапазонов электромагнитного излучения. Развивается астрофизика космических лучей, первые шаги делают нейтринная астрономия и астрономия гравитационных волн.

Появление широчайших новых наблюдательных возможностей не замедлило привести к блестящим астрономическим открытиям. Не является поэтому преувеличением, когда современный этап в развитии астрономии характеризуют как астрономическую революцию (по нашему мнению, это всего лишь вторая революция такого масштаба за всю историю астрономии, первая была связана с именем Галилея, начавшего телескопические наблюдения). Здесь не место подробнее останавливаться на развитии астрономии в наши дни, мы хотим лишь подчеркнуть, что именно в результате этого развития многие проблемы, связанные с общей теорией относительности, оказались в центре внимания.

Общая теория относительности стала в настоящее время, в шестидесятилетнем возрасте, путеводной звездой и рабочим, повседневным инструментом для широкого круга астрономов и физиков. Перечислим основные направления ведущихся исследований.

1. *Экспериментальная проверка общей теории относительности.* В этой области ведется (включая подготовку) интенсивная работа с привлечением современных методов (пассивная и активная радиолокация, в частности с использованием искусственных спутников Марса, радиоастрономическая интерферометрия, новые оптические методы и др.). В ближайшее десятилетие можно рассчитывать на то, что общая теория относительности будет, наконец, проверена в пределах Солнечной системы с точностями сотых долей процента вместо примерно процента в настоящее время (речь идет о точности совпадения данных измерений с вычисленными величинами). Тем самым будут отмечены некоторые альтернативные по отношению к общей теории относительности теории гравитации, которые еще обсуждаются сегодня (согласно наиболее известной из них — теории тензорно-скалярного типа [36, 37], некоторая часть s от веса тела связана со скалярным полем и только остальная, хотя и основная, часть веса определяется метрическим полем g_{ik} ; по современным данным $s < 1-2\%$). При этом мы исходим, очевидно, из предположения о справедливости общей теории относительности по крайней мере в слабых полях (т. е. с точностью до эффектов порядка φ/c^2 включительно; эффекты порядка $(\varphi/c^2)^2$ в пределах Солнечной системы еще в миллион раз меньше). Как ни вероятно такое предположение с точки зрения большинства физиков (в том числе и автора), не может быть никаких сомнений в необходимости его проверки на опыте. Если бы в экспериментах, о которых здесь идет речь, были надежно установлены даже ничтожные по величине отклонения от предсказаний общей теории относительности, это явилось бы открытием перво-

степенного значения и указало бы на некоторый неизвестный пока предел применимости теории Эйнштейна. Поэтому-то на решение задачи и затрачиваются большие усилия, они оправданы, их результатов ждут с нетерпением. Впрочем, уже сейчас центр тяжести проблемы переместился в область проверки общей теории относительности в сильных полях (см. стр. 173 настоящего сборника).

2. *Гравитационные волны* [12, 44б, 53]. Переход от теории тяготения Ньютона к общей теории относительности аналогичен в известном отношении переходу от электростатики к электродинамике. В согласии с этим одной из характерных черт любой теории гравитационного поля (и, в частности, общей теории относительности) является появление гравитационных волн, отсутствующих в гравитостатике. Вопрос о гравитационных волнах был рассмотрен Эйнштейном еще в 1916—1918 гг., но надежно они не обнаружены и до сих пор в силу слабости гравитационного взаимодействия²⁷⁾. Поэтому даже двойные звезды, не говоря уже о планетных системах, излучают гравитационные волны с мощностью, которой совершенно еще недостаточно для их детектирования на Земле имеющимися средствами. Тем более сенсационным оказалось опубликованное в 1969 г. сообщение о наблюдении событий, интерпретируемых как прием мощного гравитационного излучения, быть может, исходящего из центра Галактики. Но сенсация «не состоялась», осуществленная в целом ряде лабораторий проверка не подтвердила появления мощных гравитационных сигналов. В результате, однако, внимание к приему гравитационных волн резко повысилось и сейчас разрабатываются значительно более чувствительные приемники. Можно думать, что через несколько лет будут созданы приемники, способные регистрировать гравитационные импульсы, образующиеся при вспышках сверхновых звезд и некоторых других катастрофических событиях. В дальнейшем станет возможным, вероятно, регистрировать гравитационное излучение двойных звезд и пульсаров. Тем самым будет создана «астрономия гравитационных волн». Эта проблема привлекает в настоящее время пристальное внимание физиков и астрономов во всем мире.

3. *Релятивистские эффекты в звездах. Нейтронные звезды. Черные дыры* [53, 64 — 66]. Даже для некоторых обычных звезд, включая белые карлики, эффекты общей теории относительности оказались существенными. Тем более это справедливо в отношении нейтронных звезд, открытых в 1967 — 1968 гг. в результате

²⁷⁾ Напомним, что гравитационное взаимодействие — самое слабое из известных. Например, оно меньше электромагнитного взаимодействия в e^2/Gm^2 раз, т. е. для протона (масса $m = 1,67 \times 10^{-24}$ г, заряд $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$ абс. ед.) примерно в 10^{36} раз. Наблюдаемая сила тяжести велика лишь, очевидно, в связи с большой массой Земли и многих других тел.

наблюдения пульсаров (пульсары представляют собой, по крайней мере в большинстве случаев, вращающиеся намагниченные нейтронные звезды, причем ось магнитной симметрии не совпадает с осью вращения). Сказанное ясно уже, если отметить, что на поверхности нейтронных звезд параметр $|\Phi|/c^2 \sim GM_0/r_0c^2 \sim \sim 0,1$ ($M_0 \sim M_\odot$ — масса нейтронной звезды и $r_0 \sim 10^6$ см — ее радиус). Холодная, лишенная источников энергии звезда может остаться («умереть») в состоянии белого карлика, лишь если ее масса $M < (1,2 \div 1,4) M_\odot$, а в состоянии нейтронной звезды при $M < (1 \div 3) M_\odot$ (точнее этот предел еще не установлен в связи с недостаточно точным знанием уравнения состояния для вещества в нейтронных звездах). Холодные звезды с еще большей массой (т. е. заведомо с массой $M > 3M_\odot$; здесь и ниже принимается, что общая теория относительности вполне справедлива, причем и в сильных полях) не могут находиться в равновесии и должны либо ранее выбросить «лишнюю» массу путем взрыва (это в большинстве случаев действительно имеет место, но невероятно в качестве правила без исключений), либо будут коллапсировать — сжиматься, падать к их центру. В результате образуется объект, который все чаще называют «черной дырой» в силу того, что поверхность звезды перестает быть видимой при приближении ее радиуса к гравитационному или шварцшильдову радиусу:

$$r_g = \frac{2GM}{c^2} = 3 \cdot 10^5 \left(\frac{M}{M_\odot} \right) \text{ (см)}. \quad (7)$$

Черная дыра дает о себе знать раньше всего в связи с тем, что обладает гравитационным полем (при $r \gg r_g$ потенциал этого поля имеет, естественно, обычное для ньютоновской теории выражение $\Phi = -GM/r$, где M — масса черной дыры). В этой связи черная дыра, входящая в состав двойной звезды, может в принципе наблюдаться по движению второй звезды (предполагается, что она является «обычной» звездой). Но этим дело не исчерпывается: при наличии аккреции (падения газа на звезду) газ ускоряется при приближении к «дыре», замороженное в этот ионизированный газ (плазму) магнитное поле усиливается, происходит ускорение части частиц, возникают неустойчивости. В результате черная дыра будет окружена ореолом (свечением), которое беспорядочно пульсирует с характерным временем порядка $\tau \sim r_g/c$ или несколько большим. Возможно, что один такой объект уже обнаружен — имеется в виду рентгеновская звезда Cyg X-1 (Лебедь X-1), входящая в состав двойной системы и испускающая флуктуирующее рентгеновское излучение. Вопрос о природе Cyg X-1 еще окончательно не решен, но его идентификация с черной дырой, на которую перетекает плазма с другой звезды, весьма вероятна. Так или иначе, в возможности существования черных дыр довольно трудно сомневаться (см., однако, стр. 185 настоя-

шего сборника), а их поиски и в дальнейшем изучение представляют собой одну из самых актуальных задач современной астрофизики. В случае черных дыр, как без учета вращения, так и с его учетом, а также при рассмотрении более сложных случаев (быстро вращающийся диск, нестационарные задачи) применение общей теории относительности является единственным способом исследования проблемы в сколько-нибудь общей ее постановке.

4. *Космология* (см. [12, 67] и элементарное введение на стр. 62 настоящего сборника). Применение новых методов в астрономии не замедлило сказаться и на развитии космологии. Были открыты радиогалактики, квазары и реликтовое тепловое излучение с температурой 3 К, не говоря уже о ряде менее существенных результатов, имеющих значение для космологии. Естественно, резко повысился и масштаб теоретических космологических исследований, которые целиком базируются на общей теории относительности²⁸⁾.

5. *Границы применимости общей теории относительности (квантование, микрофизика, сингулярности, обобщение теории)*. Одной из важнейших проблем для всякой фундаментальной теории является вопрос о границах ее применимости и в связи с этим путях ее обобщения. При этом границы данной теории (или, точнее, некоторые из границ) становятся четко определенными лишь после создания более общей теории. Так, область применимости и точность ньютоновской механики и теории тяготения полностью выясняются в общей теории относительности, но, правда, при пренебрежении квантовыми эффектами. Квантовая механика в свою очередь определяет область применимости и точность ньютоновской (классической) механики при учете квантовых явлений.

²⁸⁾ Нестационарные космологические решения были впервые получены А. А. Фридманом в 1922 и 1924 гг. на основе уравнений общей теории относительности [68]. Лишь в 1934 г. Милн и Мак-Кри получили некоторые результаты Фридмана в рамках ньютоновской теории. Отсылая к [67] за подробностями и ссылками на литературу, заметим, что такое совпадение связано с однородностью и изотропностью рассматриваемых моделей и с тем фактом, что ньютоновская теория в области слабых полей следует из общей теории относительности. Сама же нестационарность моделей является следствием того, что силы тяготения (пользуясь ньютоновской терминологией) имеют один знак — отвечают притяжению; поэтому система тел не может находиться в статическом, а при отсутствии вращения или хаотических движений и в стационарном состоянии — она должна в зависимости от начальных условий либо расширяться, либо сжиматься. Это обстоятельство не было в применении к космологии выяснено до создания общей теории относительности в связи с проблемой граничных условий и необходимостью использовать определенную процедуру расчета в применении к бесконечной системе. В общей же теории относительности трудности такого типа не возникали, во всяком случае после работы Эйнштейна [57]. Сказанное, конечно, не означает, что в космологии можно обойтись без общей теории относительности — это заведомо не так (см. [12, 67]).

Квантовые эффекты в случае макроскопических тел совершенно ничтожны (речь идет о движении тел, а не об уравнении состояния или явлениях типа сверхтекучести). В согласии с этим для «обычных» астрономических применений нет ни малейших оснований рассматривать квантовое обобщение общей теории относительности²⁹⁾. Тем не менее такое обобщение (последовательным и законченным образом еще не осуществленное) необходимо. Это заключение вызывается рядом причин.

Во-первых, нет сомнений в необходимости в принципе квантовать поля всех типов. К тому же достаточно короткие (и, следовательно, высокочастотные) гравитационные волны уже могут проявить свою квантовую природу.

Во-вторых, в общей теории относительности в ряде очень важных случаев — в космологических моделях и при коллапсе — возникают сингулярности, т. е. плотность вещества стремится к бесконечности и (или) радиус кривизны пространства стремится к нулю [12, 53, 67, 69]. В таких условиях существен учет нулевых колебаний (флуктуаций) гравитационного поля и рождения новых частиц [66, 69 — 73], а классическое приближение, вообще говоря, уже непригодно³⁰⁾. Поскольку последовательное квантовое рассмотрение сингулярной области не проведено, определенно утверждать в этом отношении ничего нельзя. Вполне может оказаться, однако, что квантовые эффекты полностью изменяют картину в том смысле, что сингулярности вообще исчезают. Создание квантовой космологии, которая должна заменить классическую космологию вблизи классической сингулярности, является в данный момент, по-видимому, самой важной задачей принципиального характера, связанной с общей теорией относительности. Решение этой задачи прольет свет, по всей вероятности, и на квантовые явления вблизи сингулярностей, возникающих при гравитационном коллапсе.

В третьих, квантовое обобщение общей теории относительности имеет, возможно, прямое отношение к вопросу о строении материи или теории «элементарных» частиц (другими словами, к области, которую называют также микрофизикой). В классическом варианте этот вопрос был поставлен Эйнштейном еще в 1919 г. [75]. Сейчас несомненно, что проблемы такого рода должны решаться на квантовой основе, но вполне может быть, что с учетом гравитационного взаимодействия. Более того, существуют теоре-

²⁹⁾ Во избежание недоразумений будем называть общей теорией относительности только неквантованную теорию гравитационного поля, построенную Эйнштейном, а не какие-либо ее обобщения или модификации.

³⁰⁾ Особенно ярко это обстоятельство проявляется в том, что черные дыры излучают электромагнитные волны (фотоны) и другие частицы подобно черному телу (этот важнейший результат был установлен [74] только в 1974 г.; о дальнейших работах, посвященных квантовым эффектам в теории черных дыр, см. в [65, 66]).

тические схемы (не принявшие еще форму последовательной теории), в которых гравитация играет определяющую роль и в микромире (гравиметродинамика [70], гипотеза фридмонов [73], супергравитация [76]). Нужно подчеркнуть, что квантовые явления вблизи классических сингулярностей и модели элементарных частиц типа фридмонов и др. [70, 73] оказываются тесно связанными между собой, и, таким образом, происходит «соприкосновение» космологии с микрофизикой. К этому кругу вопросов можно отнести и проблему квантования пространства-времени, т. е. более глубокого изменения представлений о пространстве и времени «в малом»³¹⁾.

Итак, уже совершенно ясна необходимость такого обобщения и расширения общей теории относительности, как ее квантование — создание квантовой теории гравитационного поля и анализ на ее основе ряда фундаментальных проблем физики и астрономии. Вместе с тем нельзя а priori гарантировать, что общая теория относительности не имеет еще каких-то иных ограничений, не связанных с квантовыми эффектами. Оказалось же применение ньютоновской механики ограниченным и областью слабых гравитационных полей и, совершенно независимо, областью неквантовых явлений. Некоторые гипотезы такого типа, связанные с выходом астрономии за рамки известных физических теорий, уже предлагались. Мы не будем на них останавливаться, поскольку коснулись этого вопроса в другом месте [77], а что-либо более определенное в связи с общей теорией относительности здесь вряд ли можно сказать.

Резюмируя, можно констатировать невиданное никогда ранее расширение фронта исследований, так или иначе связанных с общей теорией относительности. Трудно сомневаться в том, что в обозримом будущем положение в этом отношении не изменится.

Стремительное развитие науки приучило нас к почти столь же скорой переоценке ценностей. Из огромного числа печатающихся в настоящее время статей по физике и астрономии большинство в той или иной мере устаревает уже через несколько

³¹⁾ Обсуждаемое обычно квантование общей теории относительности (см., например, [37]) проводится в духе квантования других теорий поля — электродинамики, мезодинамики. Другими словами, квантуется поле $g_{ik}(x_j)$, но в каком-то смысле сами координаты x_j рассматриваются классически. Такой подход вряд ли может считаться сколько-нибудь последовательным, и уже давно, хотя и безуспешно пока, обсуждается проблема «квантования» самих координат x_j , введения в связи с этим некоторой фундаментальной длины и т. п. Отметим вместе с тем, что уже «обычное» квантование всех полей обогатило понятие пространства. В классической теории пространство всегда было неразрывно связано лишь с одним полем — гравитационным, а остальные поля могли отсутствовать. С квантовой же точки зрения существуют нулевые флуктуации всех полей, и, таким образом, понятие о вакууме, о физическом «пустом пространстве», становится еще более содержательным.

лет, а нередко и еще раньше. Историческая судьба общей теории относительности, которую можно проследить уже в течение шести десятилетий, напоминает о существовании и другого полюса. Глубокие идеи завоевывают признание и развиваются в целом неторопливо, они не терпят суеты, если не обращать внимания на быстрые, но мелкие турбулентные движения на поверхности. Трудности, стоящие на пути создания новых фундаментальных представлений и теорий, так велики, что напоминают нам об ограниченности человеческих возможностей. Не это ли хотел отразить Эйнштейн, когда в одной из своих статей, посвященных двухсотлетию со дня смерти Ньютона, писал: «Несомненно, что разум кажется нам слабым, когда мы думаем о стоящих перед ним задачах; особенно слабым он кажется, когда мы противопоставляем его безумству и страстям человечества, которые, надо признать, почти полностью руководят судьбами человеческими как в малом, так и в большом. Но творения интеллекта переживают шумную суету поколений и на протяжении веков озаряют мир светом и теплом» [78].

Свет и тепло. Не странно ли звучат эти слова в применении к людям, от которых нас отделяют столетия? Но тот, кто ознакомится с трудами и жизненным путем Коперника, Галилея, Кеплера и Ньютона, не говоря уже о почти нашем современнике — Эйнштейне, не сможет не почувствовать этого тепла, не увидеть этого света.

Кто следующий принесет в физику великие созидательные идеи и построит новую фундаментальную теорию? Может быть, он уже ищет эти новые пути? Или ходит в школу? А быть может, он еще не родился?

ЛИТЕРАТУРА

1. Эйнштейн А. К 410-й годовщине со дня смерти Коперника. — Собрание научных трудов. — М.: Наука, 1967, т. 4, с. 343. (Приводимый в виде эпиграфа текст слегка изменен в соответствии с английским оригиналом: *Einstein A. Ideas and Opinions.* — N. Y.: Grown Publ., 1954, p. 359.)
2. *Newton R. R. The Crime of Claudius Ptolemy.* — Johns Hopkins University Press, 1977; см. также — *Sci. Amer.*, 1977, v. 237, № 4, p. 79; *Nature*, 1978, v. 276, p. 151.
3. Паннекук А. История астрономии. — М.: Наука, 1966; *Kuhn T. S. The Copernican Revolution.* — Cambridge: Harvard Univ. Press, 1957.
- 4а. Идельсон Н. И. Этюды по истории планетных движений. — В сб.: Николай Коперник. — М. — Л.: Изд-во АН СССР, 1947, с. 84.
- 4б. Идельсон Н. И. Жизнь и творчество Коперника. — Там же, с. 5.
5. Коперник И. Об обращениях небесных сфер. — Там же, с. 187.
6. Галилей Г. Избранные труды. — М.: Наука, 1964, т. 1, с. 55.
7. Коперник И. О вращениях небесных сфер. — М.: Наука, 1964.
8. Райков Б. Е. Очерки по истории гелиоцентрического мировоззрения в России. — М. — Л.: Изд-во АН СССР, 1947.
9. Идельсон Н. И. Галилей в истории астрономии. — В сб.: Галилео Галилей. — М. — Л.: Изд-во АН СССР, 1943, с. 68.

10. *Эйнштейн А.* Предисловие к книге Галилея «Диалог о двух главных системах мира». — Собрание научных трудов. — М.: Наука, 1967, т. 4, с. 340. (Другой перевод этого же предисловия помещен в сб.: Вопросы истории естествознания и техники. — М.: Наука, 1964, вып. 16, с. 29.)
11. *Sachs R. G.* — Time Reversal, 1972, v. 176, p. 587.
12. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теория поля. — М.: Наука, 1973.
13. *Ленин В. И.* Философские тетради. Полн. собр. соч. — М.: т. 29, с. 514.
14. *Борн М.* Эйнштейновская теория относительности. — М.: Мир, 1972.
15. *Эйнштейн А., Инфельд Л.* Эволюция физики. — М. — Л.: Гостехиздат, 1948. (Книга переиздавалась много раз и включена также в «Собрания научных трудов» А. Эйнштейна. — М.: Наука, 1967, т. 4.)
16. *Фок В. А.* Система Коперника и система Птолемея в свете современной теории тяготения. — В сб.: Николай Коперник. К 410-летию со дня смерти. — М.: Изд-во АН СССР, 1955.
17. *Фок В. А.* Теория пространства, времени и тяготения. — М.: Физматгиз, 1961.
18. *Александров А. Д.* Истина и заблуждение. — Вопросы философии, 1967, № 4, с. 66.
19. *Infeld L.* Quest. The Evolution of a Scientist. — N. Y.: Doubleday, 1941.
20. *Инфельд Л.* Мои воспоминания об Эйнштейне. — УФН, 1956, т. 59, с. 135; в сб.: Эйнштейн и современная физика. — М.: Гостехиздат, 1956, с. 197.
21. *Ньютон И.* Математические начала натуральной философии. — Собр. соч. А. Н. Крылова. — М. — Л.: Изд-во АН СССР, 1936, т. 7.
22. *Джеммер М.* Понятие массы в классической и современной физике. — М.: Прогресс, 1967.
23. *Эйлер Л.* Теория движения твердых тел. — В кн.: Основы динамики точки. — М. — Л.: Гостехиздат, 1938.
24. *Neumann C.* Ueber die Prinzipien der Galilei-Newton'schen Theorie. — Leipzig, 1870.
25. *Voss A.* Die Prinzipien der rationellen Mechanik. Enzyklopadie d. Math. Wissenschaften. — Leipzig, 1901 — 1908, Bd. 4, t. 1.
26. *Лаур М.* Статьи и речи. — М.: Наука, 1969, с. 153, 266, 282.
27. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Механика. — М.: Физматгиз, 1973, § 3.
28. *Линец А. М.* О системах отсчета классической механики. — В кн.: Эйнштейновский сборник, 1971. — М.: Наука, 1972, с. 254.
29. *Хайкин С. Э.* Физические основы механики. — М.: Наука, 1971.
30. *Эйнштейн А.* Эфир и теория относительности. — Собрание научных трудов. — М.: Наука, 1965, т. 1, с. 683.
31. *Эйнштейн А.* К электродинамике движущихся тел. — Собрание научных трудов. — М.: Наука, 1965, т. 1, с. 7.
32. *Эйнштейн А.* Релятивистская теория несимметричного поля. — Собрание научных трудов. — М.: Наука, 1966, т. 2, с. 849.
33. *Эйнштейн А.* О принципе относительности и его следствиях. — Собрание научных трудов. — М.: Наука, 1965, т. 1, с. 65.
34. *Эйнштейн А.* Некоторые замечания о возникновении общей теории относительности. — Собрание научных трудов. — М.: Наука, 1966, т. 2, с. 403.
35. *Эйнштейн А.* Автобиографические заметки. — Собрание научных трудов. — М.: Наука, 1967, т. 4, с. 259.
36. *Дикки Р.* Гравитация и наблюдения. — В кн.: Эйнштейновский сборник, 1969 — 1970. — М.: Наука, 1970, с. 108.
37. Гравитация и относительность. / Под ред. Х. Цзю и В. Гофмана. — М.: Мир, 1965.
38. *Эйнштейн А.* О влиянии силы тяжести на распространение света. — Собрание научных трудов. — М.: Наука, 1965, т. 1, с. 165.

39. *Эйнштейн А.* О статье Ф. Котлера «Гипотеза эквивалентности Эйнштейна и гравитация». — Собрание научных трудов. — М.: Наука, 1965, т. 1, с. 505.
40. *Гинабург В. Л.* Альберт Эйнштейн. Собрание научных трудов (рецензия). — В кн.: Эйнштейновский сборник 1969 — 1970. — М.: Наука, 1970, с. 390 и настоящий сборник, с. 144. (В сокращенном виде см. также УФН, 1968, т. 95, с. 553.)
41. *Ферми Э.* О явлениях, происходящих вблизи от мировой линии. — Научные труды. — М.: Наука, 1971, т. 1, с. 64.
42. *Богородский А. Ф.* Принцип эквивалентности и ОТО. — В сб.: Философские проблемы теории тяготения Эйнштейна и релятивистской космологии. — Киев: Наукова думка, 1965, с. 56.
43. *Гинабург В. Л.* Космические исследования и теория относительности. — В кн.: Эйнштейновский сборник, 1967. — М.: Наука, 1967, с. 80.
- 44а. *Брагинский В. Б., Панов В. И.* Проверка эквивалентности инертной и гравитационной масс. — ЖЭТФ, 1971, т. 61, с. 873.
- 44б. *Руденко В. Н.* Экспериментальные исследования релятивистских гравитационных эффектов. — УФН, 1978, т. 126, с. 361.
45. *Will C. W., Nordvedt K.* Conservation laws and preferred frames in relativistic gravity. — *Astrophys. J.*, 1972, v. 177, p. 757, 775; 1972, v. 176, p. 769; *Science*, 1972, v. 178, p. 1157.
46. *Синг Д.* Общая теория относительности. — М.: ИЛ, 1963, с. 9.
47. *Паули В.* Теория относительности. — М. — Л.: Гостехиздат, 1947.
48. *Møller C.* The Theory Relativity. — Oxford: Clarendon Press, 1972 (русский перевод: *Меллер К.* Теория относительности. — М.: Атомиздат, 1975); *Вейнберг С.* Гравитация и космология. — М.: Мир, 1975.
49. *Керес Х. П.* Единство инерции и гравитации. — В сб.: Философские проблемы теории тяготения Эйнштейна и релятивистской космологии. — Киев: Наукова думка, 1965, с. 68.
50. *Унт В. А.* Об общем принципе относительности. — Там же, с. 75.
51. *Керес Х. П.* Представления ньютоновской теории. — В сб.: Гравитация. — Киев: Наукова думка, 1972, с. 62.
52. *Эйнштейн А.* Основные идеи и проблемы теории относительности. — Собрание научных трудов. — М.: Наука, 1966, т. 2, с. 120.
53. *Зельдович Я. Б., Новиков И. Д.* Теория тяготения и эволюция звезд. — М.: Наука, 1971.
54. *De Donder T.* La gravitique Einsteinienne. — Paris: Gauthier Villars, 1921.
55. *Эйнштейн А.* Существует ли гравитационное воздействие, аналогичное электродинамической индукции? — Собрание научных трудов. — М.: Наука, 1965, т. 1, с. 223.
56. *Эйнштейн А.* Основы общей теории относительности. — Там же, с. 452.
57. *Эйнштейн А.* Вопросы космологии и общая теория относительности. — Там же, с. 601.
58. *Эйнштейн А.* Принципиальное содержание общей теории относительности. — Там же, с. 613.
59. *Weyl H.* Was ist Materie? — Berlin: Springer, 1924; *Франкфурт У. И.* Специальная и общая теория относительности. Исторические очерки. — М.: Наука, 1968.
60. *Хёнль Г.* К истории принципа Маха. — В кн.: Эйнштейновский сборник, 1968. — М.: Наука, 1968, с. 258.
61. *Mach E.* Die Mechanik in ihrer Entwicklung. — I. Aufl. Leipzig, 1883. (Русский перевод: *Мах Э.* Механика. — СПб., 1909.)
62. *Schiff L. I.* Observational basis of Mach's principle. — *Rev. Mod. Phys.*, 1964, v. 36, p. 510.
63. *Эйнштейн А.* Относительность и проблема пространства. — Собрание научных трудов. — М.: Наука, 1966, т. 2, с. 744.

64. *Chandrasekhar S.* The increasing role of general relativity in astronomy.— *Observatory*, 1972, v. 92, p. 160.
65. *Фролов В. П.* Черные дыры и квантовые процессы в них.— *УФН*, 1976, т. 118, с. 473.
66. Черные дыры: Сборник статей.— М.: Мир, 1978.
67. *Зельдович Я. Б., Новиков И. Д.* Строение и эволюция Вселенной.— М.: Наука, 1975.
68. *Фридман А. А.* О кривизне пространства. О возможности мира с постоянной отрицательной кривизной пространства.— *Избранные труды*.— М.: Наука, 1966, с. 229, 238.
69. *Ленроуз Р.* Структура пространства-времени.— М.: Мир, 1972.
70. *Уилер Дж.* Предвидение Эйнштейна.— М.: Мир, 1970.
71. *Гинзбург В. Л., Киржиц Д. А., Любушин А. А.* О роли квантовых флуктуаций гравитационного поля в общей теории относительности и космологии.— *ЖЭТФ*, 1971, т. 60, с. 451; см. также в сб.: *Гравитация*.— Киев: Наукова думка, 1972, с. 40.
72. *Зельдович Я. Б., Старобинский А. А.* Рождение частиц и поляризация вакуума в анизотропном гравитационном поле.— *ЖЭТФ*, 1971, т. 61, с. 2161.
73. *Марков М. А.* Глобальные свойства вещества в коллапсированном состоянии (черные дыры).— *УФН*, 1973, т. 111, с. 3; см. также — *Вопросы философии*, 1970, № 4, с. 66.
74. *Hawking S. W.* Black hole explosions? — *Nature*, 1974, v. 248, p. 30.
75. *Эйнштейн А.* Играют ли гравитационные поля существенную роль в построении элементарных частиц материи? — *Собрание научных трудов*.— М.: Наука, 1965, т. 1, с. 664.
76. *Freedman D. Z.* SO(3)-invariant extended supergravity.— *Phys. Lett.*, 1977, v. 38, p. 105; см. также *Freedman D. Z., van Nieuwenhaisen P.* Supergravity and the unification of the laws of physics.— *Scient. Amer.*, 1978, v. 238, № 2, p. 126.
77. *Гинзбург В. Л.* Новые физические законы и астрономия.— *Вопросы философии*, 1972, № 11, с. 14; см. также — *Q. Jl. Roy. Astr. Soc.*, 1975, v. 16, p. 265.
78. *Эйнштейн А.* Исаак Ньютон.— *Собрание научных трудов*.— М.: Наука, 1967, т. 4, с. 78.

Как устроена Вселенная и как она развивается во времени

Бурные исторические события 1917 г. захватили много миллионов людей. В этот последний период мировой войны, в эпоху революции, вероятно, лишь несколько десятков физиков и астрономов во всем мире заметили рождение современной космологии. Она родилась в небольшой работе, озаглавленной «Вопросы космологии и общая теория относительности» и опубликованной в журнале «Сообщения Прусской Академии наук».

Автором этой статьи был один из величайших гениев всех времен — Альберт Эйнштейн.

КАКОЕ МЕСТО КОСМОЛОГИЯ ЗАНИМАЕТ В АСТРОНОМИИ

Космология должна ответить на вопрос, как устроена Вселенная «в целом» и как она развивается во времени. Космология наряду с физикой элементарных частиц принадлежит к числу самых фундаментальных направлений в современном естествознании.

Космология — это часть астрономии и занимается она изучением Вселенной в больших масштабах. Расстояния, рассматриваемые в космологии, составляют миллиарды и десятки миллиардов световых лет. Характерное для космологии время — миллиарды и десятки миллиардов лет. Эти числа кажутся такими большими потому, что мы по привычке сравниваем их с величинами, встречающимися в обыденной жизни: метрами и километрами, часами и годами. Для того чтобы такая разница в единицах измерения не мешала сравнению, мы в дальнейшем пользуемся в основном сантиметрами и секундами, хотя при этом несколько проигрываем в наглядности.

Характерные космологические расстояние и время — это 10^{28} см и $3 \cdot 10^{17}$ с (расстояние в световой год равно примерно 10^{18} см, в году приблизительно $3 \cdot 10^7$ с). Трудно себе представить такие космические масштабы, так же, как трудно мысленно перенестись в микромир — мир атомов (характерный размер 10^{-8} см)

и элементарных частиц (сейчас изучаются процессы, для которых характерны расстояния, равные всего лишь 10^{-16} см).

Космология и физика элементарных частиц — это как бы два антипода. Вместе с тем, как говорят, противоположности сходятся. И действительно, у космологии и физики элементарных частиц есть одна и та же черта, определяющая их значение в науке. Именно в этих областях соответственно астрономии и физики сейчас проходит граница между областью, освещенной знанием, пусть неполным, и крошечной тьмой неведомого.

Поясним, о чем идет речь, выбрав для примера физику твердого тела — обширное и чрезвычайно важное в практическом отношении направление современной физики. Нерешенных и неясных вопросов в этой области великое множество. Но мы уверены, что для их решения уже заложен фундамент — квантовая механика. Задача же состоит в том, чтобы, опираясь на известные общие принципы или, говоря более формально и используя математический язык, исходя из известных уравнений, получить результаты, которые трудно извлечь из этих уравнений по тем или иным причинам, например вследствие огромного числа частиц, чье поведение приходится учитывать (достаточно упомянуть о том, что, например, в 1 см^3 железа находится около 10^{23} атомов).

Совсем иначе обстоит дело в случае взаимодействия двух протонов, обладающих энергией в сотни миллиардов электрон-вольт. Предсказать результат такого соударения мы не можем не по «техническим» причинам, а в силу незнания самих основ, отсутствия фундаментальной теории. Точно так же при изучении звезд, планет и межзвездной среды используется, и притом с полным основанием, обычная, «земная» физика. Но с переходом к космологии, во-первых, уже нет уверенности в том, что можно без всяких ограничений всегда и везде применять известные физические законы. Во-вторых, и это, быть может, еще важнее, в космологии возникают вопросы, для ответа на которые нужны какие-то новые, совсем еще не ясные идеи и принципы.

О таких научных направлениях, как физика элементарных частиц и космология, часто говорят, что они особенно важны и интересны. Подобная характеристика представляется не слишком удачной. Всякая правильно поставленная научная проблема интересна, а «важность» в науке вообще неизвестно чем измерять (в этом состоит одно из отличий науки от техники, где мерилom важности часто может служить экономический эффект). Вместе с тем выделять фундаментальные или принципиальные научные проблемы среди остальных не только можно, но и нужно. Критерием здесь может быть именно отсутствие в случае фундаментальных проблем надежных основ для их решения. Если воспользоваться подобной терминологией, то нужно сказать, что в науке о неживой природе существует сейчас только две фундаментальные пробле-

мы: физика элементарных частиц и космология. В плане сказанного не так уж существенна или, точнее, не обязательна непосредственная связь между физикой элементарных частиц и космологией. Но фактически такая связь имеется и в течение последнего десятилетия привлекает к себе все большее внимание.

ПЕРВЫЕ КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

До 1917 г. построить непротиворечивую космологическую модель не удавалось. Были созданы, однако, предпосылки для осуществления революционного переворота в космологии.

Если углубиться в историю, то к космологии по сути дела нужно отнести значительную часть дотелескопической астрономии. «Системы мира» Птолемея и Коперника — это представления о Вселенной, космологические системы. Для наших целей нет необходимости, однако, останавливаться на этих ранних этапах. Достаточно сказать, что Коперник (1473 — 1543 гг.), как и его предшественники, фактически имел дело лишь с Солнечной системой, а звезды помещал на некоей «сфере неподвижных звезд». Даже Кеплер в своей книге «Сокращение коперниковой астрономии», вышедшей в свет в 1618 — 1622 г. (книга выходила по частям), хотя и с оговорками, но помещал Солнце в центре твердой звездной сферы («звездная сфера состоит из льда или из кристалла»). Расстояние до этой сферы, ограничивающей Вселенную, Кеплер считал равным 60 млн. земных радиусов (около $4 \cdot 10^{16}$ см).

Такое расстояние, как мы теперь знаем, в 100 раз меньше расстояния до ближайшей звезды. Правда, еще Джордано Бруно, сожженный инквизицией в 1600 г., пропагандировал идею о бесконечности Вселенной и бесконечном числе миров (звезд). Он явно опередил свое время, — как мы видели, даже великий астроном Кеплер, знакомый с идеями Бруно, фактически их отвергал. Но уже в XVIII веке, после установления Ньютоном (1643 — 1727 гг.) законов механики и закона всемирного тяготения, представления о небесной сфере стали, вероятно, казаться совершенно фантастическими и были отброшены.

Доминирующее положение заняла модель Вселенной, которая бесконечна в пространстве. Развитие телескопической астрономии, начатое Галилеем в 1609 г., подтверждало ее или во всяком случае не противоречило такой картине. Сам Галилей показал, что Млечный Путь состоит из звезд. Затем к началу XIX века, в первую очередь благодаря трудам В. Гершеля (1738 — 1822 гг.), изучение звезд и туманностей продвинулось уже довольно сильно и укрепились представления о нашей звездной системе — Галактике и других звездных системах (галактиках). По современным оценкам диаметр Галактики достигает 10^{23} см и сама она содержит сотни миллиардов звезд.

Внегалактическая астрономия, если говорить о реальном изучении других галактик, развилась лишь в нашем веке. Это обстоятельство, однако, и ранее не препятствовало использованию и, видимо, большой популярности гипотезы о том, что галактики имеются бесконечно много и они заполняют Вселенную более или менее равномерно с неизменной во времени средней плотностью.

Говоря современным языком, можно сказать, что в XIX веке естественной моделью Вселенной служила бесконечная и однородная в пространстве и неизменная во времени (стационарная) космологическая модель. Пространство в этой модели считалось, конечно, евклидовым, — достаточно сказать, что сама возможность существования пространства с неевклидовой геометрией была доказана Лобачевским, Больяи, Гауссом и Риманом только в прошлом веке.

Если не касаться быстрого и впечатляющего развития других областей астрономии и иметь в виду лишь космологию, то XIX век и собственно весь период до 1917 г. внес здесь лишь одно — были выяснены некоторые глубокие трудности, связанные с упомянутой космологической моделью (будем ее называть СОЕ-моделью — стационарной однородной евклидовой моделью).

В чем состоят эти трудности?

Первая из них (она носит название парадокса Ольберса, который его сформулировал в 1826 г.) заключается в том, что в СОЕ-модели все небо должно сиять ярким светом, подобным солнечному.

К такому выводу действительно легко прийти, если вспомнить, что световой поток через заданную площадку убывает обратно пропорционально квадрату расстояния r от источника; в то же время количество источников в шаровом слое радиусом r и толщиной Δr (рис. 1) прямо пропорционально r^2 и равно $4\pi nr^2 \Delta r$, где n — среднее число источников (звезд) в единице объема. Поэтому световой поток от всего слоя не зависит от r и пропорционален Δr .

Производя суммирование по всем слоям (если они заполняют бесконечное пространство), приходим к выводу о бесконечно большом потоке света от всех звезд. Если же учесть наложения изображений звезд или поглощение света в такой модели, то бесконечность уже не получится, но все небо должно быть заполнено звездами и, следовательно, ярко сиять. Поскольку это, несомненно, не имеет места в действительности, одно из сделанных предпо-

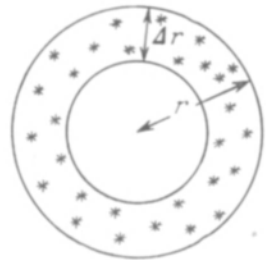


Рис. 1. Количество света, приходящее от звезд, находящихся в шаровом слое, не зависит от радиуса r , но пропорционально толщине слоя Δr .

ложений неверно, например звезды (по крайней мере наиболее яркие) не распределены по Вселенной однородно или Вселенная не бесконечна.

Вторая трудность возникает при попытках применить к СОВ-модели законы термодинамики. Если Вселенная стационарна и, значит, существует бесконечно долго, то в ней все успело бы «успокоиться», прийти в состояние равновесия или, как говорят, должна была бы наступить «тепловая смерть» Вселенной. Но ничего похожего мы не наблюдаем.

Третья трудность, известная как парадокс Зеелигера (1895 г.), связана с попыткой применить к СОВ-модели ньютоновскую теорию всемирного тяготения.

По Ньютону все тела притягиваются с силами, обратно пропорциональными квадрату расстояния между ними. Конкретно, два тела с массами m_1 и m_2 (рис. 2) притягиваются друг к другу с силой $F = Gm_1m_2/r^2$ (здесь r — расстояние между массами, $G = 6,67 \cdot 10^{-8}$ см³/г·с² — гравитационная постоянная). Вследствие существования гравитационного притяжения эти две массы обладают гравитационной потенциальной энергией, равной $U = -Gm_1m_2/r$. Это значит, в частности, что для разведения тел «на бесконечность» нужно затратить энергию

Рис. 2. Согласно закону всемирного тяготения все тела притягиваются друг к другу. Силы F , действующие на массы m_1 и m_2 , равны по величине, но направлены навстречу друг другу (величина сил $F = Gm_1m_2/r^2$).

$Gm_1m_2/r = -U$ (энергию U считаем отрицательной, ибо она уменьшается при сближении масс, а для тел, находящихся на очень большом расстоянии друг от друга, она положена равной нулю). Ньютоновскую теорию тяготения оказывается удобным и плодотворным формулировать таким образом: каждое тело создает вокруг себя поле тяготения, которое описывается некоторой величиной — гравитационным потенциалом φ . В случае сферического тела с массой m_1 (например, планеты) потенциал вне тела на расстоянии r от него равен $\varphi = -Gm_1/r$. Как ясно из сказанного, силу тяготения F и энергию гравитационного взаимодействия U легко выразить через φ (например, $U = -Gm_1m_2/r = m_2\varphi$, $\varphi = -Gm_1/r$).

Простой подсчет, подобный использованному выше при изложении парадокса Ольберса, показывает, что для любого тела гравитационная энергия его взаимодействия со всеми массами (звездами) в бесконечной однородной вселенной будет бесконечной. Сила же взаимодействия тела со всеми массами Вселенной неопределенна. Отсюда ясно, что ньютоновскую теорию тяготения к СОВ-модели либо вообще нельзя применить, либо это нужно сделать

каким-то нетривиальным образом. Во всяком случае в доэйнштейновской космологии решить эту проблему не удалось.

Итак, весьма простая, как кажется на первый взгляд, стационарная однородная евклидова космологическая модель на самом деле очень коварна.

Чтобы устранить противоречия и разрешить парадоксы, в исходных предпосылках нужно что-то менять. Возможностей для этого имеется, конечно, огромное количество. Можно, например, считать ньютоновский закон всемирного тяготения хотя и достаточно точным для расчета траекторий планет, но нуждающимся в изменении при переходе к космологическим расстояниям *). Но для внесения изменений в теорию, особенно такую фундаментальную, как ньютоновская, нужно иметь какую-то путеводную звезду, опираться на более общую теорию или новые наблюдения. В доэйнштейновской космологии такой путеводной звезды не нашли. Толчок к развитию космологии на основе новых идей и представлений дала только общая теория относительности.

Применение этой теории к космологии как раз и началось с работы Эйнштейна 1917 г., о которой мы упомянули в начале данной статьи. Любопытно отметить, что существенный прогресс в космологии был на самом деле возможен уже в рамках ньютоновской теории, но это выяснилось только в 1934 г. К этому вопросу мы еще вернемся. Сейчас же сделаем несколько замечаний о теории относительности, которые необходимы для понимания основанных на ней космологических идей и результатов.

О ЧАСТНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ**)

Скорость света является максимально возможной скоростью распространения любых сигналов. Частная теория относительности и все согласующиеся с ней физические законы находятся в соответствии с этим утверждением о коечности, а не бесконечности скорости распространения сигналов.

В классической (ньютоновской) механике было выяснено, что существуют инерциальные системы отсчета, в которых соблюдается первый закон Ньютона; тело, достаточно удаленное от всех других, движется равномерно и прямолинейно или покоится.

*) В качестве примера, который представляет исторический интерес, укажем на замену потенциала $\varphi = -Gm/r$ на $\varphi' = -(Gm/r) \exp(-r/R)$. При этом парадокс Зеелигера исчезает, и вместе с тем, выбирая постоянную R достаточно большой, можно сделать потенциалы φ и φ' сколь угодно близкими друг к другу для любого заданного расстояния r . Об уравнениях, которым подчиняются потенциалы φ и φ' , см. в приложении, помещенном в конце настоящей статьи.

**) В настоящем и следующем разделах мы кратко остановимся на основах частной и общей теории относительности. Однако ни объем, ни характер данного сборника не позволяют этого сделать сколько-нибудь полно

В инерциальных системах справедлив и третий закон Ньютона (действие равно противодействию). Примером инерциальной системы служит система координат, начало которой помещено в центре Солнца, а оси направлены на далекие галактики.

В неинерциальных системах отсчета — к их числу относится вращающаяся Земля — первый и третий законы Ньютона уже несправедливы. Это вполне понятно из такого рассуждения: пусть в некоторой инерциальной системе тело движется по инерции, т. е. равномерно и прямолинейно; если мы посмотрим теперь на то же тело с вращающейся системы отсчета, то обнаружим, что его траектория имеет вид некоторой спирали и, следовательно, закон инерции нарушается.

В классической механике все инерциальные системы, движущиеся друг относительно друга равномерно и прямолинейно, равноправны. Это утверждение называется принципом относительности. Оказалось, однако, что при использовании классических представлений о пространстве и времени принцип относительности должен уже нарушаться в оптике. Наблюдения же, напротив, свидетельствуют о полной справедливости принципа относительности и в оптике (конкретно, при распространении света его скорость во всех инерциальных системах оказывается совершенно одинаковой).

Задача, которую решила частная теория относительности (1905 г.) состояла как раз в том, чтобы устранить получающиеся противоречия. Это удалось сделать в результате установления новых (релятивистских) законов преобразования координат и времени при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой. Иными словами, было выяснено, каким образом по известным координатам и времени какого-либо события (например, удара молнии) в одной системе найти координаты и время того же события в любой другой инерциальной системе отсчета.

Для простоты предположим, что обе системы K и K' движутся друг относительно друга вдоль одной координатной оси (оси x и x') со скоростью v (рис. 3). В системе K «событию» отвечает координата x и время t . Тогда в системе K' это событие имеет координату x' и время t' , причем (принято, что при $t = 0$ начала координат O и O' в системах K и K' совпадают)

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

и последовательно; хотелось лишь кое-что напомнить, подчеркнуть некоторые моменты. С теорией относительности в популярном изложении читатель может познакомиться, например, прочитав такие книги: *Борн М.* Эйнштейновская теория относительности. — М.: Мир, 1972; *Дьюрелл К.* Азбука теории относительности. — М.: Мир, 1964; *Ланцош К.* Альберт Эйнштейн и строение космоса. — М.: Наука, 1967; *Угаров В. А.* Специальная теория относительности. — М.: Наука, 1977.

Такой закон носит название преобразований Лоренца. В них фигурирует скорость света $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с. Если скорость движения одной системы относительно другой v мала по сравнению со скоростью света, то приближенно справедливы преобразования Галилея

$$x' = x - vt, \quad t' = t.$$

В классической (дорелятивистской) физике именно преобразования Галилея считались безусловно и неограниченно применимыми. Время, согласно классической физике, течет одинаково во

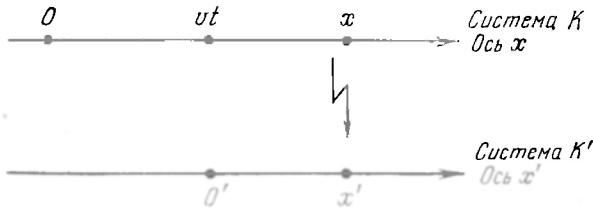


Рис. 3. Две инерциальные системы отсчета. Система K' движется со скоростью v относительно системы K .

всех системах отсчета независимо от скорости их движения друг относительно друга. Иными словами, в рамках преобразований Галилея время абсолютно.

Согласно преобразованиям Лоренца, напротив, время в разных системах отсчета течет по-разному. В этой связи иногда говорят, что теория относительности превратила наш трехмерный мир плюс время в единый четырехмерный мир (пространство-время). Такое утверждение справедливо лишь в том смысле, что в теории относительности время потеряло свой абсолютный характер — оно, как и координаты, преобразуется при переходе от одной системы отсчета к другой.

Для использования преобразований Галилея и представлений об абсолютности времени в классической физике имелись, разумеется, веские основания, ибо встречающиеся в повседневной жизни (и даже в астрономии) скорости значительно меньше скорости света. Достаточно напомнить, что скорость движения Земли вокруг Солнца равна $3 \cdot 10^6$ см/с, что в 10 000 раз меньше скорости света. Вместе с тем при малых скоростях преобразования Лоренца отличаются от преобразований Галилея членами порядка не v/c , а v^2/c^2 . Значит, для движения Земли вокруг Солнца точность преобразований Галилея составляет величину порядка $v^2/c^2 = 10^{-8}$. Спутники Земли движутся относительно земной поверхности со скоростью, не превышающей $8 \cdot 10^5$ см/с, и, таким образом, релятивистские поправки здесь еще меньше, чем при движении Земли вокруг Солнца.

Однако в физике микромира, а также в космологии встречаются скорости, весьма близкие к c . Кроме того, точность некоторых опытов так велика, что можно различить следствия преобразований Галилея и преобразований Лоренца и в случае движения Земли вокруг Солнца. Частная теория относительности возникла именно тогда, когда под давлением фактов обойтись без нее стало уже невозможно.

Частная теория относительности неразрывно связана с представлением (разумеется, основанным на данных опыта), что скорость света является предельной (максимально возможной) скоростью распространения любого несущего энергию сигнала, который может произвести какое-то действие (зажечь лампочку, заставить сработать счетчик и т. п.).

Предельный характер скорости света в известной мере отражен в преобразованиях Лоренца, ибо корень $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ при скорости v , большей c , становится мнимым. В соответствии с этим с частной теорией относительности несовместимы допущения о мгновенном действии на расстоянии.

Возьмем, например, два одноименных покоящихся заряда e_1 и e_2 (рис. 4). Согласно закону Кулона заряды e_1 и e_2 отталкиваются с силой $F = e_1 e_2 / r^2$, направленной по линии, их соединяющей (очевидно, закон Ку-



Рис. 4. При смещении заряда e_1 на расстояние Δr заряд e_2 «почувствует» изменение силы только через время $t_{\text{зап}} = r/c$.

лона является аналогом ньютоновского закона всемирного тяготения). Приблизим теперь заряд e_1 на расстояние Δr к заряду e_2 . Если пользоваться законом Кулона, то сила между зарядами сразу же должна измениться и стать равной $e_1 e_2 / (r - \Delta r)^2$. Фактически же заряд e_2 «почувствует» изменение силы только через время $t_{\text{зап}} = r/c$ после смещения заряда e_1 . Этот факт и отражается в утверждении, что закон Кулона есть закон электростатики, в электродинамике же для движущихся зарядов справедливы более общие законы, согласующиеся с фактом конечности (а не бесконечности) скорости распространения любых возмущений.

Созданная Фарадеем и Максвеллом в XIX веке электродинамика находится в согласии с принципом конечности скорости света, в силу чего частная теория относительности ее по сути дела не изменила. Но механику Ньютона пришлось обобщить, т. е. сформулировать более общие законы механики, которые переходят в ньютоновские для тел, движущихся с достаточно малой ско-

ростью. Впрочем, определенные изменения были внесены также в законы электродинамики, действующие при наличии среды, а также в другие разделы физики. Подобная задача — приведение физических законов в соответствие с требованиями частной теории относительности — возникла и в отношении тяготения (гравитации). Именно эта задача оказалась особенно трудной, а ее решение привело к созданию общей теории относительности.

ОБ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Общая теория относительности представляет собой теорию тяготения, находящуюся в согласии с требованием конечности скорости распространения любых «сигналов», в том числе сил тяготения. Согласно общей теории относительности тяготение проявляется в неевклидовости пространства и времени.

Ньютоновская теория всемирного тяготения, в которой силы действуют на расстоянии без всякого запаздывания, совершенно очевидным образом не удовлетворяет требованиям теории относительности. Успех же ньютоновской теории связан с малой скоростью планет по сравнению со скоростью света — об этом уже упоминалось. Поэтому в небесной механике малы поправки, обусловленные запаздыванием и вообще конечностью скорости света. Такое утверждение ясно и из следующего сопоставления: свет от Земли до Солнца идет 8 мин, что примерно в 60 000 раз меньше года — времени обращения Земли вокруг Солнца.

Ясно, таким образом, что ньютоновская теория гравитации — это гравитостатика, аналогом которой является электростатика с ее законом Кулона. Необходимость создания релятивистской теории гравитации (тяготения) была осознана сразу же после возникновения частной теории относительности. Но задача оказалась очень сложной, и построение релятивистской теории тяготения — общей теории относительности — заняло у Эйнштейна почти 10 лет и потребовало поистине титанических усилий.

Дело здесь в том, что можно предложить несколько теорий тяготения, удовлетворяющих требованиям частной теории относительности. Действительности же отвечает лишь одна. Конечно, как всегда в естествознании, правильная теория может быть отобрана в результате сравнения теорий с опытом и наблюдениями *). Но как раз таких решающих наблюдений тогда еще не было сделано.

*) Вопрос о сравнении теории с опытом и о выборе правильной теории является в целом далеко не простым. Об этом подробнее речь идет в статье «Об экспериментальной проверке общей теории относительности», помещенной в настоящем сборнике.

И тем не менее Эйнштейн нашел правильный путь, который к тому же не является простейшим. В самом деле, проще всего обобщить ньютоновскую теорию тяготения, по-прежнему считая гравитационный потенциал ϕ скаляром — величиной, одинаковой во всех системах отсчета. Изменяется или, точнее, дополняется при этом лишь уравнение, которому должен подчиняться потенциал ϕ . Если в новом уравнении, которое приведено в приложении, формально считать скорость света c бесконечной (речь идет о рассмотрении движений со скоростями, пренебрежимо малыми по сравнению со скоростью света c), то это новое уравнение

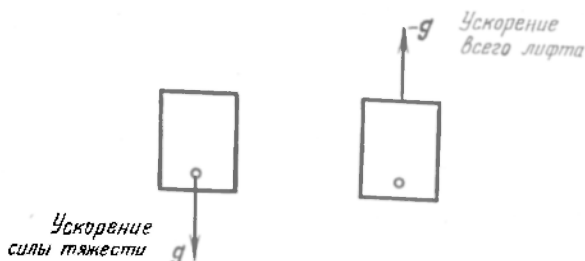


Рис. 5. «Лифт» Эйнштейна.

переходит, конечно, в старое, определяющее ньютоновский потенциал. Подобная релятивистская теория тяготения не только в принципе допустима, но и фактически развивалась, особенно немецким физиком Нордстремом, в то же время, когда Эйнштейн создавал общую теорию относительности. Впрочем, и сам Эйнштейн начал именно с такой скалярной теории тяготения, но вскоре убедился, что идти нужно другим путем.

Основным для построения общей теории относительности является выявление глубокой связи между тяготением и геометрией пространства-времени (иными словами, геометрией нашего трехмерного пространства и кинематикой — зависимостью координат различных событий от времени).

Существование такой связи можно уяснить на примере лифта, использованного еще Эйнштейном. Представим себе закрытую кабину обычного лифта в двух ситуациях. В первом случае лифт стоит на земной поверхности. При этом поле земного тяготения в пределах кабины можно с огромной точностью считать однородным, и, таким образом, в любом углу лифта тела будут падать с одним и тем же ускорением силы тяжести (рис. 5; вектор g по длине равен g и направлен так, как указывает стрелка). Во втором случае представим себе тот же лифт в межзвездном пространстве, вдали от всех звезд, и сообщим ему ускорение $-g$. При этом все тела будут двигаться в лифте (относительно его стенок)

совершенно так же, как в первом случае, т. е. падать на пол лифта с ускорением g . Такая эквивалентность двух систем в отношении механических движений была известна очень давно, она является прямым следствием равенства «инертной массы» тела $m_{\text{и}}$ и «тяжелой» массы $m_{\text{т}}$ того же тела. В силу этого равенства обычно пользуются одним понятием массы $m = m_{\text{и}} = m_{\text{т}}$, и нам придется поэтому еще кое-что пояснить.

Второй закон Ньютона, или, как говорят, уравнение движения гласит: масса тела, умноженная на его ускорение a , равна действующей на тело силе F . Фигурирующая в этом законе масса характеризует инерцию тела и называется его инертной массой $m_{\text{и}}$ (таким образом, $m_{\text{и}}a = F$). Вместе с тем, если сила F есть ньютоновская сила всемирного тяготения, то она сама пропорциональна тяжелой массе тела, но заранее нет оснований эту массу $m_{\text{т}}$ считать строго равной массе $m_{\text{и}}$. Опыт, однако, свидетельствует о равенстве масс $m_{\text{и}}$ и $m_{\text{т}}$, причем сейчас это установлено с фантастической точностью (разность масс $m_{\text{и}}$ и $m_{\text{т}}$ меньше массы $m_{\text{и}} - m_{\text{т}}$ по крайней мере в несколько сотен миллиардов раз). Поскольку массы $m_{\text{и}}$ и $m_{\text{т}}$ равны, то все тела будут независимо от их массы двигаться в поле тяжести совершенно одинаково (в поле тяжести масса $m_{\text{и}} = m_{\text{т}} = m$ просто сокращается в уравнении движения). Так оно, конечно, и есть, например, при падении тел на Землю в пустоте. В ньютоновской механике равенство инертной и тяжелой масс просто констатировалось, но не было ни объяснено, ни использовано для понимания природы тяготения. Эйнштейн же рассматривал равенство тяжелой и инертной массы в качестве отправного пункта для создания новой теории тяготения.

Как сказано, находясь в лифте, нельзя отличить, действует ли на движение тел однородное в пространстве и постоянное во времени поле тяжести g или весь лифт равномерно ускорен (с ускорением $-g$). Естественно предположить — так Эйнштейн и поступил, — что подобная эквивалентность имеет место буквально для всех физических явлений и процессов, а не только для механических движений. Принцип эквивалентности, к которому мы, таким образом, приходим, и лежит в основе общей теории относительности.

Если однородное и постоянное поле тяготения влияет на все физические процессы совершенно так же, как равномерное ускорение системы отсчета, то и произвольное поле тяготения можно связать с геометрией и кинематикой. В самом деле, в пределах достаточно малой области пространства и в течение достаточно короткого интервала времени любое поле тяготения можно считать однородным и постоянным. Поэтому в любой малой пространственно-временной области поле тяготения можно «исключить» (т. е. устранить его действие) выбором ускоренной системы отсчета.

Если представить себе как бы «жидкую» систему отсчета, ускорение которой в разных точках различно, то можно исключить и более сложные поля тяготения. Это не значит, однако, что любое поле тяготения можно «навсегда» ликвидировать выбором системы отсчета. Например, поле тяжести Земли направлено к ее центру и может быть на некоторое время исключено, если выбрать свободно падающую на центр Земли систему отсчета. Но совершенно очевидно, что использование такой свободно падающей системы ограничено во времени. Следовательно, речь идет не о том, чтобы полностью «свести» поле тяжести к выбору системы отсчета. Можно лишь показать, что поле тяготения допустимо полностью характеризовать величинами, определяющими свойства пространства и времени или, как говорят, геометрию пространства-времени.

Таких величин десять и они в совокупности называются метрическим тензором и обозначаются символом g_{ik} . Смысл записи g_{ik} таков: индексы i и k соответствуют координатам x , y и z и времени t , причем обычно устанавливают такое соответствие: t — индекс 0, x — индекс 1, y — индекс 2, z — индекс 3. Величины g_{10} и g_{01} и аналогичные равны между собой, и, таким образом, всего имеется именно десять независимых величин: g_{00} , g_{11} , g_{22} , g_{33} , g_{10} , g_{20} , g_{30} , g_{12} , g_{13} , g_{23} , которые и можно записать в символической форме g_{ik} . При переходе от одной системы отсчета пространственных координат и времени к другой изменяются как сами координаты x , y , z и t , так и величины g_{ik} .

Существуют, однако, другие величины, которые не зависят от системы отсчета или, как говорят, являются инвариантными. Поясним это на примере плоскости, на которой находятся две близкие точки. Расстояние между этими точками Δr не зависит от выбора системы координат на плоскости. В наиболее привычных нам прямоугольных координатах x и y квадрат расстояния

$$(\Delta r)^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2,$$

где Δx и Δy — разности координат x и y для рассматриваемых точек. В произвольной же системе координат x' и y' на той же плоскости

$$(\Delta r)^2 = g_{11} (\Delta x')^2 + 2g_{12} \Delta x' \Delta y' + g_{22} (\Delta y')^2.$$

Для трехмерного пространства (координаты x , y , z) и четырехмерного пространства-времени (координаты x , y , z и t) ситуация аналогична. С помощью величины g_{ik} можно выразить все свойства пространства-времени.

Итак, в общей теории относительности поле тяготения описывается величинами g_{ik} , которые в известном смысле приходят

на смену одной величине — ньютоновскому потенциалу φ . Потенциал φ описывает статическое поле тяготения, если оно является достаточно слабым. Как оказывается, для этого потенциал φ должен быть по абсолютной величине мал по сравнению с c^2 (или, что то же самое, скорость тел, движущихся в поле φ , мала по сравнению со скоростью света c *).

В отсутствие тел (практически на большом расстоянии от всех массивных тел) можно ввести инерциальную систему отсчета, в которой $g_{11} = g_{22} = g_{33} = -1$, $g_{00} = 1$ и все остальные g_{ik} равны нулю. Помещая в эту систему отсчета некоторое невращающееся тело (например, звезду), создающее слабое поле тяготения, будем иметь $g_{11} = g_{22} = g_{33} = -1 + 2\varphi/c^2$, $g_{12} = g_{23} = g_{10} = g_{20} = g_{30} = 0$ и $g_{00} = 1 + 2\varphi/c^2$.

В достаточно слабом поле мы фактически возвращаемся к ньютоновской теории. Даже на поверхности Солнца $\varphi/c^2 = -GM_{\odot}/(r_{\odot}c^2) = -2,12 \cdot 10^{-6}$ (масса Солнца $M_{\odot} = 1,99 \cdot 10^{33}$ г, радиус Солнца $r_{\odot} = 6,96 \cdot 10^{10}$ см), т. е. величина g_{00} очень близка к единице и ньютоновское приближение оказывается весьма хорошим (в этом приближении отличие величин g_{11} и других от -1 роли не играет).

Но все же отклонения от ньютоновской теории можно наблюдать уже в пределах Солнечной системы. Эйнштейн указал на три таких эффекта, которые можно наблюдать уже в пределах Солнечной системы, и все они действительно были обнаружены. Первый эффект — изменение частоты света при его распространении в поле тяготения, второй — дополнительный поворот орбит планет и спутников, и третий эффект — отклонение световых лучей, проходящих вблизи Солнца. Здесь нет возможности сколько-нибудь подробно останавливаться на вопросе о проверке общей теории относительности **), имы ограничимся для примера только эффектом отклонения лучей. Он состоит в том, что видимое положение звезд на небе изменяется, если световые лучи

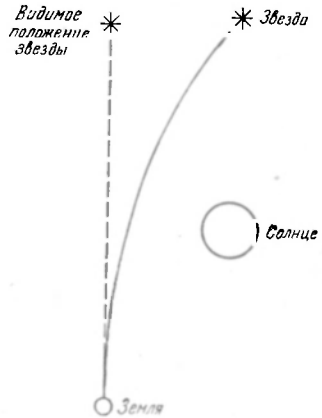


Рис. 6. Солнце отклоняет проходящие вблизи него световые лучи (на рисунке отклонение лучей сильно преувеличено).

*) Здесь имеется в виду, скажем, движение планеты со скоростью v по круговой орбите с радиусом r . Тогда, как известно, $v^2/r = Gm/r^2 = |\varphi|/r$, т. е. $v^2 = |\varphi|$.

**) С содержанием этого вопроса можно ознакомиться по включенной в настоящий сборник статье «Об экспериментальной проверке общей теории относительности».

проходят вблизи Солнца (рис. 6). Для обнаружения такого изменения оптическим методом небо фотографируется во время полного солнечного затмения, чтобы можно было зафиксировать звезды, свет от которых проходит близко от яркого солнечного диска. Через некоторое время (скажем, через полгода) Солнце будет находиться в силу годичного движения Земли уже в другой области звездного неба и можно получить фотографию тех же звезд, что и в первом случае, но уже в условиях, когда световые лучи практически не отклоняются.

Отклонение луча, даже проходящего совсем близко к солнечному диску, достигает лишь $1^{\circ},75$ (под таким примерно углом человек был бы виден с расстояния 200 км). Но это отклонение удалось измерить впервые в 1919 г. и затем раз десять в последующие годы. Наблюдения подтверждают результат общей теории относительности в пределах достигнутой точности, составляющей примерно 10%. Кстати сказать, в скалярной релятивистской теории тяготения, о которой мы упоминали, отклонение световых лучей места не имеет, и поэтому ее можно считать полностью опровергнутой *).

Тот факт, что световые лучи распространяются вблизи тел не по прямым линиям, отражает, вероятно, самое глубокое следствие общей теории относительности. Именно, при наличии полей тяготения пространство уже перестает быть евклидовым; то же можно сказать и о четырехмерном пространстве-времени. В неевклидовом пространстве нет ничего загадочного. Например, на сферической поверхности геометрия не является евклидовой и, скажем, сумма углов треугольника не равна 180° . Конечно, представить себе замкнутое неевклидово трехмерное пространство довольно трудно, но сравнительно небольшие отклонения от евклидовой геометрии вполне наглядны.

Представление о том, что геометрия реального пространства (Вселенной) является евклидовой, было обобщением повседневного опыта, но при переходе к большим расстояниям или в случае измерений с достаточно высокой точностью оно вполне может оказаться неверным. Такой вывод и был сделан еще в прошлом веке Гауссом, Лобачевским и Риманом после создания неевклидовой геометрии.

Итак, общая теория относительности показала, что пространство (и пространство-время) и в самом деле не является евклидовым, а опыт подтвердил это заключение. Геометрия пространства-времени определяется материей, зависит от нее. Тяготение,

*) Если оптические наблюдения подтверждают результат общей теории относительности лишь с упомянутой точностью в несколько или в 10%, то другие методы проводят и согласно с теорией с точностью до 1% (см. статью, цитированную в предыдущем примечании).

можно сказать, полностью отражается в отклонении геометрии пространства-времени от евклидовой. Отсюда особенно ясно, что поле тяготения отнюдь не сводится к кинематике, не может быть полностью создано или «исключено» выбором системы отсчета. В самом деле, как бы мы ни выбирали систему отсчета (координаты) в евклидовом пространстве, от этого пространство неевклидовым не станет. Иначе говоря, неевклидовость пространства служит признаком существования «истинного» поля тяготения.

СФЕРИЧЕСКИЙ МИР ЭЙНШТЕЙНА

На основе общей теории относительности ее создатель Альберт Эйнштейн в 1917 г. предложил новую модель Вселенной. Согласно этой модели Вселенная представляет собой замкнутое в себе трехмерное пространство (трехмерную сферу), объем которого конечен и не изменяется во времени.

Доэйнштейновская космология, как мы видели, столкнулась с глубокими затруднениями. Естественная, казалось бы, стационарная однородная евклидова (СОЕ) модель явно «не проходит». Значит, нужно отказаться по крайней мере от одного из «трех китов», на которые она опирается: от стационарности, от однородности или от евклидовости пространства. Правда, имеется и еще одна возможность — видоизменить ньютоновскую теорию всемирного тяготения. Общая теория относительности обобщила ньютоновскую теорию тяготения, устранив противоречие с принципом конечности скорости распространения любых взаимодействий. При этом выяснилось, что геометрия пространства не является, вообще говоря, евклидовой.

В такой ситуации вполне естественно, что современная космология, базирующаяся на общей теории относительности, начала свое развитие с отказа не от стационарности или однородности Вселенной, а от ее евклидовости. Вселенная Эйнштейна, родившаяся в его работе 1917 г., — это трехмерный сферический мир.

Мы живем в трехмерном мире. Формально это значит, что положение любой точки определяется тремя величинами (три координаты точки в какой-то системе отсчета). Обычные для нас поверхности являются двумерными, а линии — одномерными образованиями. Поверхность Земли тоже, очевидно, двумерна и с довольно хорошей точностью представляет собой сферу, т. е. поверхность шара. Сейчас об этом знают и, видимо, не удивляются дети школьного возраста. Но было время, когда шарообразность Земли и связанную с ней возможность существования антиподов объявляли абсурдом. Только кругосветное путешествие

Магеллана, завершившееся 6 сентября 1522 г., положило конец сомнениям или, во всяком случае, доказало отсутствие «края» Земли.

Трехмерная сфера подобна двумерной — можно сказать, что она так же связана с обычной сферой, как обычная (двумерная) сфера с «одномерной сферой» — окружностью. Никаких «краев» у трехмерной сферы, очевидно, нет, но ее объем конечен, подобно тому, как конечна поверхность двумерной сферы *).

Убедиться в том, что Земля не является плоской, можно, и не совершая кругосветного путешествия. Например, еще в далекие времена было замечено, что сначала исчезает корпус удаляющегося от берега корабля, а потом уже его мачты. И это наблюдение было правильно интерпретировано — возникла гипотеза о шарообразности Земли. Правда, мачта корабля находится не на земной поверхности, а уже в третьем измерении. Но можно убедиться в шарообразности Земли и с помощью измерений, проводимых только на ее поверхности (достаточно сказать, что сумма углов сферического треугольника больше двух прямых, т. е. больше 180°).

Точно так же наблюдения с Земли позволяют в принципе определить, является ли окружающее пространство евклидовым или нет. Отклонение световых лучей вблизи Солнца доказывает, что некоторая «местная неевклидовость» действительно имеется. Но в моделях однородной Вселенной на такие местные отклонения, вообще говоря, не обращают внимания; в этих моделях речь идет о кривизне пространства «в среднем» (пользуясь все той же аналогией с поверхностью Земли, можно сказать, что имеется в виду кривизна «сглаженной» Земли без учета гор и ущелий).

Для нахождения радиуса кривизны Вселенной нужно измерять огромные расстояния порядка нескольких миллиардов световых лет. Не удивительно поэтому, что и до сих пор радиус кривизны Вселенной не измерен и, более того, не доказано, что ее объем конечен. Тем не менее уже можно утверждать, что если объем все же конечен (что вполне возможно), то радиус мира в нашу эпоху по порядку величины равен 10^{10} световых лет, т. е. составляет 10^{28} см (отсюда его объем $V = 2\pi^2 R^3$ порядка 10^{85} см³).

Мир Эйнштейна, как сказано, это именно такой мир — неевклидов, замкнутый (трехмерная сфера), в среднем однородный и неизменный во времени.

*) Объем трехмерной сферы с радиусом R равен $2\pi^2 R^3$, тогда как поверхность двумерной сферы равна $4\pi R^2$, а объем ограничиваемой ею области трехмерного евклидова пространства (объем обычного шара) равняется $\frac{4}{3}\pi R^3$. Шар, конечно, имеет границы, а трехмерная сфера их не имеет. Это различие находит отражение и в неравенстве объемов $2\pi^2 R^3$ и $\frac{4}{3}\pi R^3$. Трехмерная сфера — пример трехмерного неевклидова пространства (конкретно, пространства с постоянной кривизной).

Эйнштейн, предложив такую сферическую модель Вселенной, попытался с помощью уравнений общей теории относительности связать радиус кривизны R_0 и среднюю плотность вещества в мире ρ_0 (индексом 0 отмечаем, что речь идет об эйнштейновской модели). Выяснилось, однако, что уравнения для гравитационного поля — метрического тензора g_{ik} , которые были установлены Эйнштейном ранее (окончательно в 1915 г.), не имеют соответствующего решения! Отсюда следует, казалось бы, что в рамках общей теории относительности стационарная модель противоречива.

Но это не так или не вполне так, поскольку уравнения допускают одно (и только одно) простое обобщение, а именно: к ним можно добавить член вида λg_{ik} (см. приложение в конце настоящей статьи). Тем самым в теорию вводится новая постоянная, обозначенная Эйнштейном греческой буквой λ (лямбда). Поэтому и новый член в уравнениях тяготения получил название лямбда-члена (чаще пишут так: Λ -член, используя не строчную, а прописную букву лямбда). Уравнения для поля g_{ik} с Λ -членом уже имеют не зависящее от времени (стационарное, а можно сказать также статическое) сферическое решение, причем радиус кривизны пространства $R_0 = 1/\sqrt{\Lambda}$, а средняя плотность материи в мире составляет $\rho_0 = c^2 \Lambda / (4\pi G)$ (следовательно, $R_0 = c \sqrt{4\pi G \rho_0}$). Если положить $R_0 = 10^{28}$ см, то $\Lambda = 10^{-56}$ см⁻² и $\rho_0 = 10^{-29}$ г/см³. Для газообразного водорода с такой плотностью концентрация атомов равна примерно 10^{-5} см⁻³, т. е. один атом приходится на объем в 100 л. При атмосферном давлении и комнатной температуре в таком объеме находится около $5 \cdot 10^{24}$ атомов водорода.

Вся масса вещества в такой модели

$$M_0 = 2\pi^2 R_0^3 \rho_0 \approx 2 \cdot 10^{56} \text{ г,}$$

что в 10^{23} раз больше массы Солнца, примерно равной $2 \cdot 10^{33}$ г. Масса нашей Галактики, представляющей собой большую спиральную галактику, равна примерно 10^{11} масс Солнца, т. е. в мире Эйнштейна с выбранными выше параметрами могло бы находиться 10^{12} галактик, подобных нашей. Такого числа галактик в реальной Вселенной не увидишь и в лучший из существующих сейчас телескопов. Вместе с тем число 10^{12} в самом деле является разумной оценкой для существующего во Вселенной числа галактик.

Но все это не значит, что модель Эйнштейна подтвердилась. Напротив, было выяснено, что она не отвечает действительности, ибо Вселенная нестационарна — ее свойства меняются во времени. Конкретно, Вселенная расширяется.

НЕСТАЦИОНАРНАЯ КОСМОЛОГИЯ ФРИДМАНА, И НЬЮТОНОВСКИЕ МОДЕЛИ ВСЕЛЕННОЙ

В 1922 г. А. А. Фридман выяснил, что, согласно общей теории относительности, Вселенная, вообще говоря, не остается неизменной во времени, а, напротив, должна расширяться или сжиматься. Фактически, однако, этот вывод не связан обязательно с общей теорией относительности и вполне понятен уже в рамках ньютоновской теории всемирного тяготения.

Сферический мир Эйнштейна органически связан с предположением о конечности объема Вселенной, но во времени этот мир неизменен, его возраст бесконечен. Предположение об изменении Вселенной во времени, например ее расширении, представляет собой еще один и даже более решительный шаг в сторону от классической космологической СТОE-модели.

Исторически к выводу о расширении Вселенной пришли двумя путями — в результате наблюдений и теоретически, на основе общей теории относительности. Только около 1929 г. оба пути окончательно слились воедино.

Нестационарные космологические модели были впервые построены в 1922 и 1924 гг. советским ученым А. А. Фридманом, причем без всякой связи с наблюдениями. Фридман показал, что уравнения общей теории относительности имеют решения, отвечающие однородному пространству, все расстояния в котором (скажем, расстояния между галактиками) изменяются во времени. Средняя плотность вещества, заполняющего пространство, при этом тоже, конечно, соответствующим образом меняется (так, при расширении Вселенной средняя плотность вещества, конечно, уменьшается). Фридман не отбросил Λ -член, но и без этого члена (т. е. при $\Lambda = 0$) существуют нестационарные решения трех типов.

Как мы видели, Λ -член был введен Эйнштейном при рассмотрении стационарной модели, можно сказать, по необходимости. В рамках нестационарной космологии Фридмана введение Λ -члена не необходимо и связано с внесением в теорию дополнительной неопределенной постоянной, значение которой можно найти только из сопоставления получающихся формул с наблюдениями. Одно из общих правил теоретической физики гласит, однако: если можешь не вводить лишней постоянной, то не вводи ее. Поэтому вполне естественно, что раньше всего нужно обсуждать и сравнивать с опытом космологические модели Фридмана без Λ -члена, а более общие модели детальнее анализировать, лишь если на это будут какие-то основания.

Интересно, что в 1967 г. такие основания, как тогда казалось, действительно появились, но об этом позже. Сейчас мы укажем, каково поведение во времени фридмановских моделей без

Λ -члена (для краткости только такие модели без Λ -члена мы и будем ниже называть фридмановскими).

Эти модели, по предположению, которое подтверждается наблюдениями, однородны и изотропны: средняя плотность вещества в них в данный момент времени везде одинакова, а все направления в пространстве эквивалентны. Усреднение при этом проводится по большому объему, включающему много галактик. Только для таких больших масштабов и имеет место расширение или, конкретно, удаление галактик друг от друга.

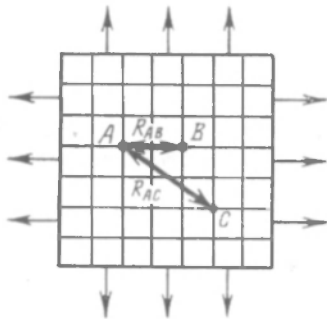


Рис. 7. Резиновая пленка, равномерно растягиваемая во все стороны, — двумерная модель расширяющегося евклидова пространства.



Рис. 8. Поверхность надуваемой резиновой камеры — двумерная модель расширяющейся трехмерной сферы,

Солнечная система, наша Галактика и даже группы (скопления) близких галактик связаны силами тяготения и в общем космологическом расширении не участвуют, т. е. не расширяются. Ситуация в этом отношении вполне аналогична расширению газа, состоящего из многоатомных молекул: расстояния между молекулами увеличиваются, но сами молекулы остаются неизменными, ибо атомы в них связаны между собой.

Имея в виду это замечание, забудем на время о «мелкой» структуре Вселенной и будем рассматривать удаленные друг от друга галактики лишь в качестве удобных меток для измерения расстояний. Если пространство евклидово, то его расширение мы непосредственно можем себе представить; на двумерной модели оно подобно расширению резиновой пленки, которую равномерно растягивают со всех сторон. Легко видеть на этом примере, что скорость удаления любых двух точек на пленке (скажем, точек A и B или A и C на рис. 7) пропорциональна расстоянию между точками. Таким образом, $v_{AB} = H R_{AB}$ и $v_{AC} = H R_{AC}$ (здесь, например, v_{AB} — скорость удаления точек A и B , т. е. изменение в единицу времени расстояния R_{AB} между этими точками). Расширение трехмерной сферы аналогично расширению привычной

для нас двумерной сферы, скажем, мыльного пузыря или надуваемой резиновой камеры. В пределах небольшого участка такой сферической пленки она мало чем отличается от плоской пленки, и по-прежнему имеем $v_{AB} = HR_{AB}$ (рис. 8).

Простейшая фридмановская модель (часто ее называют моделью Эйнштейна — де Ситтера, использовавших ее в 1932 г.; сам Фридман, по-видимому, этот случай вообще не рассматривал) такова: пространство евклидово, но расширяется, т. е. расстояния между метками (галактиками) в нем все время возрастает. Зависимость этого расстояния R от времени t в модели Эйнштейна — де Ситтера особенно проста (рис. 9) и имеет вид $R \approx \text{const} \cdot \sqrt{t^2}$. Для достаточно малых расстояний между «метками» скорость изменения расстояний R , которую мы обозначим через v , пропорциональна самому расстоянию R , т. е. $v = HR$.

Рис. 9. Расширение (изменение расстояний) в модели Эйнштейна — де Ситтера.

По причинам, ясным из дальнейшего, величину H в этом законе называют постоянной Хаббла. Она действительно должна быть

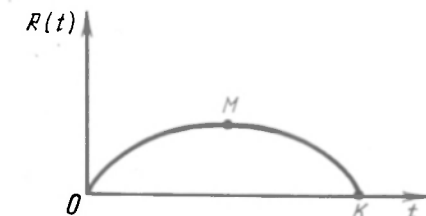


Рис. 10. Изменение во времени радиуса кривизны и расстояний в модели Фридмана с положительной кривизной (трехмерная сфера).

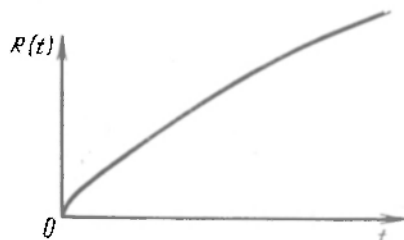


Рис. 11. Изменение во времени радиуса кривизны и расстояний в модели Фридмана с отрицательной кривизной.

одинаковой во всем пространстве, но H изменяется во времени — в рассматриваемой модели H падает со временем как $1/t$. Средняя плотность вещества в модели Эйнштейна — де Ситтера при данном H вполне определена и равна $\rho_k = 3H^2/(8\pi G)$.

А что будет, если средняя плотность вещества во Вселенной ρ не равна ρ_k ? Если ρ больше ρ_k , то в рамках фридмановских моделей речь будет идти о неевклидовом и конкретно о сферическом пространстве с переменным радиусом кривизны. Зависимость этого радиуса и других расстояний от времени t ясна из рис. 10; мир сна-

чала расширяется, а потом сжимается (участок MK) Если же плотность ρ меньше ρ_k , то расширение происходит неограниченно, но несколько быстрее, чем при $\rho = \rho_k$ (см. рис. 9 и 11). Геометрия модели неевклидова — это пространство с постоянной отрицательной кривизной (двумерный аналог такого пространства — поверхность гиперboloида).

Таковы три фридмановские модели Вселенной. Все они «начинаются» с точки — равного нулю значения t . Эту точку мы будем называть «началом». Ясно, что плотность вещества в «начале» бесконечна, да и вообще дело выглядит так, как если бы при $t = 0$ произошло «сотворение мира». На самом деле, конечно, область вблизи «начала» нужно обсудить особо, что мы в дальнейшем и сделаем. Сейчас достаточно рассматривать точку $R = 0$, $t = 0$ как условное «начало» — так было бы, если бы модель можно было применять вплоть до времени $t = 0$.

Вселенная на сегодняшний день явно удалена от «начала», и нас в первую очередь будет интересовать ее сравнительно недавнее прошлое, скажем, «всего» несколько миллиардов лет назад. О более отдаленном прошлом речь пойдет особо.

Мы описали модели Фридмана и сказали, что им отвечают решения уравнений общей теории относительности для однородного нестационарного мира. Вряд ли этим можно удовлетвориться. Невольно возникает вопрос, а почему же модель нестационарна, в чем же физическая причина ее нестационарности?

Весьма интересно, что лишь в 1934 г. англичане Милн и Маккри выяснили, что главная отличительная черта фридмановских моделей (их нестационарность) отнюдь не связана с особенностями общей теории относительности, а имеет весьма простую природу, вполне понятную уже в рамках ньютоновской механики.

В самом деле, представим себе огромный шар, состоящий из отдельных частиц, которые практически не сталкиваются между собой и лишь притягиваются друг к другу по закону всемирного тяготения. Роль «частиц» при этом вполне могут играть звезды.

Допустим далее, что в начальный момент все они покоились. Тогда под влиянием взаимного притяжения звездный шар будет сжиматься и его радиус будет уменьшаться в точности так, как меняется R на рис. 10, начиная от точки M и кончая точкой K .

Если же представить себе, что всем звездам, вначале занимавшим очень малый объем, сообщили большую начальную скорость в направлении увеличения радиуса шара, то этот радиус будет изменяться в точности так, как на рис. 9, 10 или 11, начиная с точки O .

Какой из рассмотренных трех случаев будет реализоваться, зависит от величины начальной скорости. Если она недостаточно велика, чтобы удалить звезды на бесконечность, то дело дойдет до остановки (прекращения расширения) и последующего сжатия (см. рис. 10). Движение, описываемое рис. 9, отвечает такой на-

чальной скорости, что при бесконечном расширении скорость звезд равна нулю; если же начальная скорость еще больше, то расширение идет быстрее и радиус увеличивается в согласии с рис. 11. Как оказалось, ньютоновская теория не только качественно, но даже количественно описывает ход расширения фридмановских моделей. Этот результат не случаен.

Общая теория относительности ведь не «отменила» ньютоновскую теорию тяготения, она ее только обобщила и содержит в качестве предельного случая — случая слабых полей тяготения. Количественное же совпадение между классическим и релятивистским расчетами для фридмановских моделей связано с однородностью и изотропностью пространства в этих моделях.

Таким образом, нестационарность моделей Вселенной, в которой действуют лишь силы тяготения, вполне понятна; она обусловлена просто тем, что для равновесия (статичности) нужно иметь силы двух типов — и притяжения, и отталкивания. Так оно и есть, например, в случае надутой резиновой камеры — давление воздуха стремится ее расширить, а силы упругости в резиновой оболочке действуют в обратном направлении.

Можно спросить, а почему такой простой факт так долго не замечали? Все дело в бесконечности классических моделей. Недаром выше мы считали звездный шар конечным, говорили о его радиусе. Фактически в ньютоновской теории можно перейти и к бесконечной системе, причем результат не изменится, но такой переход требует специального анализа, предельного перехода от конечной системы к бесконечной. Общая теория относительности обогнала в этом отношении ньютоновскую теорию именно потому, что в рамках общей теории относительности бесконечные системы рассматривать легче, а кроме того, имеются и конечные по объему сферические модели.

Подведем некоторый итог, к которому космология пришла в результате длинного и нелегкого пути.

Силы тяготения отвечают притяжению, и поэтому ни конечная, ни бесконечная изотропные и однородные стационарные модели Вселенной существовать не могут: в зависимости от «печальных условий» вещество в таких моделях будет либо расширяться, либо сжиматься. Этот вывод можно сделать уже в рамках ньютоновской теории, а общая теория относительности его не меняет.

Новое, что внесла общая теория относительности, — это в первую очередь неевклидовость, кривизна пространства. В результате оказалось, что ньютоновской модели с малой скоростью расширения, для которой плотность ρ больше плотности $\rho_k = = 3H^2/(8\pi G)$ *), отвечает сферический (замкнутый) трехмерный

*) Чем выше плотность, тем больше силы притяжения. В то же время значение ρ_k служит известным мерилем скорости расширения, поскольку $v = HR$, а плотность ρ пропорциональна H^2 .

мир с радиусом, изменяющимся во времени, как показано на рис. 10. При $\rho = \rho_k$ мир евклидов и ньютоновская модель уже в значительной мере совпадает с фридмановской. Наконец, при малой плотности (при плотности ρ , меньшей ρ_k) пространство неевклидово, но его объем бесконечен и расширение беспредельно.

КОСМОЛОГИЧЕСКОЕ КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Астрономические наблюдения показали, что Вселенная в нашу эпоху расширяется. Это значит, что далекие галактики разбегаются от нас. При этом, чем дальше находится галактика, тем быстрее она от нас удаляется. Окончательно этот результат был установлен в 1929 г.

Как выбрать ту или иную космологическую модель? Да и вообще, имеют ли обсуждавшиеся выше модели отношение к действительности? Ответить на эти вопросы можно только в результате наблюдений. Конкретно, нужно посмотреть, удаляются ли от

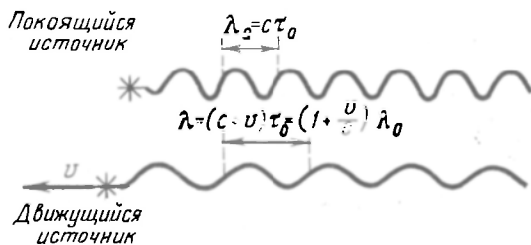


Рис. 12. Эффект Доплера. Пусть излучатель колеблется с периодом τ_0 , т. е. его частота $\nu_0 = 1/\tau_0$. Если излучатель неподвижен относительно наблюдателя, то за период τ_0 свет пройдет расстояние $\lambda_0 = c\tau_0$; такой и будет длина принимаемой волны. Если же излучатель удаляется от наблюдателя со скоростью v , то за время τ_0 свет пройдет расстояние $\lambda = (c + v)\tau_0 = (1 + v/c)\lambda_0$. Принимаемое излучение во втором случае будет иметь длину волны λ , причем $(\lambda - \lambda_0)/\lambda_0 = v/c$ (здесь предполагается, что $v \ll c$).

нас далекие галактики и по какому закону. К счастью, скорость звезд и галактик в принципе нетрудно измерить по доплер-эффекту, т. е. по изменению длины волны спектральных линий.

Для объяснения эффекта Доплера обычно ссылаются на изменение тона гудка, когда паровоз проходит мимо наблюдателя; при приближении паровоза высота (частота) звука увеличивается, а при его удалении она уменьшается. Добавим, что эффект Доплера характерен для любых волн и имеет кинематическую природу, ясную из рис. 12 и подписи к нему. При малых скоростях, когда только и справедливо это выражение, $(\lambda - \lambda_0)/\lambda_0 =$

$= v/c$ (здесь λ — длина волны света, испускаемого источником, удаляющимся от наблюдателя со скоростью v ; λ_0 — длина волны для той же спектральной линии в случае покоящегося источника). При больших скоростях v , сравнимых со скоростью света c , связь λ с λ_0 несколько сложнее (например, в рамках частной теории относительности при удалении источника $\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{1 + v/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1$,

а изменение частоты $\frac{v - v_0}{v_0} = \frac{\sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 + v/c} - 1$, где $v = c/\lambda$ и $v_0 = c/\lambda_0$.

Для нас сейчас существенно лишь то, измеряя длину волны λ или обычно используемый параметр $z = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$, можно определить скорость удаления галактики v (если бы галактика приближалась, то изменился бы знак z , так как в этом случае λ меньше λ_0). Увеличение длины волны отвечает смещению спектральных линий в красную часть спектра, в силу чего говорят о красном смещении спектральных линий (уменьшение длины волны называют фиолетовым смещением).

Ясно, что если Вселенная расширяется, то для далеких галактик будет наблюдаться красное смещение спектральных линий, причем тем большее, чем дальше галактика. Строго говоря, такой эффект наблюдался американским астрономом Слейфером еще до работы Эйнштейна 1917 г. Но эти наблюдения были, видимо, малоизвестны и, главное, малоубедительны. Основная причина здесь та, что тогда очень плохо умели измерять расстояние до галактик. Поэтому определялось практически лишь смещение спектральных линий, а для близких галактик оно часто оказывается фиолетовым. Объясняется это тем, что, помимо участия в общем расширении Вселенной, галактики имеют также некоторую хаотическую скорость, которая обычно не превосходит 1000 км/с (если $v = 10^8$ см/с, то $z = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0 = v/c = 0,003$; такое смещение линий уже легко измерить). Конечно, в результате хаотических движений появляются смещения $\lambda - \lambda_0$ обоих знаков. Наличие общего расширения в таких условиях проявляется в том, что красные смещения встречаются чаще, чем фиолетовые.

В результате не приходится удивляться тому, что не только Эйнштейн (в 1917 г.), но и Фридман (1922, 1924 гг.), насколько нам известно, ничего не знали о красном смещении спектральных линий в спектрах галактик.

Лишь к 1929 г. Э. Хаббл, работавший на самом большом в то время телескопе обсерватории Маунт Вильсон (диаметр зеркала 2,5 м), окончательно доказал, что удаленные галактики разбегаются, причем их скорость растет с расстоянием в согласии с соотношением $v = HR$, получившим название закона Хаббла. Насколько нелегко было при этом измерять расстояние R , ясно из того, что коэффициент H (его, как уже упоминалось, называют по-

стоянной Хаббла) был определен Хабблом весьма неточно; он занижил расстояния почти в 5 раз и тем самым во столько же раз завысил значение H . По современным данным, тоже еще не очень точным и надежным, $H_{\text{совр}} \approx 3 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$. Обратная величина $t_{\text{совр}} \sim 1/H_{\text{совр}} \approx 3 \cdot 10^{17} \text{ с} \approx 10^{10} \text{ лет}$ *).

Как мы видели раньше, в фридмановских моделях для не слишком удаленных галактик (пока $z = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$ существенно меньше единицы) как раз и должен иметь место закон Хаббла. Таким образом, можно сказать, что Хаббл доказал расширение Вселенной и правдоподобность фридмановской космологии по крайней мере для обозримого прошлого. Такое заключение все же столь фундаментально, что было принято не всеми и не сразу. Делались попытки объяснить красное смещение каким-либо способом, отличным от его интерпретации как эффекта Доплера. Что будет, например, если свет во время своего путешествия по беспредельным просторам Вселенной изменяет свою частоту (часто говорят об этом гипотетическом процессе как о «старении» фотонов — частиц, из которых, согласно квантовым представлениям, состоит свет)? Такая возможность детально обследовалась, и было установлено, что ни один известный в физике эффект (кроме, конечно, доплер-эффекта) не может привести к наблюдаемому смещению спектральных линий.

В то же время доплеровская интерпретация красного смещения находит все новые подтверждения (в случае доплер-эффекта параметр $z = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$ не должен зависеть от длины волны, он должен быть универсальным; это и наблюдается для широкого диапазона длин волн — от области радиоволн до фиолетовой части спектра).

Более рафинированная атака на нестационарную космологию была начата в 1948 г. Допустим, что далекие галактики действительно удаляются, но значит ли это, что их число в каком-то заданном объеме уменьшается или, другими словами, что уменьшается со временем средняя плотность вещества во Вселенной?

*) Как сказано, по данным Хаббла значение $t_{\text{совр}}$ составляло всего примерно $2 \cdot 10^9$ лет. Отсюда следовало, что во фридмановских моделях возраст Вселенной (время, прошедшее от «начала») меньше возраста Земли, достигающего нескольких миллиардов лет. Такой результат, конечно, абсурден и рассматривался в качестве аргумента против фридмановских моделей. В этом отношении, очевидно, беспокойство оказалось совершенно напрасным и полностью обусловленным неточностью измерения расстояния до далеких галактик (точнее, ошибка была допущена при определении расстояния до близких галактик, которое затем использовалось для определения расстояния до далеких галактик). Постоянную Хаббла обычно измеряют в км/(с·Мпс), где мегапарсек (Мпс) = $3,086 \cdot 10^{24}$ см $\approx 3 \cdot 10^{24}$ см. Таким образом, значение $H_{\text{совр}} \approx 3 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1} \approx 100 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпс})$. Сейчас чаще используют значение $H_{\text{совр}} = 50 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпс})$, но вопрос еще не выяснен, и мы будем пользоваться величиной $H_{\text{совр}} = 100 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпс})$.

Казалось бы, такой вывод неизбежен, но это не так, если взамен вещества, уходящего из данного объема в силу расширения, все время «рождается» новое вещество. Откуда «рождается», каким образом? Вопросы законные, но отсутствие ответа на них еще не опровергает саму гипотезу. И действительно, она была выдвинута и отстаивалась до сравнительно недавнего времени в качестве одной из космологических возможностей. При этом предполагалось, что вещество рождается как раз в таком количестве, что Вселенная, несмотря на расширение, остается стационарной, т. е. ее средняя плотность не меняется во времени.

Автор настоящей статьи, как и большинство других физиков и астрономов, всегда относился к стационарной космологической модели, в которой допускается «рождение» вещества, резко отрицательно. Но такие вопросы не решаются голосованием в зависимости от вкусов или даже весьма обоснованных соображений теоретического характера. В самом деле, ведь и во фридмановских моделях имеется далеко не обычная особенность в прошлом — в «начале» (т. е. в начале координат O на рис. 9, 10 и 11) плотность вещества бесконечна. Вся Вселенная здесь как бы рождается в момент $t = 0$. С другой стороны, количество вещества, которое должно рождаться в стационарной космологии, по земным масштабам ничтожно. Там должно появляться всего примерно 3 атома в год в кубе с ребром в 1 км. В таком объеме при атмосферном давлении находилось бы около $3 \cdot 10^{34}$ молекул воздуха. Естественно, что заметить появление нескольких атомов в дополнение к мириадам имеющихся мы в лаборатории не можем или, точнее говоря, на основе имеющихся наблюдений не можем отрицать возможности их появления. Наконец, на возражение о невозможности появления нового вещества «из ничего» сторонники стационарной космологии отвечают, что вещество в их модели рождается каким-то «новым полем», что речь идет о превращении одной «формы материи» (неизвестной нам) в другую — нам известную.

Такие аргументы, правда, очень уж напоминают рассуждения о «медиумической энергии», которые Лев Толстой поместил в «Плодах просвещения», издеваясь над псевдонаукой. Тем не менее нужно признать, что мы опять приходим к универсальному для всего естествознания заключению — подлинным и беспелляционным судьей, решающим судьбы новых гипотез, являются опыт и наблюдения. В данном случае в отношении судьбы стационарной космологии с «рождением» вещества вопрос решить в принципе очень просто. В этой модели средняя плотность вещества неизменна во времени, в то время как в расширяющихся фридмановских и других аналогичных моделях плотность в прошлом была выше, чем в нашу эпоху. В частности, это относится и к числу галактик — их плотность в прошлом должна быть выше.

К сожалению, измерять плотность всего вещества во Вселенной мы еще не умеем, подсчет же числа галактик в зависимости от расстояния тоже весьма затруднен в связи с трудностью измерения расстояния и существованием галактик с весьма различными свойствами, в частности с различной яркостью.

Забегая вперед, укажем, что, несмотря на все трудности, сейчас все же можно считать доказанным, что в прошлом число галактик было больше, чем сейчас, и, кроме того, средние свойства галактик изменяются во времени (в прошлом было больше очень ярких объектов). Против стационарной космологии свидетельствует и открытое в 1965 г. реликтовое тепловое излучение, о котором речь пойдет ниже. В результате стационарная космологическая модель может считаться опровергнутой. Но история появления этой модели, трудность ее опровержения, несмотря на всю ее необычность, весьма поучительны и характерны для развития космологии, поэтому об этом и не стоило умалчивать.

РАДИОГАЛАКТИКИ И КВАЗАРЫ — СВИДЕТЕЛИ ДАЛЕКОГО ПРОШЛОГО

Особенно большие скорости «разлета» удалось установить для радиогалактик и квазаров — квазизвездных объектов.

Жителям шарообразной Земли не нужно долго объяснять, что на небольшом участке земной поверхности Землю не отличишь от плоской. Точно так же выбор между различными фридмановскими моделями нельзя сделать, пользуясь только законом Хаббла $v = HR$, справедливым для всех моделей. Последнее понятно, ибо закон Хаббла справедлив только для скоростей v , малых по сравнению со скоростью света c , или, что то же самое, для красных смещений с малым параметром $z = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$. Хаббл и установил свой закон на материале, где максимальное значение z не превосходило примерно 0,1. Соответствующая скорость $v \approx \approx 0,1 c = 3 \cdot 10^9$ см/с огромна, а излучающая галактика удалена на миллиард световых лет, но все же этого недостаточно для определения кривизны пространства.

Нужно, очевидно, исследовать спектры еще более удаленных галактик, но это трудно сделать даже с помощью самых больших работающих в настоящее время телескопов: Паломарского телескопа с диаметром зеркала 5 м (он вступил в строй в 1948 г.) и начавшего работать в 1976 г. на Северном Кавказе телескопа с зеркалом с диаметром в 6 м, построенного в СССР.

Основная трудность была связана с тем, что в обозримое время можно получить сотни спектрограмм, в то время как галактик, скажем, с z , меньшим 0,5, имеется несколько миллиардов. Если выбирать галактики для съемки наугад, то шансов получить

интересный результат очень мало. Понятно поэтому, что удалиться в глубь времен удалось лишь тогда, когда появился какой-то признак для отбора «интересных» для исследования объектов. Таким признаком служит наличие мощного радиоизлучения. Светимость (мощность излучения) галактик в оптической части спектра неодинакова, но для больших галактик даже разного типа (спиральных, эллиптических) различается не так уж сильно.

Иное дело радиоизлучение; обнаружены галактики, исключительно яркие в радиодиапазоне и получившие поэтому название радиогалактик. Так, например, радиогалактика Лебедь А излучает на радиоволнах около $5 \cdot 10^{44}$ эрг/с, что раз в пять больше ее оптической светимости. В то же время наша Галактика, не принадлежащая к числу радиогалактик, излучает в радиодиапазоне всего $3 \cdot 10^{38}$ эрг/с, т. е. в миллион раз меньше, чем Лебедь А. Света же Галактика излучает около $5 \cdot 10^{43}$ эрг/с, что лишь раза в два меньше, чем Лебедь А. Не удивительно, что на «радионебе» Лебедь А, находящийся на расстоянии 600 млн. световых лет, «сияет» ярче большинства несравненно более близких радиоисточников.

Радиогалактиками являются (практически без исключений) только яркие эллиптические галактики. К настоящему времени радиотелескопы обнаружили на небе порядка 10 000 радиоисточников, из которых подробнее исследовано не более нескольких сотен. Из сказанного сразу ясно, что первыми кандидатами на изучение их спектра должны быть радиоисточники. Такой подход и принес успех.

В 1960 г. было определено красное смещение в спектре радиогалактики 3С 295 (объект № 295 в 3-м Кембриджском радиокаталоге — так расшифровывается эта запись). Оказалось, что в данном случае $z = 0,46$, т. е. объект удаляется со скоростью, равной почти половине скорости света, и находится от нас на расстоянии примерно в 5 млрд. световых лет. Для галактик этот рекорд был превзойден лишь сравнительно недавно (в 1977 г.). Но еще раньше на смену радиогалактикам пришли радиоисточники несколько другого типа — квазары.

На месте некоторых источников, указанных в 3-м Кембриджском радиокаталоге, были замечены не туманности, а «звездочки», во всяком случае, по внешнему виду. Сейчас эти «звездочки» именуют квазизвездными объектами, квазизвездными источниками или квазарами. Оказалось, что даже для ближайших к нам квазаров z порядка 0,1, а для самого яркого из близких квазаров — объекта 3С 273-В параметр $z = 0,16$ (именно для этого квазара и было в 1963 г. впервые измерено красное смещение).

В радиодиапазоне мощность излучения квазаров в среднем больше, чем у радиогалактик (хотя наиболее мощные радиогалактики и имеют радиосветимость большую, чем наименее мощные

квазары). Зато в оптической части спектра светимость квазаров исключительно велика — это самые яркие источники света во Вселенной. Квазар 3С 273-В, например, испускает видимого света примерно в 100 раз больше, чем наша Галактика. Отсюда следует, что квазары могут служить лучшими из известных свидетелями далекого прошлого. Так и оказалось. В 1965 г. было обнаружено, что для квазара 3С 9 параметр красного смещения $z = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0 = 2$. Это значит, что принимаемая длина волны утраивается.

Изучение источников с таким большим красным смещением, помимо всего прочего, открывает возможность наблюдать очень важные спектральные линии, которые в обычных условиях из-за поглощения в земной атмосфере никогда не фотографировались на земной поверхности. Наиболее яркий тому пример — известная линия водорода, называемая α -линией Леймана (переход со второго уровня атома водорода на первый). Длина волны этой линии $1216 \text{ \AA} = 1,216 \cdot 10^{-5} \text{ см}$, и она очень сильно поглощается даже тонким слоем воздуха. Но при $z = 2$ имеем $\lambda = 3\lambda_0 = 3648 \text{ \AA}$ и излучение свободно доходит до земной поверхности и оно действительно наблюдалось. Последний факт весьма многозначителен — он позволяет оценить количество неионизированного водорода вблизи квазара 3С 9 (оказалось, что такого водорода очень мало).

Сейчас получены спектры более 500 квазаров. Максимальное обнаруженное значение $z = 3,5$. Расстояние до такого квазара, если пользоваться простой фридмановской моделью (моделью Эйнштейна — де Ситтера), составляет около 8 млрд. световых лет.

Здесь нельзя умолчать о том, что вопрос о природе квазаров еще окончательно не решен и, главное, некоторые астрономы вообще усомнились в справедливости для квазаров космологической (т. е. обусловленной расширением Вселенной) интерпретации красного смещения. Дело в том, что для галактик (в том числе и радиогалактик) измеряется не только красное смещение, а как-то независимо (например, по угловому размеру оптической галактики) оценивается расстояние до них. В случае же квазаров нам известно лишь красное смещение. Вот и открылась возможность для экстравагантных гипотез вроде предположения о выбросе сгустка газа из ядра (плотной области) в центре нашей Галактики или ближайших радиогалактик.

Если не руководствоваться несомненно неверным тезисом, что «в астрономии все возможно», то для упомянутой гипотезы и ей подобных никогда не было достаточно серьезных оснований. В данный же момент имеются уже весьма убедительные доводы в пользу того, что квазары находятся далеко и представляют собой ядра галактик некоторых типов. Такое заключение подтверждается, во-первых, непосредственными наблюдениями (вокруг некоторых близких квазаров видна звездная галактика). Во-вторых,

у ряда более близких, чем квазары, и поэтому легче изучаемых галактик (особенно у спиральных особого типа, называемых сейфертовскими) имеются яркие ядра, очень напоминающие квазары. В этом случае, однако, расстояние до источников заведомо известно и оно совпадает с вычисленным по красному смещению. В общем, естественно думать, что квазары родственны ядрам галактик. Что касается строения квазаров и ядер галактик, то оно окончательно еще не выяснено. Сейчас чаще всего обсуждаются три модели. Согласно первой из них ядро (или, точнее, сердцевина или kern ядра) представляет собой очень плотное скопление звезд. В результате сжатия скопления и столкновений или вспышек (в качестве сверхновых) части входящих в скопление звезд оно и излучает много света. Вторая модель — это так называемые магнитоид или спинар. Речь идет о плазменном образовании с массой, достигающей сотен миллионов масс Солнца (масса Солнца $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33}$ г). Если бы это скопление газа не вращалось и в нем не было бы внутренних движений, а также магнитного поля, то оно быстро сжималось бы (коллапсировало) под влиянием сил тяготения. Вращение, внутренние движения и магнитные поля почти стабилизируют сердцевину квазара и она лишь медленно сжимается. При этом гравитационная энергия облака уменьшается, а выделяющаяся энергия в результате ряда процессов излучается квазаром. Третья модель сердцевины квазаров и ядер галактик — «черная дыра» с большой массой $M \sim (10^7 - 10^9) M_{\odot}$. Выбрать между этими моделями, к сожалению, весьма нелегко *). В плане настоящей статьи это, однако, не так уж важно — для нас существенно то, что за последние примерно 15 лет удалось, используя в качестве «светильников» радиогалактики и квазары, заглянуть значительно дальше «в глубь времен». Сейчас наблюдаются красные смещения, при которых длина волны увеличивается более чем вчетверо. Разбегание далеких галактик и квазаров не вызывает сомнений. Нестационарность Вселенной — изменение со временем ее средних характеристик (например, средней плотности) — также довольно убедительно доказана.

В моделях расширяющейся Вселенной не приходится встречаться с трудностями типа парадокса Ольберса или вывода о «тепловой смерти» Вселенной. Вопрос же, который возник уже давно (практически в 1929 г., после того как было уверенно установлено расширение Вселенной), состоит в выборе типа нестационарной модели и, в частности, в определении кривизны пространства. Пока наблюдались лишь сравнительно небольшие красные сме-

*) См. об этом: *Озерной Л. М.* — УФН, 1976, т. 120, с. 309. Здесь мы не имеем возможности останавливаться и на пояснении того, что представляют собой «черные дыры» (см. *Торн К.* — УФН, 1976, т. 118, с. 453; *Фролов В. П.* — УФН, 1976, т. 118, с. 473, а также книги, указанные в конце приложения к настоящей статье).

щения, ответить на такой вопрос было особенно трудно. В настоящее время положение изменилось, и выбор модели встал на повестку дня, стал совершенно реальной задачей. Вероятно, она в какой-то мере будет решена в сравнительно недалеком будущем.

ЛЯМБДА-ЧЛЕН И КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛЕМЕТРА

Одно время казалось, что в спектрах квазаров обнаружены своеобразные особенности, и это побудило поставить вопрос о проверке космологической модели Леметра. В этой модели Вселенная на некотором этапе сильно замедлила темп своего расширения и как бы почти застыла в неподвижности.

Наблюдения свидетельствуют о том, что галактики распределены на небе в среднем независимо от направления. Отсюда и делается вывод о возможности считать Вселенную (в пределах видимости) однородной и изотропной. Тем самым в известных пределах оправдано и сопоставление наблюдений с моделями однородной расширяющейся Вселенной. Но вот, можно ли здесь ограничиться тремя фридмановскими моделями, в которых Λ -член считается равным нулю? Такой вопрос обсуждается или хотя бы упоминается уже много лет в большинстве работ по космологии.

После того как выяснилось, что Вселенная расширяется, сам Эйнштейн, пожалуй, наиболее определенно высказался против введения Λ -члена. Но, согласно хорошо известной восточной поговорке, гораздо легче выпустить джина из бутылки, чем загнать его туда обратно. Введение Λ -члена явно допустимо, а аргумент, что можно обойтись и без него, не для всех сколько-нибудь убедителен. В общем «золотая середина» еще совсем недавно сводилась к следующему: введение Λ -члена допустимо, но не обязательно, и, главное, при скудости наблюдательных данных начинать сравнивать теорию с наблюдениями нужно без использования новой неизвестной постоянной Λ . А вот если такое сравнение натолкнется на трудности, тогда-то и можно будет всерьез подумать о Λ -члене. Долгое время подобная возможность казалась совершенно туманной, но вдруг туман начал проясняться.

Одно время некоторые астрономы-наблюдатели настаивали на том, что особенно много квазаров находится на расстоянии $z \approx 2$. В спектрах же этих квазаров, как утверждалось, для многих линий поглощения $z = 1,95$. Это значило бы, что во Вселенной в эпоху, которой отвечает значение $z = 1,95$, существовало большое скопление галактик (при прохождении света квазаров через межзвездный газ этих галактик как раз и образовались бы линии поглощения с $z = 1,95$). Затем в марте 1967 г. в издающемся в США «Астрофизическом журнале» В. Петросян, Э. Сальпи-

тер и П. Сдекерс поместили статью, в которой обратили внимание на то, что такая предполагаемая особенность в спектрах квазаров может естественным образом объясняться в рамках одной из космологических моделей с Λ -членом. Эту модель предложил в 1931 г. бельгийский астроном Г. Леметр, и она является частным случаем общих фридмановских моделей с Λ -членом.

Если ввести в уравнения тяготения Λ -член, то эти уравнения имеют одним из своих решений сферический мир Эйнштейна, причем в данном случае средняя плотность вещества $\rho_0 = c^2 \Lambda_0 / (4\pi G) = c^2 / (4\pi G \sqrt{\Lambda_0 R_0^3})$, поскольку радиус кривизны для мира Эйнштейна $\bar{R}_0 = 1/\sqrt{\Lambda_0}$ (см. выше). В свою очередь Λ_0 через ρ_0 выражается так: $\Lambda_0 = c^4 / (4\pi G \rho_0 R_0^3)^2 = 4\pi G \rho_0 / c^2$ (это выражение уже приводилось нами ранее, и сейчас мы лишь добавили индекс «0» к постоянной Λ). Дело в том, что для статического сферического мира плотность ρ и постоянная Λ связаны между собой. Λ что если при данной плотности ρ постоянная Λ немного больше или немного меньше $\Lambda_0 = c^4 / (4\pi G \rho R^3)^2$? Тогда, как показал еще Фридман, имеются только нестационарные решения, в частности при $\Lambda = 0$ получаем те фридмановские решения, о которых мы уже говорили (см. рис. 9, 10, 11). Особый и весьма интересный частный случай, который называют моделью Леметра, имеет место, если постоянная Λ немного больше значения $\Lambda_0 = c^4 / (4\pi G \rho R^3)^2$, отвечающего модели Эйнштейна *). В модели Леметра график зависимости радиуса кривизны R от времени t имеет площадку (рис. 13) как раз при R , близком к R_0 — радиусу мира Эйнштейна для данного значения Λ . Чем ближе Λ к Λ_0 , тем на большем интервале времени Вселенная будет близка по своим параметрам к статическому миру Эйнштейна.

Понять это нетрудно. Смысл введения Λ -члена на классическом языке состоит в том, что предполагается существование некоторой силы отталкивания, действующей помимо сил притяжения, обычных в теории тяготения. Без Λ -члена притяжение ничем не компенсируется, и если Вселенную «остановить», она начнет сжиматься.

В ньютоновской теории введение каких-то новых сил отталкивания представляется весьма странным, тем более, что эти силы должны возрастать с увеличением расстояния между телами и не должны зависеть от их массы. В общей теории относительности силы в явном виде не вводятся и не рассматриваются, а Λ -член естественным и органическим образом входит в теорию. Но сущность дела от этого в общем-то не меняется — фактически появ-

*) В модели Эйнштейна, как мы видели, безразлично, как записывать Λ_0 — в виде $4\pi G \rho_0 / c^2$ или $c^4 / (4\pi G \rho_0 R_0^3)^2$. Но в нестационарной модели плотность ρ изменяется, а величина ρR^3 , пропорциональная полной массе, остается постоянной; поэтому сравнивать, конечно, нужно Λ с $\Lambda_0 = c^4 / (4\pi G \rho R^3)^2$.

ляются своеобразные силы отталкивания или, правильнее сказать, появляются «силы», расширяющие само пространство.

Сферический мир Эйнштейна отвечает как раз равновесию между притяжением и отталкиванием. Если же Λ несколько больше эйнштейновского значения Λ_0 , соответствующего модели Вселенной с данной массой, равновесия быть не может, и на плато (область AB на рис. 13) разность между притяжением и отталкиванием мала. По последней причине и возникает само плато — область медленного изменения радиуса кривизны мира *). Время «остановки» (т. е. длина плато AB , см. рис. 13) может быть достаточно для образования галактик и квазаров. Поэтому, если «остановке» как раз отвечает значение $z = 1,95$ (напомним, что параметр z однозначно связан со временем), то именно при этом и близких значениях z должно быть много квазаров, а также поглощающего вещества. Тем самым можно было бы объяснить концентрацию квазаров при $z \approx 2$ и появление в их спектрах линий поглощения с $z = 1,95$.

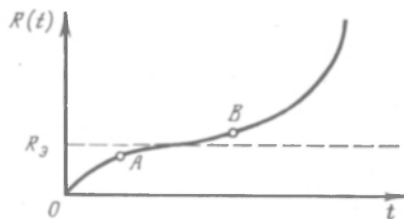


Рис. 13. Изменение во времени радиуса кривизны и расстояний в модели Леметра.

Именно такую идею и высказали Петросьян, Сальпитер и Сцекерс. По вычислениям Н. С. Кардашева для модели Леметра с «остановкой» при $z = z_0 = 1,95$ в нашу эпоху плотность $\rho_{\text{совр}} = 1,8 \cdot 10^{-30}$ г/см³, радиус кривизны $R_{\text{совр}} = 1,5 \cdot 10^{10}$ световых лет $= 1,4 \cdot 10^{28}$ см. В период «остановки» плотность⁴ была раз в тридцать больше, а радиус раза в три меньше. Значение постоянной Λ в этой модели равно $4,3 \cdot 10^{-56}$ см⁻² и очень близко к Λ_0 . Если для линий поглощения в спектрах далеких квазаров получается величина, весьма близкая к $z = 1,95$, и разброс достигает лишь 1%, то $(\Lambda - \Lambda_0)/\Lambda_0 = 2 \cdot 10^{-5}$.

Тогда длительность «остановки» Вселенной составляет около 50 млрд. лет, а нашей эпохе отвечает время около 70 млрд. лет от «начала».

Все эти числа мы приводим лишь для иллюстрации. Дело в том, что в настоящее время практически никто уже не верит в то, что значение $z = 1,95$ чем-то выделено: линии поглощения

* Силы притяжения (собственно тяготение) и отталкивания (они связаны с Λ -членом) по-разному зависят от радиуса кривизны R . При малых R (область OA на рис. 13) преобладают силы притяжения и решение близко к фридмановскому. Направо от точки B доминирует роль Λ -члена. Поэтому лишь в области AB силы притяжения и отталкивания примерно равны и радиус медленно меняется со временем.

в спектрах квазаров наблюдаются и при больших, и при меньших z . Как говорят, эффект «рассосался». В общем сейчас нет никаких реальных оснований считать модель Леметра справедливой; скорее всего она не имеет никакого отношения к действительности. Таким образом, еще никак нельзя говорить, что в результате наблюдений квазаров удалось обнаружить «остановку» в расширении Вселенной, или хотя бы доказать существование Λ -члена. Ясно другое — «лед тронулся». Вопрос о Λ -члене и его влиянии на эволюцию Вселенной перестал быть абстрактным и превратился

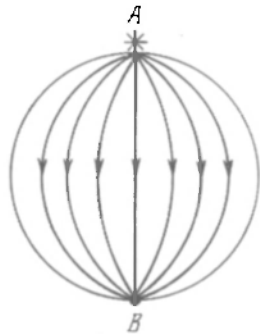


Рис. 14. Если свет распространяется по большим кругам, то испущенный в точке A он соберется на противоположном полюсе сферы — в точке B .

является следствием ее проще всего пояснить на двумерной модели для сферы. В такой модели свет, по предположению, распространяется по большим кругам и, испущенный в точке A , соберется в точке B на другом «полюсе» (рис. 14). Свет может также обойти вокруг сферы несколько раз. Фактически из-за неоднородности Вселенной в «малом» (существуют же звезды и их скопления — галактики) свет, идущий по разным путям, будет несколько по-разному отклоняться. В результате изображение далекого квазара должно «размножиться» или, как говорят, должны появиться «духи» — несколько изображений того же источника. Поиски «духов» — еще один путь проверки гипотезы о существовании в прошлом какой-то «остановки» в ходе расширения Вселенной.

В зависимости от выбора модели и особенно при использовании модели Леметра шкала времени и оценки возраста источников изменяются. Для дальнейшего изложения такие различия не очень существенны. Поэтому для определенности будем ниже оценивать время в рамках простой фридмановской модели,

которую можно исследовать в результате наблюдений. Особенно это касается модели Леметра с «остановкой». Наблюдение «остановки» было бы, если не доказательством, то очень веским аргументом в пользу существования Λ -члена, причем со значением Λ , близким к $\Lambda_0 = c^4 / (4\pi G_0 R^3)^2$. Были высказаны, кроме того, определенные идеи, согласно которым появление Λ -члена отражает наличие квантовых эффектов в пространстве.

В силу всего этого мы и остановились на модели Леметра и даже сделаем в связи с ней еще одно замечание.

Дело в том, что в рамках модели Леметра (модели с «остановкой»), как и в сферическом мире Эйнштейна, может в принципе наблюдаться своеобразная фокусировка световых лучей. Фокусировка положительной кривизны пространства:

в которой Λ -член равен нулю и пространство евклидово (модель Эйнштейна — де Ситтера). Нужно при этом иметь в виду, что разница между другими фридмановскими моделями и моделью Леметра, с одной стороны, и моделью Эйнштейна — де Ситтера, с другой, на «ранних» стадиях эволюции (вблизи точки $t = 0$ на рис. 9, 10, 11 и 13) малосущественна. Нас же сейчас будет в первую очередь интересовать именно далекое прошлое — вблизи «начала». Поэтому, применяя далее модель Эйнштейна — де Ситтера, мы можем сделать существенную ошибку в определении времени, протекшего от «начала» до нашей эпохи, но не в оценке времени, отсчитываемого от «начала» до, скажем, времени порядка нескольких лет или даже тысяч лет от него.

НАЗАД К «НАЧАЛУ». РЕЛИКТОВОЕ ТЕПЛОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

В 1965 г. обнаружено радиоизлучение, которое возникло (было испущено) много миллиардов лет назад, еще задолго до образования Галактики и квазаров. Значит, догалактическая фаза эволюции Вселенной действительно существовала.

Квазары позволяют заглянуть примерно на 8 млрд. лет назад (об известной условности такого значения мы уже говорили). Это и очень много, и одновременно очень мало, если речь идет об изучении ранних стадий эволюции Вселенной. Квазары и галактики во время, соответствующее значениям z , значительно большим трех, по всей вероятности, вообще еще не образовались, и, значит, по таким «меткам» мы развития Вселенной проследить еще дальше не сможем. Для этого нужно получать информацию о догалактической эпохе в жизни Вселенной. Можно ли это сделать?

Чтобы ответить на вопрос, зададимся определенной моделью. Именно, предположим, во-первых, что фридмановские модели (или, даже конкретно модель Эйнштейна — де Ситтера) справедливы вплоть до «начала» при $t = 0$ или вплоть до очень малых значений t . Во-вторых, допустим, что при малых t Вселенная была «горячей». В ходе расширения температура вещества и излучения падает, подобно тому как охлаждается газ, если увеличивать объем сосуда, в котором он находится. И, наоборот, чем выше плотность, чем ближе Вселенная находится к «началу», тем выше температура T в «горячей модели» (в «начале», когда бесконечна плотность, бесконечна и температура, но, как мы говорили и еще подчеркнем ниже, эта бесконечность носит условный характер и к тому же имеет место лишь в простейших предположениях).

Обратимся раньше всего ко времени через много дней или лет от «начала». В этой фазе вещество во Вселенной находилось в ионизованном состоянии — представляло собой плазму, состоящую

из электронов, протонов и ядер легких элементов, особенно гелия (более тяжелые элементы образуются, по-видимому, позже, в ходе эволюции звезд). Кроме того, присутствовало электромагнитное излучение (радиоволны, свет, рентгеновские лучи), которое находилось в равновесии с частицами, т. е. имело такую же температуру. Равновесие это — динамическое: частицы* (в основном, электроны) излучают и поглощают фотоны, но в среднем картина, если не учитывать расширения, не изменяется. Но вот через несколько сотен тысяч лет от «начала» температура падает до $T_{\text{ф}} \approx 3000\text{—}4000\text{ К}$, плотность ρ достигает $\rho_{\text{ф}} \approx 10^{-20}\text{ г/см}^3$ (концентрация атомов $n \sim 10^4\text{ см}^{-3}$) и электроны начинают рекомбинировать — соединяться с ионами, образуя атомы водорода, гелия и т. д. Среда становится при этом прозрачной для излучения (фотонов), и оно от нее «отрывается», т. е. практически перестает испускаться и поглощаться.

Что же произойдет дальше с излучением? Оно остается тепловым (или, как говорят, черным излучением по своему спектральному составу), но температура его будет все время падать*), причем обратно пропорционально характерному расстоянию R , скажем, расстоянию между любыми удаленными частицами в расширяющейся Вселенной. В простой модели, которой мы пользуемся, нашей эпохе отвечает время $t_{\text{совр}} \sim 10^{10}$ лет и плотность $\rho_{\text{совр}} \sim 10^{-29}\text{ г/см}^3$. Плотность ρ меняется обратно пропорционально R^3 (масса вещества пропорциональна ρR^3 , а она в обсуждаемых условиях сохраняется). Отсюда ясно, что плотность $\rho_{\text{ф}} \approx 10^{-20}\text{ г/см}^3$ отвечает уменьшению R в 1000 раз по сравнению с современным значением R . Температура же в то время была в 1000 раз выше, чем сейчас, и равнялась, как указывалось, $T_{\text{ф}} \approx 3000\text{—}4000^\circ$. Отсюда приходим к выводу, что в «горячей» модели Вселенная должна быть сейчас заполнена излучением с температурой $T_{\text{совр}} \approx 3\text{—}4\text{ К}$ или, согласно измерениям, с температурой $T_{\text{совр}} = 2,7\text{ К}$ (существенно, что это абсолютные градусы, отсчитываемые от абсолютного нуля, которому отвечает температура, равная -273° С)**). Спектр такого излучения для температуры $2,7\text{ К}$ представлен кривой, изображенной на рис. 15. Интенсивность излучения максимальна на волне с длиной около

*) Если расширять сосуд, в котором находится несжатый газ, то температура газа падает. Точно так же при расширении Вселенной уменьшается температура излучения. Проще всего понять это, учитывая, что в силу красного смещения длина волны увеличивается, а значит, уменьшается энергия квантов света — фотонов.

**) Фактически значения $\rho_{\text{ф}}$ и $T_{\text{ф}}$ определяются как раз на основании измерений температуры $T_{\text{совр}}$ при использовании в данном случае значения $\rho_{\text{совр}} = 10^{-29}\text{ г/см}^3$. Мы же начали со значений $\rho_{\text{ф}}$ и $T_{\text{ф}}$ для простоты изложения. Отметим, что по последним измерениям $T_{\text{совр}}$ ближе к 3 К , но мы пользуемся чаще встречающимся в литературе значением $2,7\text{ К}$.

1,5 мм, но она должна быть довольно значительна и на волнах сантиметрового и даже дециметрового диапазона. Любопытно, что вывод о существовании такого излучения в «горячей» модели был сделан еще лет 30 назад, но в общем-то он был до некоторой степени забыт. Причиной в значительной мере являлось состояние радиоастрономии, которая в недавнем прошлом не могла обеспечить измерения такой низкой температуры излучения, как 3 К.

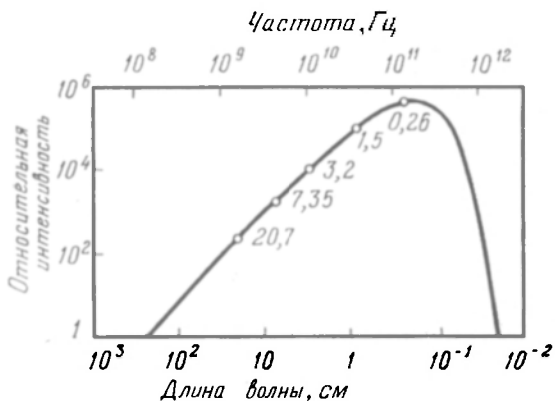


Рис. 15. Спектр равновесного (черного) излучения с температурой $T = 2,7$ К.

Успехи радиотехники изменили ситуацию и в 1965 г. позволили обнаружить излучение, о котором идет речь, — его называют реликтовым тепловым космическим излучением (прилагательные тепловое и космическое мы будем в дальнейшем опускать).

Как это не раз было в истории науки, реликтовое излучение было открыто не в результате специальных поисков, а более или менее случайно. Обладающая высокой чувствительностью антенна в лаборатории телефонной компании Белла, работающая на волне $7,35$ см, принимала какое-то излучение, которое вначале считали помехой, возникшей в аппаратуре. Оказалось, однако, что антенна принимает внеземное излучение с температурой $2,7$ К. Излучение было затем обнаружено и на волнах $20,7$, $3,2$ и $0,26$ см (сейчас имеются данные также и для других длин волн). Во всех случаях температура равна примерно $2,7$ К. Одинаковая температура и должна получаться для всех волн, если излучение действительно тепловое.

Таким образом, сейчас с большой долей уверенности установлена справедливость «горячей» модели и одновременно удалось приблизиться к «началу» расширения сразу примерно до $300\,000$ лет (отсчет ведется от «начала»). Другими словами, в результате приема реликтового излучения удалось дойти до значений $z \sim \sim 1000$, тогда как для самых далеких известных квазаров пара-

метр z меньше четырех. Пожалуй, особенно важно вытекающее отсюда доказательство того, что Вселенная когда-то была в миллиард раз плотнее, чем сейчас. Так, конечно, и должно быть для обдумывавшихся моделей расширяющейся Вселенной, но ведь эти модели могут оказаться для какого-то времени уже несправедливыми. Сейчас же мы не только предполагаем, но уже знаем, что стадия расширения Вселенной длится много миллиардов лет и когда-то Вселенная была совсем другой, в ней не было ни галактик, ни квазаров, а существовали только плазма и излучение с высокой температурой.

ЕЩЕ БЛИЖЕ К «НАЧАЛУ»

Согласно простым космологическим моделям вещество во Вселенной было когда-то очень плотным и горячим. На таких стадиях эволюции Вселенной излучались нейтрино и образовывались ядра некоторых легких химических элементов.

Естественно предположить — собственно, это уже было сделано выше, — что Вселенная расширялась и до эпохи «отрыва» излучения (фотонов) от вещества, т. е. до времени $t_{\phi} \sim 300\ 000$ лет. Электромагнитное излучение, возникшее в этот более ранний период, до нас дойти не может — оно поглощается. Но в принципе получить сведения о ранних фазах расширения (если они существовали!) все же представляется возможным. В «горячей» модели через время $t_x \sim 100$ с (!) после «начала» плотность ρ_x примерно равна 100 г/см³, что уже в 100 раз больше плотности воды. Температура при этом равна примерно 10^9 градусов. На данной стадии вещество состоит в основном из протонов, нейтронов и электронов, но протоны активно соединяются с нейтронами, образуя гелий и некоторые другие легкие элементы (именно поэтому и выделено «химическое» время $t_x \sim 100$ с). Те же нейтроны (фактически их очень мало), которые не успевают соединиться с протонами, распадаются (нейтрон распадается в среднем за время 1000 с на протон, электрон и нейтрино)*).

Для «горячих» фридмановских моделей (вблизи «начала» все эти модели практически неотличимы) количество образующегося гелия (по числу ядер) должно составлять около 7 или 8% ; остальные ядра (примерно 90%) должны быть протонами, всех остальных элементов весьма мало (меньше 1%).

Отсюда ясно, что определение количества гелия во Вселенной служит методом проверки «горячей» фридмановской модели.

*) Для простоты мы не будем здесь отличать нейтрино ν и антинейтрино $\bar{\nu}$, которые участвуют в реакциях n (нейтрон) $\rightarrow p$ (протон) $+ e^-$ (электрон) $+ \bar{\nu}$ (антинейтрино) и $p \rightarrow n + e^+$ (позитрон) $+ \nu$ (нейтрино). Заметим также, что все приводимые численные значения имеют лишь сугубо ориентировочный характер.

Существующие данные свидетельствуют о том, что гелия во Вселенной действительно много, около 5 — 10%, но не во всех случаях (имеются звезды, атмосферы которых бедны гелием). Возможно, однако, что в таких особых условиях отсутствие гелия обусловлено вторичными причинами. Вопрос этот исследуется, предварительно же можно сказать, что данные о химическом составе подтверждают «горячую» модель.

В момент $t_\nu \sim 0,3$ с (!) плотность $\rho_\nu \sim 10^7$ г/см³, а температура $T_\nu \sim 3 \cdot 10^{10}$ градусов. Как раз в это время нейтрино «отрываются» от нуклонов (протонов и нейтронов). Смысл данного утверждения такой же, как в случае «отрыва» электромагнитного излучения при $\rho_f \sim 10^{-20}$ г/см³: при плотностях, больших 10^7 г/см³, нейтрино успевают поглотиться веществом (основную роль играет процесс $\nu + \bar{\nu} \rightarrow e^+ + e^-$); начиная же с плотности $\rho_\nu \sim 10^7$ г/см³, нейтрино в расширяющейся Вселенной уже практически не поглощаются и должны «доживать» и до нашей эпохи. Что касается огромной разницы в плотностях ρ_f и ρ_ν , то она связана с тем, что нейтрино значительно слабее взаимодействует с веществом, чем электромагнитное излучение. При «отрыве» энергия нейтрино высока (температура $T_\nu \sim 3 \cdot 10^{10}$ К, что отвечает средней энергии около $3 \cdot 10^6$ Эв). Но по мере расширения Вселенной температура (энергия) нейтрино уменьшается, и в нашу эпоху в принятой модели нейтрино должны иметь температуру, равную всего около 2 К (средняя энергия порядка нескольких десятитысячных электрон-вольта).

Фиксировать нейтрино с такой энергией и в том количестве, о котором идет речь, еще не научились. Более того, сейчас эта задача представляется фантастически сложной — для ее решения чувствительность измерений нужно поднять в сотни тысяч раз. Тем не менее, как можно думать, именно нейтринной астрономии принадлежит славное будущее.

Возможность регистрации нейтрино, испускаемых в недрах Солнца в ходе нагревающих его ядерных реакций, в недавнем прошлом тоже казалась далекой мечтой. Сейчас уже нет сомнений в том, что нейтринная астрономия Солнца принесет плоды, и притом в ближайшее время. Вполне реальна также возможность фиксировать потоки нейтрино, образующиеся при некоторых звездных «катастрофах» (мы имеем в виду, например, вспышки сверхновых звезд). Что же касается нейтрино космологического происхождения, испускаемых примерно через 0,3 с после «начала» расширения Вселенной, то перспективы их наблюдений не кажутся радужными. Но прогресс в этой области идет так быстро, что оптимистический взгляд на возможности нейтринной астрономии представляется оправданным. К тому же следует помнить, что вывод о равенстве температуры нейтрино космологического происхождения 2 К справедлив лишь для простейшей модели.

А что, если расширение Вселенной, хотя оно и происходило на очень плотных стадиях, не было в тот период изотропным — одинаковым по всем направлениям? В принципе допустимы модели с анизотропным расширением на ранних стадиях эволюции Вселенной и в них нейтрино могут в нашу эпоху иметь весьма высокую энергию. В этом случае измерения значительно легче, чем для «холодных» нейтрино, и в известных пределах представляются осуществимыми в близком будущем. Можно надеяться, что нейтринная астрономия действительно принесет информацию о развитии Вселенной на стадиях с плотностью $\rho_\nu \sim 10^7$ г/см³. Особенно важным, конечно, следовало бы считать само доказательство того, что такие стадии вообще существовали. Пока же мы можем (притом с вполне достаточными теоретическими основаниями) допустить, что достигаются даже состояния с еще большей плотностью. Так, для фридмановских моделей при $t_\pi \sim \sim 10^{-4}$ с (!!!) плотность вещества $\rho_\pi \sim 10^{14}$ г/см³, что примерно отвечает плотности вещества в атомных ядрах.

О еще более плотных стадиях речь пойдет несколько ниже, этот вопрос уже органически связан с самой проблемой «начала» расширения. Но до плотностей $\rho_\pi \sim 10^{14}$ г/см³ мы все время имели дело с веществом в уже известных нам состояниях и не выходили за пределы современных физических представлений. Правда, вслед за указанием времени $t_x \sim 100$ с, $t_\nu \sim 0,3$ с и $t_\pi \sim 10^{-4}$ с после «начала» ставились восклицательные знаки, но это был не вполне честный прием. Такие цифры поражают только при их сравнении с интервалами времени, привычными в обыденной человеческой практике. Но ведь на обсуждаемых стадиях эволюции Вселенной и речи не может быть о каких-то живых существах. Поэтому и сравнивать времена t_π , t_ν или t_x нужно с характерными в атомной и ядерной физике интервалами времени, которые еще гораздо меньше. Так, характерное атомное время $t_a \sim 10^{-16}$ с (таково время, за которое электрон с типичной «атомной скоростью» 10^8 см/с пройдет «атомное расстояние», по порядку величины равное 10^{-8} см). Характерное время в физике атомного ядра и элементарных частиц составляет $t_{\text{я.ч}} \sim 10^{-24}$ с — оно равно радиусу действия ядерных сил (порядка 10^{-13} см), деленному на скорость света. По сравнению не только с $t_{\text{я.ч}}$, но даже с атомным временем $t_a \sim 10^{-16}$ с время 10^{-4} с после «начала» колоссально.

Вероятно, у читателя возник уже такой вопрос: можно ли получить какие-либо сведения о стадиях расширения при плотности ρ , большей плотности $\rho_\nu \sim 10^7$ г/см³? Как раз примерно при этом значении плотности нейтрино «отрываются» от вещества и, следовательно, из более плотных состояний прийти к нам не могут. Вместе с тем нейтрино обладают наибольшей проникающей способностью среди всех известных частиц (кроме гравитонов — квантов волнового гравитационного поля).

В качестве ответа на этот вопрос заметим следующее. Во-первых, в физике (и, конечно, не только в физике) огромную роль играют косвенные источники информации. Конкретно, поведение космологической модели при плотностях, не превышающих $\rho_v \sim \sim 10^7$ г/см³, в значительной мере определяется ее поведением при больших плотностях. В этой связи несомненно, что, добравшись до фазы расширения, когда плотность порядка ρ_v , мы фактически могли бы получить сведения и о еще более близких к «началу» фазах расширения. Во-вторых, нельзя считать нейтрино наиболее проникающим агентом, ибо еще большей проникающей способностью, как только что упоминалось, обладают гравитационные волны.

Гравитационные волны — это еще одно «порождение» общей теории относительности. На возможность и по сути дела неизбежность их существования Эйнштейн обратил внимание в 1916 г. Как уже подчеркивалось, общая теория относительности представляет собой теорию гравитационного поля и обобщает теорию тяготения Ньютона в таком же смысле, в каком электродинамика (теория электромагнитного поля) обобщает электростатику. Вместе с тем типичным электродинамическим явлением можно считать электромагнитные волны, которые распространяются со скоростью света; в рамках же электростатики таких волн нет.

Гравитационные волны аналогичны электромагнитным, они представляют собой распространяющиеся со скоростью света возмущения поля тяготения. Приход гравитационной волны должен проявиться в изменении силы тяжести, что скажется на движении тел, например спутников Земли. Однако даже такие сравнительно мощные излучатели, как двойные звезды (две звезды, движущиеся вокруг их общего центра масс), испускают недостаточно интенсивные гравитационные волны, чтобы их можно было на современном уровне техники принимать на Земле.

Поэтому прием гравитационных волн еще не осуществлен и решение такой задачи принадлежит к числу самых интересных и трудных в современной физике *). Следуя известному совету не пытаться объять необъятное, ограничимся лишь замечанием, что гравитационные волны поглощаются значительно слабее, чем нейтрино, и поэтому могли бы доходить до нас из областей (точнее сказать, «от состояний») с плотностью ρ , намного большей $\rho_v \sim 10^7$ г/см³ и достигающей фантастически больших значений, равных по порядку величины $\rho_{гр} \sim 5 \cdot 10^{93}$ г/см³. Следовательно, имеется какая-то, пусть весьма отдаленная и туманная, перспектива осуществить астрономические наблюдения на гравитационных волнах и, в частности, заглянуть с помощью этих волн в область, еще меньше удаленную от «начала».

*) О соответствующих возможностях см. Гришук Л. П. — УФН, 1977, т. 121, с. 629; Руденко В. Н. — УФН, 1978, т. 126, с. 361.

Спасительные кавычки вряд ли примирили читателя с «началом», которое столь часто приходилось упоминать. Именно вопрос о «начале» нам и осталось обсудить, но до этого целесообразно сделать известное отступление — коснуться связи космологии с философией.

КОСМОЛОГИЯ И ФИЛОСОФИЯ

Вопрос о выборе космологической модели, конечности или бесконечности объема в этих моделях и о характере эволюции Вселенной во времени должен решаться на основе наблюдений. Никаких предвзятых утверждений на этот счет сделать нельзя.

Фундаментальные проблемы естествознания всегда привлекали и привлекают к себе внимание философов. Это понятно в свете истории развития и формирования философии и оправдано существом дела: именно в области фундаментальных проблем физики, астрономии и биологии мы сталкиваемся с принципиальными и в то же время совершенно неясными вопросами. Естественно, что обсуждение этих вопросов, попытки их решения предъявляют особенно высокие требования к мышлению, служат как бы лабораторией логики и теории познания.

Нельзя, однако, не признать, что, если говорить об истории философии в целом, такие «лабораторные занятия» философов в значительном числе случаев не приносили науке пользы, а иногда и наносили большой вред. Оглядываясь назад, мы видим, что нет, пожалуй, ни одной великой теории в области физики, астрономии и биологии, которая не была бы провозглашена представителями тех или иных философских направлений или ложной, или даже антинаучной и крамольной. Шарообразность Земли, система Коперника, множественность миров, теория относительности, квантовая механика, расширяющаяся Вселенная, эволюционная теория Дарвина, законы Менделя и представления о генах — все это объяснялось «философски ложным», против всего этого велась борьба с «философских позиций».

Причина в общем та, что в прошлом философы не только аккумулялировали, но и абсолютизировали естественнонаучные взгляды, сложившиеся в предшествующий период. В результате многим из них начинало казаться, что иначе и быть не может, что отказ от устоявшихся взглядов недопустим. Здесь важно подчеркнуть, что подобная тенденция на определенном этапе вполне естественна и присуща также большинству естествоиспытателей. Но лучшим из них удавалось и удается выйти за рамки требований, предъявляемых привычкой и «здравым смыслом». Сделать это удавалось под непреодолимым давлением фактов, в результате настойчивых,

но безуспешных попыток «спасти» старые представления. В муках (именно в муках, как об этом свидетельствует история науки) рождались новые взгляды, осознавалась неизбежность отказа от столь «уютных» и «понятных» старых воззрений. Для человека же, смотрящего «со стороны», необычность и непривычность новых идей и теорий доминирует над всем остальным, новые взгляды им не «выстраданы». Отсюда и попытки отрицать новые идеи, попытки, которые кажутся особенно правомочными тем, кто считает себя овладевшим наконец философским камнем.

Сделанные замечания — это, конечно, не выпад против интересующихся и занимающихся философией, не говоря уже о самой философии. Это лишь попытка подчеркнуть необходимость навсегда покончить со старыми ошибками и понять характер и место современной философии. Именно, как указывается в любом нашем учебнике по философии (но, к сожалению, столь же часто игнорировалось до весьма недавнего времени), современная философия — это не «наука паук», не натурфилософия прошлых веков. Современной философии совершенно чужды (правильнее сказать, должны быть чужды) любые попытки диктовать природе ее законы и решать вопрос об «истинности» или «ложности» естественнонаучных теорий. Когда философ задумывается над какой-либо проблемой, имеющей отношение к естествознанию, то, как мне представляется, он раньше всего должен спросить себя: является ли данная проблема философской или естественнонаучной? Или, если угодно, важным и принципиальным философским вопросом нужно считать установление границ философии. Сначала нужно «размежеваться», выделить философскую проблему, а потом уже определять отношение философии к этой проблеме.

Является ли скорость света предельной скоростью распространения сигналов, и вообще существует ли конечная максимально возможная скорость сигналов? Какие могут быть, казалось бы, сомнения в том, что это физический вопрос, ответить на который может только опыт, априорно его решить нельзя, а любой ответ (предельная скорость конечна или же она бесконечна) ни в какой мере не затрагивает проблемы первичности или вторичности сознания, законов логики, отрицания или признания различных верований и т. п. Между тем нетрудно найти в нашей литературе утверждение, что считать скорость света предельной является идеализмом. Аналогично обстоит дело с вероятностными понятиями в квантовой теории, с законами Менделя, некоторыми следствиями теории относительности и т. д. В космологии же объявлялись идеалистическими, реакционными и «поповскими» представления о конечности объема и о расширении Вселенной. Все это, мягко говоря, недоразумение, смешение философских вопросов с естественнонаучными, неправильное проведение границ между философией и физикой, астрономией или биологией.

Материалистическая позиция в космологии состоит в признании существования Вселенной совершенно независимо от человеческого сознания и фактически до его появления. Кроме того, имея в виду не только субъективный идеализм, но также объективный идеализм и религию, подчеркнем, что материалист отрицает существование бога и вообще «чего-то», стоящего за природой, «порождающего» Вселенную, и т. п. К области философии относятся, кроме того, вопросы методологии и теории познания. В применении к астрономии или ее части — космологии обсуждение подобных проблем также вполне естественно и интересно.

Вопросы же о том, является ли пространство евклидовым или неевклидовым, конечен ли его объем или бесконечен, стационарна ли Вселенная или нестационарна, какими законами управляется движение галактик — все это относится к области физики и астрономии, базируется на наблюдениях и экспериментах и контролируется ими. Ответ на подобные вопросы не может подтвердить или опровергнуть ни предположение о существовании бога, ни полное отрицание любых идеалистических представлений. Другое дело, разумеется, конкретные религиозные верования и, скажем, содержание библии. Здесь данные естествознания непосредственно опровергают кажущиеся в наше время просто детскими сказками библейские легенды о сотворении мира.

Папа Пий XII в одной из своих энциклик упомянул о расширяющейся Вселенной, видимо, с целью подкрепить, пусть и косвенно, справедливость библейских легенд.

Вероятно, в религиозной литературе такая тенденция нашла дальнейшее развитие. С другой стороны, некоторые авторы, считающие себя представителями материализма, тоже использовали папское послание и аналогичные материалы для противоположных целей — для доказательства несостоятельности представлений о расширяющейся Вселенной.

Ошибочность обеих этих тенденций очевидна. Это понимают, кстати сказать, и люди верующие. Один из выдающихся современных космологов Г. Леметр, о работах которого упоминалось выше, был аббатом, а с 1960 г. вплоть до своей смерти в 1966 г. являлся президентом Ватиканской (папской) академии наук. Но вот что говорил Леметр в 1958 г. на посвященном космологии 11-м Международном Сольвеевском конгрессе: «В той мере, в какой я могу судить, такая теория (имеется в виду теория расширяющейся Вселенной с «началом». — В. Г.) полностью остается в стороне от любых метафизических или религиозных вопросов. Она оставляет для материалиста свободу отрицать любое трансцендентное Бытие. В отношении начала пространства-времени материалист может оставаться при том же мнении, которого он мог придерживаться в случае неособенных областей пространства-времени».

Герои Ильфа и Петрова могли бы о Леметре сказать: «Аббат-то в гимназии обучался», имея в виду, что он получил современное образование и с ним нужно, если уже спорить, то серьезно, хотя он и «служитель культуры». Философский идеализм и даже религия — это в наше время не то же, что верования в чудеса и сотворение мира, возникшие на заре цивилизации.

Итак, материалистическая философия не накладывает и не может накладывать «табу» на выбор моделей Вселенной. Конкретно, вопросы о конечности или бесконечности объема Вселенной, законах ее эволюции во времени и им подобные не являются философскими и должны решаться в свете данных астрономических наблюдений и современной физики.

КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМА

«Вопросом вопросов» в космологии является проблема эволюции Вселенной во времени для любых моментов времени. Этот вопрос еще не решен, но некоторые гипотезы здесь существуют и обсуждаются.

Космология и неотделимая от нее внегалактическая астрономия охватывают все более широкий круг вопросов. Уместно поэтому как-то выделить «вопрос вопросов». Таковым можно считать космологическую проблему в узком смысле слова, а именно выяснение прошлого Вселенной не на каком-то отрезке времени, а в «целом». Речь идет о самом типе поведения, общей картине, а не об уточнении деталей, которое будет продолжаться беспрерывно долго. Одним из частных аспектов космологической проблемы в указанном смысле служит, очевидно, и вопрос о «начале» времени, смысле и характере этого понятия. Поскольку космологическая проблема не решена, мы можем лишь пояснить, какие решения могли бы в принципе существовать.

Первая возможность: Вселенная в прошлом находилась в «особом» состоянии, которое отвечает «началу» времени, понятие о времени «до» этого «начала» лишено физического, да и любого другого смысла. Последнее утверждение для такого варианта (сюда относятся все модели Фридмана без Λ -члена) представляется необходимым. В самом деле, если можно было бы говорить о времени «до» начала эволюции Вселенной, а Вселенная при этом еще не существовала бы, то мы как раз и должны были бы допустить «сотворение мира». Пространство и время неотделимы от материи, поэтому невозможность ввести и использовать понятие о времени до «начала» вполне закономерна (если, конечно, допустить само существование «начала»). В силу сказанного представляются, видимо, непротиворечивыми предположения о конечности времени в прошлом и о понимании «начала» отсчета времени во

Фридмановских и им подобных моделях как «особенности» (или, как часто говорят, «сингулярности») в смысле состояния с бесконечной плотностью. Многие космологи считают такой подход в принципе удовлетворительным. Но других, в том числе и автора настоящей статьи, буквальная экстраполяция Фридмановских моделей до состояния с бесконечной плотностью никогда не удовлетворяла и не удовлетворяет. Кажутся более естественными либо модели с бесконечным временем (см. ниже), либо выделение некоторой области вблизи «начала» (точки $t = 0$ во Фридмановских моделях), в которой вообще нельзя пользоваться известными пространственно-временными представлениями. Более того, уже на основе существующих физических теорий можно утверждать, что сколь угодно близкое приближение к «началу» с использованием уравнений общей теории относительности, как это делается, вообще говоря, нельзя считать законным. Достаточно сказать, что общая теория относительности построена без учета квантовых эффектов. При стремлении же масштаба к нулю квантовые эффекты когда-то должны проявиться, хотя, быть может, только для расстояний порядка $l_{\text{гр}} = \sqrt{G\hbar/c^3} = 1,6 \cdot 10^{-33}$ см и времени порядка $t_{\text{гр}} = \sqrt{G\hbar/c^5} = l_{\text{гр}}/c = 0,5 \cdot 10^{-43}$ с (здесь $\hbar = 1,05 \times 10^{-27}$ эрг·с — квантовая постоянная, G и c — гравитационная постоянная и скорость света). Заметим, что времени $t_{\text{гр}}$ отвечает плотность ρ порядка $\rho_{\text{гр}} = \hbar/(cl_{\text{гр}}^4) = c^5/(\hbar G^2) = 5 \cdot 10^{93}$ г/см³. В такой, а быть может, и значительно большей области *) обычные пространственно-временные понятия явно непригодны или по крайней мере несправедливы. Поэтому утверждение об «особенности» в обычном смысле (скажем о бесконечной плотности материи), строго говоря, может быть лишено смысла.

Вывод отсюда такой: понятие об «особенности» при $t = 0$ и конечности времени в прошлом значительно сложнее, чем может показаться на первый взгляд. Следовательно, окрестности «нача-

*) Приведенные значения $l_{\text{гр}}$ и $t_{\text{гр}}$ имеют такой смысл: при этих и меньших значениях l и t гравитационное поле, вообще говоря, нельзя рассматривать классически, т. е. без учета квантовых эффектов. Далеко не доказано, что в силу каких-то других причин, не связанных с гравитацией, известные пространственно-временные понятия не «отказываются» при значениях $l_{\text{фунд}}$ и $t_{\text{фунд}}$, существенно превышающих $l_{\text{гр}}$ и $t_{\text{гр}}$. Достаточно сказать, что в физике элементарных частиц на сегодняшний день удалось дойти только до расстояний порядка $l_0 \sim 10^{-15}$ см и $t_0 \sim l_0/c \sim 3 \cdot 10^{-20}$ с (для масштабов l и времени t , больших l_0 и t_0 , существующая теория оказывается еще применимой). Если бы фундаментальная длина $l_{\text{фунд}}$ существовала (при этом, вероятно, $l_{\text{гр}} \ll l_{\text{фунд}} \ll 10^{-15}$ см), то, как можно думать, максимально возможная плотность равнялась бы $\rho_{\text{max}} \sim \rho_{\text{фунд}} \sim \hbar/(cl_{\text{фунд}}^4)$. Даже при $l_{\text{фунд}} \sim 10^{-20}$ см, что заведомо еще не противоречит данным физики элементарных частиц, $\rho_{\text{фунд}} \sim 10^{43}$ г/см³, что на 50 порядков (!) меньше, чем $\rho_{\text{гр}}$.

ла» нуждаются в особом рассмотрении, а утверждения о конечности времени и бесконечности плотности при $t = 0$ носят подлинно условный характер; время вблизи «начала» теряет обычный смысл, а значит, о его конечности или бесконечности без уточнений говорить не приходится *).

Вторая возможность: в прошлом масштаб R (скажем, радиус кривизны Вселенной) достигал минимума, отличного от нуля, а плотность материи соответственно достигала максимума. До этого же Вселенная не расширялась, а сжималась. Очевидно, модели такого типа многообразны (рис. 16). Если не вводить Λ -член, то в общей теории относительности решений подобного типа вообще нет. Уравнения с Λ -членом, если произвольно располагаться значением Λ , имеют решения типа, изображенного на рис. 16, а, б, но не имеют осциллирующих решений типа рис. 16, в (имеются в виду решения $R(t)$, не доходящие до нуля, т. е. до точек с бесконечной плотностью). К тому же мы рассматриваем сейчас модели однородной и изотропной Вселенной, учет же неоднородности и неизоэнтропности сильно усложняет картину и проведен лишь для некоторых простых вариантов.

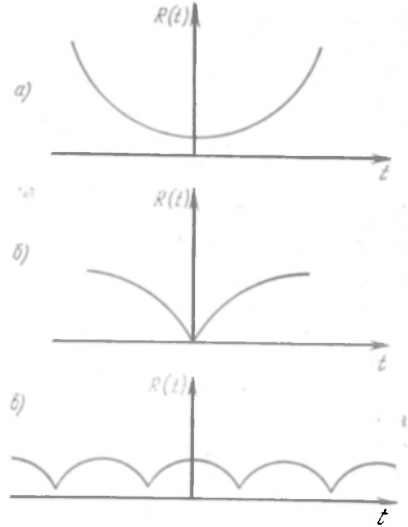


Рис. 16. Изменение во времени радиуса кривизны и расстояний в гипотетических моделях с бесконечным временем.

*) Состояния с бесконечной плотностью («особенность») получаются не только для космологических моделей, но и при обусловленном силами тяготения неудержимом сжатии (коллапсе) достаточно массивного шара (при этом с количественной стороны существенно, чтобы шар не вращался и в нем отсутствовали интенсивные внутренние движения). Отсюда ясно, что проблема «особенностей» в решениях, получаемых в общей теории относительности, может исследоваться не только для моделей Вселенной, но и в некоторых других случаях. Коллапсирующая достаточно большая масса превращается в «черную дыру» (см. литературу, указанную в примечании к стр. 92). В последние годы не только в космологии, но и в теории «черных дыр» особое внимание привлекает как раз учет квантовых явлений. Последние особенно существенны для «черных дыр» с малой массой ($M < 10^{16}$ г), которые могут образовываться на ранних стадиях расширения Вселенной (см. сборник «Черные дыры». — М.: Мир, 1978). Еще в большей мере, чем в космологии, существование фундаментальной длины $l_{\text{Фунд}} \ll l_{\text{ГР}}$ радикально изменило бы поведение черных дыр с малой массой (см. Гинзбург В. Л. и Фролов В. П. — Письма в Астроном. ж., 1976, т. 2, с. 474).

Если время бесконечно, как это предполагается для моделей, которым отвечают графики на рис. 16, а, б, в, то возникают трудности. Их характер в большой мере зависит от значения максимальной плотности, достигаемой при сжатии, но, вообще говоря, они связаны с возможностью «тепловой смерти», накоплением нейтрино и т. д.

Конечно ли время в прошлом (в том числе в указанном выше условном смысле) или же оно бесконечно? Это главный вопрос, на который нужно ответить для решения космологической проблемы. Затем следует и дальше конкретизировать модель Вселенной. Сейчас, насколько нам известно, не видно никаких путей для решения проблемы, если только не удастся обнаружить максимум плотности уже в относительно доступной области плотностей, меньших $\rho_v \sim 10^7$ г/см³ ($t_v \sim 0,3$ с), что весьма маловероятно.

В теоретическом плане, как нам представляется в данный момент, наиболее обещающими являются модели с «особенностью» в прошлом, причем район «особенности» должен рассматриваться с учетом квантовых эффектов. Тем самым время в прошлом оказывается не столько конечным, сколько неопределенным. Преимущество таких моделей в том, что они не приводят к трудностям, которые явно видны для моделей с бесконечным временем. Вполне возможно, однако, что отмеченное преимущество иллюзорно, поскольку характер квантовых эффектов вблизи «особенности» (или, как мы чаще говорили ранее, вблизи «начала») в общем-то неизвестен, и поэтому нет никакой гарантии в том, что здесь не встретятся какие-то глубокие трудности или новые возможности. Более того, такие новые возможности в последние годы анализируются. Главная их черта — учет квантовых эффектов и, конкретно, рождения новых частиц (например, пар протон — антипротон, электрон — позитрон и т. д.) на ранних стадиях расширения. Существенно подчеркнуть, как это ясно уже из сделанных выше замечаний, что космологическая проблема в моделях с «особенностью» или «почти с особенностью» (имеется в виду ограничение плотности, обусловленное учетом квантовых эффектов) непосредственно смыкается с физикой элементарных частиц.

Сделанных замечаний, разумеется, совершенно недостаточно, чтобы составить представление о современном состоянии проблемы космологической «особенности». Но, поскольку эта проблема не выяснена и как она будет решена, никто не знает, более подробное изложение различных гипотез или деталей все равно не изменило бы картину. Вместе с тем даже сказанное подтверждает общее заключение о том, что проблема «особенности» сложна и многообразна, связана с глубоким анализом пространственно-временных представлений и ни в коем случае не может решаться из априорных соображений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы имеем лишь один «экземпляр» Вселенной и не можем над ним экспериментировать. Это обстоятельство, как и ряд других, делает решение космологической проблемы фантастически трудным. Но история науки и, в частности, история развития самой космологии служит, как нам кажется, лучшим лекарством от пессимистических оценок ситуации и неверия в возможность получить ответ на самые трудные вопросы.

За 60 лет, всего за 60 лет, космология проделала путь, который наши предшественники не могли себе даже вообразить. Радио- и рентгеновская астрономия, радиогалактики, квазары, реликтовое тепловое излучение, пульсары и, главное, расширение Вселенной, ее нестационарность — кто думал об этом 60 лет назад?

Большинство читателей настоящей статьи имеет вполне реальный шанс отметить в 2017 г. столетний юбилей современной космологии. К тому времени волны и частицы, пришедшие из далеких миров, безусловно расскажут гораздо больше, чем мы успели понять на сегодняшний день.

ПРИЛОЖЕНИЕ

В научно-популярной литературе, рассчитанной на широкий круг читателей, установилось правило не употреблять математических формул. Запрещены обычно даже алгебраические выражения, не говоря уже о дифференцировании и интегрировании.

Во многих случаях, однако, такой подход явно устарел. Младшие школьники не читают, конечно, статей по физике и астрономии. Что же касается школьников старших классов, то по крайней мере те из них, кто интересуется точными науками, не боятся элементарных алгебраических формул, а большинство еще до окончания школы знает также элементы математического анализа.

Мы уже не говорим о студентах, инженерах, техниках и учителях, которые в основном и читают научно-популярную литературу по физике и астрономии. Зачем же обязательно объяснять им словами то, что лаконичнее и по сути дела точнее и глубже можно записать и пояснить с помощью простых математических формул? Ведь математика — это язык, специально созданный и развитый для выражения количественных связей. Речь при этом, разумеется, идет не о каком-то сложном математическом аппарате, а о простых понятиях, используемых уже столетия и прочно вошедших в научный обиход, можно сказать, проникших в нашу жизнь.

Все это «в теории», возможно, и не вызовет особых возражений. На практике же многие авторы научно-популярных статей и книг испытывают подлинные муки, решая вопрос о том, в каких пределах они могут пользоваться математикой.

Универсального ответа здесь быть не может, этот ответ зависит и от предмета и от требований, предъявляемых к предполагаемому читателю.

Настоящая статья рассчитана на лиц, которых не смутят простые алгебраические формулы. Но предполагать, что большинство читателей знакомо с дифференциальными уравнениями, уже нет оснований. Поэтому можно было опасаться, что даже само появление в тексте нескольких таких уравнений, пусть без реального их использования, создало бы неправильное впечатление о всем уровне изложения. С другой стороны, у многих читателей должно возникнуть чувство неудовлетворенности, когда они лишь прочтут в тексте об уравнении, которому «должен подчиняться потенциал φ », и особенно о Δ -члене и об уравнениях «для поля g_{ik} с Δ -членом». Сами же эти уравнения не приводятся и поэтому приобретают какой-то таинственный характер.

Учитывая сказанное, автор и решил в качестве известного компромисса хотя бы кратко осветить весь этот вопрос в настоящем приложении. Сделать это можно было бы и без особых предварительных рассуждений о роли и месте математики в научно-популярной литературе. Хотелось, однако, побудить читателей также подумать над таким вопросом. Чего они (читатели) хотят? Не окажутся ли для многих из них полезными приложения, помещаемые в конце статей и написанные без жестких ограничений, налагаемых на характер допустимых математических выражений?

Поясним теперь, о каких уравнениях речь шла в тексте.

В ньютоновской теории всемирного тяготения поле тяготения описывается потенциалом φ , подчиняющимся дифференциальному уравнению

$$\Delta\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} = 4\pi G\rho. \quad (1)$$

Здесь $\rho(x, y, z)$ — плотность (масса единицы объема) и $G = 6,670 \cdot 10^{-8}$ см³/г·с² — гравитационная постоянная.

Уравнение типа (1) называется уравнением Пуассона, это есть, как говорят, дифференциальное уравнение в частных производных — в него в общем случае входят производные по x , y и z . Если распределение масс, создающих потенциал φ , обладает некоторой симметрией, то уравнение (1) упрощается.

Допустим, например, что поле тяготения создается покоящимся шаром, плотность которого постоянна (другими словами, плотность массы ρ постоянна внутри шара с радиусом r_0 и равна нулю вне шара). Тогда поле тяготения обладает сферической симметрией, т. е. φ зависит от $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ — расстояния точки наблюдения от центра шара. Уравнение (1) принимает вид

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\varphi}{dr} \right) = \frac{d^2\varphi}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\varphi}{dr} = 4\pi G\rho. \quad (2)$$

Вне шара (при $r > r_0$) решение уравнения (2) записывается следующим образом:

$$\varphi = \frac{Gm_1}{r}, \quad m_1 = \frac{4\pi}{3} \rho r_0^3 \text{ — масса шара.} \quad (3)$$

Заметим, что уравнение (2) и решение (3) справедливы и в том случае, когда плотность ρ не постоянна, но зависит только от расстояния r , т. е. $\rho = \rho(r)$.

Если в поле массы m_1 находится другая масса m_2 , то на нее действует сила тяготения $\mathbf{F} = -m_2 \nabla \varphi = -\frac{Gm_1 m_2}{r^2} \mathbf{r}$. Здесь $\nabla \varphi \equiv \text{grad } \varphi$ есть вектор с компонентами $\partial \varphi / \partial x$, $\partial \varphi / \partial y$ и $\partial \varphi / \partial z$ соответственно по осям x, y и z . Если φ зависит только от r , то $\nabla \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial r} \frac{\mathbf{r}}{r}$, где \mathbf{r} — радиус-вектор, направленный от центра (массы m_1) к рассматриваемой точке. Уравнение (1) и указанная связь силы тяготения \mathbf{F} с потенциалом φ позволяют в ньютоновской теории определить силу тяготения для любого заданного распределения масс.

Если равномерно заполнить бесконечное евклидово пространство массами с плотностью ρ_0 , то уравнения (1) или (2) не имеют никакого разумного решения. Например, уравнение (2) имеет при этом решение $\varphi = \frac{2}{3} \pi G \rho_0 r^2$, которое неограниченно возрастает с ростом r . Именно эта трудность СОЕ-модели побудила Зеелигера попытаться заменить уравнение Пуассона (1) таким:

$$\Delta \varphi' - \lambda \varphi' = 4 \pi G \rho_0. \quad (4)$$

В этом случае вне шара с массой $m_1 = \frac{4}{3} \pi \rho r^3$ потенциал $\varphi' = -(Gm_1/r) \exp(-\sqrt{\lambda}r)$, или, как мы писали в тексте, $\varphi' = -(Gm_1/r) \exp(-r/R)$, $R = 1/\sqrt{\lambda}$. При достаточно малом значении λ , т. е. при достаточно большом R , различие между потенциалами φ и φ' можно сделать сколь угодно малым для любого конечного значения r . Вместе с тем для бесконечного пространства, равномерно заполненного веществом (с плотностью ρ_0), уравнение (4) имеет вполне разумное решение $\varphi' = -4\pi G \rho_0 / \lambda$.

В своей работе 1917 г., упоминавшейся в первых строках настоящей статьи, Эйнштейн начинает изложение с обсуждения трудностей ньютоновской теории тяготения и возможности их в какой-то мере преодолеть в случае использования уравнения (4) для φ' вместо уравнения Пуассона (1) *). Но Эйнштейн сразу же отметил, что такой путь «не следует принимать слишком серьезно, так как он служит только для того, чтобы уяснить последующие рассуждения».

*) Эйнштейн пришел к этому заключению, не зная тогда о работе Зеелигера, предложившего принять уравнение (4) для гравитационного потенциала еще значительно раньше.

Подобное заключение вполне понятно: как ньютоновская теория тяготения (уравнение (1)), так и ее обобщение, отраженное в уравнении (4), не удовлетворяют требованиям теории относительности. Этот момент уже обсуждался в основном тексте, где подчеркивалось, что в релятивистской теории силы тяготения не должны распространяться со скоростью, большей скорости света. Между тем в ньютоновской теории сила тяготения фактически считается распространяющейся с бесконечной скоростью.

В скалярной релятивистской теории тяготения, как и в ньютоновской теории тяготения, гравитационное поле описывается скалярной функцией φ — величиной, одинаковой во всех системах отсчета. Только подчиняется этот потенциал φ не уравнению Пуассона (1), а более сложному уравнению, которое в областях, не занятых массами, имеет вид (уравнение Даламбера)

$$\square\varphi \equiv \Delta\varphi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} = 0. \quad (5)$$

Если создающие гравитационное поле тела движутся медленно (со скоростями v , много меньшими скорости света c), то член $c^{-2}\partial^2\varphi/\partial t^2$ в уравнении (5) обычно оказывается малым и в хорошем приближении потенциал φ подчиняется уравнению $\Delta\varphi = 0$, как и в ньютоновской теории тяготения, вне объема, занятого массой (т. е. в области, где в уравнении (1) можно положить $\rho = 0$; для простоты мы не будем выписывать уравнения типа (5) при $\rho \neq 0$).

Общая теория относительности Эйнштейна представляет собой релятивистскую теорию гравитационного поля, причем это поле описывается метрическим тензором g_{ik} . Причины, побудившие Эйнштейна искать уравнения именно для g_{ik} , а не для скаляра φ , пояснены в основном тексте — они связаны с принципом эквивалентности. Уравнения для g_{ik} , установленные Эйнштейном в окончательном виде в 1915 г., обычно записывают в несколько символической форме

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ik}. \quad (6)$$

Здесь R_{ik} и R — некоторые довольно громоздкие выражения, содержащие g_{ik} и его различные производные $\partial g_{ik}/\partial x_l$ и $\partial^2 g_{ik}/\partial x_l \partial x_m$. При этом вторые производные $\partial^2 g_{ik}/\partial x_l \partial x_m$ входят в уравнения Эйнштейна (6) линейным образом и тем самым левая часть уравнений все же напоминает уравнение Даламбера (5).

В правую часть уравнения (6) входит тензор энергии-импульса T_{ik} , который характеризует свойства материи и поэтому, естественно, фигурирует в качестве источника поля g_{ik} . В этом отношении тензор T_{ik} — полный аналог плотности в уравнении Пуассона (1). В случае достаточно слабого поля тяготения (см. основной текст) существенную роль играет лишь одна компонента

тензора g_{ik} , а именно компонента g_{00} , которую можно записать в виде $g_{00} = 1 + 2\varphi/c^2$. При этом величина φ эквивалентна ньютоновскому гравитационному потенциалу и подчиняется уравнению (1).

Уравнения Эйнштейна (6) автоматически сводятся в обсуждаемых условиях к уравнению (1), ибо тензор T_{ik} при этом имеет лишь одну большую компоненту $T_{00} = \rho c^2$, пропорциональную плотности ρ (остальные компоненты T_{ik} малы по сравнению с T_{00}).

Введенный Эйнштейном в 1917 г. Λ -член прибавляется к уравнениям (6), которые в результате принимают вид

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R - \Lambda g_{ik} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ik}. \quad (7)$$

Добавление Λ -члена — это единственное обобщение уравнений (6), не связанное с введением более высоких производных от g_{ik} по координатам x_i и не нарушающее общих принципов теории. Добавление Λ -члена в уравнения (6) в общем аналогично переходу от уравнения (1) к уравнению (4) в результате введения члена $-\lambda\varphi'$.

Если в уравнениях (7) перенести член $-\Lambda g_{ik}$ в правую часть, то он окажется как бы добавкой к тензору T_{ik} и его можно тогда интерпретировать как дополнительный источник гравитационного поля. Иными словами, теперь это поле создается не только материей (тензор T_{ik}), но и самим везде и всегда присутствующим «вакуумным» членом Λg_{ik} . Если «космологическая постоянная» Λ положительна, то учет Λ -члена эквивалентен некоторому отталкиванию, противодействующему гравитационному притяжению, обусловленному тензором T_{ik} .

(Сделали ли все эти пояснения существенно более понятными утверждения, высказанные в основном тексте статьи? Автор отнюдь не самообольщается на этот счет. Никакое краткое дополнение не может, разумеется, заменить учебников и по-настоящему разъяснить достаточно сложные вопросы. Можно надеяться лишь на то, что студенту или инженеру, которым уравнение Пуассона и без того знакомо, сделанные замечания помогут лучше понять, о чем идет речь, вызовут какие-то ассоциации, а быть может, и побудят обратиться к дополнительной литературе *).

* Существует ряд учебников и монографий, посвященных теории относительности и содержащих также освещение космологических вопросов. Но все они, если речь идет о написанных на серьезном и современном уровне, предъявляют к читателям довольно высокие требования. Указать на литературу «промежуточного типа», особенно по космологии, мы, к сожалению, не можем. Современные же курсы, рассчитанные на подготовленного читателя, таковы: Ландау Л. Д. и Лифшиц Е. М. Теория поля.— М.: Наука, 1973; Зельдович Я. Б. и Новиков И. Д. Строение и эволюция Вселенной.— М.: Наука, 1975; Вейнберг С. Гравитация и космология.— М.: Мир, 1975; Пибл П. Физическая космология.— М.: Мир, 1975.

Как и кто создал теорию относительности?

(Опыт рецензии с предисловием и комментариями)

ПРЕДИСЛОВИЕ

В конце 1973 г. в Атомиздате вышла книга «Принцип относительности. Сборник работ по специальной теории относительности». Этот сборник был прислан издательством в редакцию журнала «Наука и жизнь» с просьбой его прорецензировать, и как член редколлегии я должен был решить, как поступить.

Массовый журнал не может и не должен, как правило, помещать рецензии на книги, рассчитанные на специалистов или вообще сравнительно узкий круг читателей. Поэтому вполне можно было бы лишь «принять к сведению» факт выхода в свет упомянутого сборника (его тираж 3825 экземпляров). Другая возможность — поместить краткую рецензию-информацию, что позволило бы читателям убедиться, в частности, в том, что купить сборник нельзя (разве что он где-нибудь сохранился в магазине на периферии, в которых книг по теории относительности обычно не ищут). Наконец, хорошо известна третья возможность, которая меня и привлекла, — написать рецензию не только о самой книге, а то что называется *a propos* (по поводу).

А повод в данном случае действительно имеется. Речь идет о становлении одной из величайших физических теорий. Речь идет фактически и о многом другом. Во всяком случае при чтении сборника «Принцип относительности», содержащего хорошо знакомый в общем материал (в качестве примера замечу, что много лет назад я переводил включенный в сборник исторический обзор из книги В. Паули «Теория относительности»), у меня возникло довольно много весьма разнородных ассоциаций и соображений как о физике, так и в еще большей мере о физиках, истории науки, об этике, пресловутых вопросах приоритета и т. п. Изложить все это на бумаге для человека, привыкшего писать лишь довольно сухие статьи с формулами, дело весьма нелегкое, и предлагаемая рецензия с комментариями является лишь бледной тенью статьи, которую мне самому хотелось бы прочесть. Так или иначе, на-

стоящая статья была написана, но оказалась столь длинной и местами недостаточно популярной, что для «Науки и жизни» она не подошла. Надеюсь, однако, что ее опубликование в другом месте представляется оправданным.

РЕЦЕНЗИЯ

История науки (физики, химии, биологии, математики) всегда выглядела Золушкой рядом с всеобщей историей или историей искусства и литературы. Это в общем вполне понятно и естественно. Во-первых, история науки может интересовать в основном лишь самих ученых, да еще к тому же специалистов в той области, история которой излагается. В то же время, например, всеобщая история интересна для любого культурного человека, быть может, лишь за какими-то особыми исключениями (здесь уже приходится думать о самом определении понятия «культурный человек»). Во-вторых, история науки, в отличие от других разделов истории, обычно малоактуальна в смысле ее связей с сегодняшним днем. В самом деле, история древних Греции или Рима столь популярна потому, что мы находим аналогии, узнаем проявление, хотя и в других условиях, но хорошо знакомых нам человеческих черт и страстей. На далеком во времени материале мы изучаем человека и человеческое общество. Древняя скульптура и живопись также в значительной части живут для нас как произведения искусства, а не только являются объектами изучения для истории искусства или какими-то музейными экспонатами, подобными костям вымерших животных. А вот античная физика родственна таким музейным экспонатам. Древние считали, например, что движение тела является равномерным и прямолинейным, лишь пока на него действует сила, а при отсутствии сил тело должно покоиться. Такой вывод следовал из повседневного опыта тех времен, когда еще не научились избавляться от сил трения. Только Галилей и Ньютон окончательно порвали с античной физикой и заменили ее представлениями, используемыми и сегодня в механике, — здесь имеется в виду хотя бы закон инерции, согласно которому равномерное и прямолинейное движение в инерциальных системах отсчета осуществляется не при наличии сил, а как раз при их отсутствии.

Вряд ли имеются основания развивать здесь эти соображения и подробнее пояснять, почему хорошо сохранившаяся древняя скульптура (и все, что с ней связано в историческом плане) имеет сегодня совсем иное «звучание», чем физика Аристотеля или астрономия Гиппарха — Птолемея. Напомнить же об этом я хотел для того, чтобы высказать, быть может, и спорный тезис: похоже на то, что Золушка на наших глазах преображается и если и не затмит своих сестер, то станет равноправной с ними.

Наиболее явственно и даже ярко этот процесс, обусловленный резким повышением роли науки в жизни общества, находит отражение в произведениях, так сказать, биографического жанра. В качестве героев биографий, воспоминаний и художественных произведений все чаще фигурируют ученые, потеснившие в этом отношении королей, «фюреров», канцлеров и т. д. Разумеется, жизнь ученого — это жизнь человека, и соответствующая биография лишь частично связана с историей науки. Но в хорошей биографии такая связь должна быть глубокой и органичной. В «Автобиографических заметках», написанных на 68-м году жизни и названных чем-то «вроде собственного некролога», Эйнштейн после многих страниц, посвященных в основном физике, замечает: «И это некролог? — может спросить удивленный читатель. По сути дела — да, хотелось бы мне ответить. Потому, что главное в жизни человека моего склада заключается в том, что он думает, и как он думает, а не в том, что он делает или испытывает. Значит, в некрологе можно в основном ограничиться сообщением тех мыслей, которые играли значительную роль в моих стремлениях».

Повышается интерес и внимание к истории науки и в других сферах (помимо биографической), в особенности когда речь идет об истории великих открытий и глубоких идей, появившихся в недавнем прошлом. К их числу в первую очередь относятся детища нашего века — теория относительности и квантовая теория, появление и развитие которых преобразовало физику и косвенно почти все естествознание.

Два вопроса находятся в центре внимания при ознакомлении с историей науки. Раньше всего это вопрос «как» — как возникли и развивались идеи, как готовилось и было совершено открытие. Вторым является вопрос «кто» — кто сделал открытие, высказал идею, воплотил ее «в плоть и кровь», развил, довел до сознания научной общественности. Вопрос «как» представляется основным, первичным — он связан с самим содержанием науки и методами научного исследования. Вопрос же «кто» может показаться второстепенным, и, действительно, он не связан с существом дела, если иметь в виду, скажем, физику, а не психологию научного творчества, социологию научной среды или личную судьбу того или иного человека. Но фактически анализ проблем «как» и «кто» часто, если не в большинстве случаев, трудно разграничить. Науку ведь развивают люди, и если конечный продукт — совокупность определенных утверждений, уравнений, соотношений и т. д., безличен или, вернее, почти безличен, то первоначальный процесс открытия или вывода и получения этих уравнений и соотношений сильно окрашен в человеческие тона и, конкретно, в тона, характерные и типичные для первооткрывателей. Тем самым, если речь идет именно об истории науки, а не о том, как излагать ма-

териал в учебниках и монографиях, то на вопросы «как» и «кто» не только на практике приходится, но и естественно отвечать одновременно.

В какой же форме это лучше всего сделать? Универсальный ответ здесь, конечно, дать нельзя. Важнейшим фактором является время, отделяющее нас от рассматриваемой эпохи. Несмотря на то, что форма в науке играет несравненно меньшую роль, чем в искусстве и литературе, она все же весьма существенна и нередко быстро изменяется. Сейчас, например, в физике общеприняты векторные и тензорные обозначения, а еще в XIX веке и начале XX доминировала запись формул в другом виде. Этот момент в известных пределах не принципиален, но даже подобное препятствие — по сути дела лишь использование непривычных обозначений — очень затрудняет чтение. Что уже тогда сказать о еще более старых книгах, написанных не современным языком? Поэтому, когда речь идет об истории науки до середины XIX века, а иногда и до начала XX века, лучшей формой изложения представляются монографии или статьи, написанные современными авторами и, естественно, снабженные отрывками из оригинальных сочинений (это можно делать не только в виде цитат в тексте, но и в форме более обширных приложений).

Нисколько не противоречит этому пути, а лишь дополняет его издание оригинальных сочинений классиков, снабженное специальными статьями и комментариями, но роль таких собраний научных трудов классиков естествознания еще больше возрастает и, пожалуй, становится первой по важности, когда речь идет о наших современниках или почти что современниках — ученых XX века. Большой заслугой издательства «Наука» является издание, причем на хорошем уровне, серии «Классики науки», в которой уже вышли сочинения А. Эйнштейна, Н. Бора, Э. Резерфорда, Э. Ферми, А. Пуанкаре и некоторые другие. Той же цели с успехом служат менее «академические» издания — сборники статей видных физиков (Д. Максвелла, Л. Больцмана, Г. Лоренца, М. Лауэ, П. Эренфеста, Э. Шредингера, А. Зоммерфельда и др.), выходящие также в издательстве «Наука», и сборники трудов известных русских физиков дореволюционного времени и советских физиков, вышедшие рядом издательств.

В большинстве случаев, однако, фундаментальные научные достижения и теории являются продуктом коллективного творчества (исключение, которое сразу же приходит на ум, это создание Эйнштейном общей теории относительности). Поэтому возникла еще одна и весьма удачная форма — сборник оригинальных работ, составленный по тематическому принципу. Пожалуй, это самый удобный и надежный, вообще говоря, способ получить ответ на вопросы, как и кто создал ту или иную великую естественнонаучную теорию или породил научное направление (нам вместе

с тем придется еще напомнить, что сборники работ классиков являются формой, далеко не свободной от определенных ограничений).

В случае теории относительности первый сборник такого типа был издан в Германии еще в 1913 г. и затем не раз переиздавался. В СССР аналогичная книга «Принцип относительности. Сборник работ классиков релятивизма» появилась в 1935 г., она содержала основные работы Г. Лоренца, А. Эйнштейна, А. Пуанкаре и Г. Минковского по специальной теории относительности (СТО), а также ряд работ Эйнштейна по общей теории относительности (ОТО). Этот сборник пользовался большим и заслуженным успехом, но давно уже стал библиографической редкостью.

В силу сказанного можно было бы только приветствовать появление нового сборника работ классиков релятивизма. При известных условиях можно также согласиться с тем, что достаточно полное освещение истории возникновения и развития специальной теории относительности приходится достигать ценой исключения вопросов, связанных с общей теорией относительности. Действительно, если не ограничиваться оригинальными работами классиков, а поместить разнообразный дополнительный материал, то для изложения ОТО просто не останется достаточно места. Рецензируемый сборник «Принцип относительности» по идее так и составлен. Половину сборника (138 стр. из 330) составляет часть вторая — «Построение специальной теории относительности», где помещены все соответствующие статьи из предыдущего сборника, а также добавлен отрывок из книги Дж. Лармора (1900 г.), краткое предварительное сообщение А. Пуанкаре (1905 г.) и небольшой доклад М. Планка (1906 г.). Хотя, на мой взгляд, все эти добавления правильнее было бы поместить в других частях сборника, — но это вопрос спорный и, главное, не принципиальный. А вот первая и третья части сборника («Возникновение концепции относительности» и «К истории создания специальной теории относительности») вызывают самые серьезные возражения. При этом одна из существенных сторон проблемы здесь даже не историческая, не физическая, а скорее этическая.

Чтобы объяснить яснее, в чем дело, проведу аналогию с литературой и ее историей. Некоторые великие писатели и поэты подвергались как при жизни, так и после смерти необъективной и тенденциозной критике. Кроме того, личная или общественная жизнь некоторых из них иногда бросала какую-то тень на их имя или могла быть так истолкована. Наконец, историки литературы, текстологи и коллекционеры собрали немало личных писем, записок и т. п., которые производят неприятное впечатление по крайней мере без учета обстоятельств места и времени их появления.

Существует мнение, что многие подобные материалы вообще не должны публиковаться. Такой подход в ряде случаев я считаю совершенно неправильным, часто ханжеским и лицемерным. Если

прошло достаточно много времени, то любые факты и материалы разного типа могут в принципе публиковаться и использоваться в специальных статьях, сборниках и монографиях, а также в полных академических собраниях сочинений.

Но вот никому еще, вероятно, даже не приходила в голову идея опубликовать классические стихотворения, близкие и дорогие многим читателям, вместе с отрывками из мемуаров или писем, порочащих их великих авторов, или вместе со статьями, содержащими обвинения этих авторов в плагиате. Так или иначе, ясные из сказанного ограничения учитываются и должны учитываться при издании и переиздании классических произведений как писателей, так и ученых. Независимо от неизбежного расхождения во взглядах и оценках имени Пушкина и Льва Толстого не могут не пользоваться глубоким уважением совершенно подавляющего большинства литераторов (и, конечно, не только литераторов). В равной мере для совершенно подавляющего большинства физиков имени великих преобразователей естествознания ассоциируются не только с научными принципами, формулами и эффектами, но и являются, как правило, именами глубоко почитаемых людей, хотя они сами и ничего от нас не требовали, ибо, как отметил Эйнштейн в некрологе, посвященном памяти Макса Планка: «Человек, которому было суждено одарить мир великой созидательной идеей, не нуждается в похвале потомства. Его творчество даровало ему более значительное благо».

Все это имеет прямое отношение к обсуждаемому сборнику «Принцип относительности», так как при его составлении явно нарушены, по моему мнению, упомянутые, казалось бы, очевидные, условия издания работ классиков. Самое яркое этому доказательство связано с включением в сборник большого куска (он занимает 25 страниц) из книги Эд. Уиттекера, озаглавленного так: «Теория относительности Пуанкаре и Лоренца». Это красноречиво заглавие не обманывает — Уиттекер действительно задался целью доказать, что Эйнштейн не является даже одним из основных авторов специальной теории относительности! В классической же работе Эйнштейна 1905 г., по Уиттекеру, лишь «более пространно излагалась теория относительности Пуанкаре и Лоренца» (стр. 216; здесь и ниже указываются страницы сборника).

Известный англо-ирландский физик и математик Дж. Синг назвал выводы Уиттекера в отношении Эйнштейна диффамацией (стр. 245), что с точностью до перевода с английского эквивалентно слову клевета. Прочитав Уиттекера и убедившись в том, как он искажает и подтасовывает факты (это относится даже к переводу цитат из Пуанкаре; см. стр. 248), я могу только полностью присоединиться к заключению Дж. Синга (справедливости ради, нужно, правда, отметить, что Уиттекеру еще очень далеко до тех, кто выдумал термины «неарийская физика», «реакционное эйн-

штейнманство» и т. п.). Не знаю, какой процент физиков буквально согласился с таким заключением, тем более, что четкую грань между клеветой и явной недобросовестностью или искажением фактов провести трудно, но сути дела название не изменяет. В этой связи представляется существенным, что даже сам составитель сборника А. А. Тяпкин также говорит о «явной предвзятости позиции Уиттекера» и т. п., хотя и считает его книгу «совершенно новым словом в историографии» (стр. 321). Не будем здесь спорить с последним тезисом, жизнь сложна и удивительна, а посему предвзятость и даже клевета действительно могут в одном и том же сочинении уживаться с новым словом в историографии. Но если подобные сочинения можно использовать в собственных статьях, черпая из них какой-то материал, то их включение в сборники, содержащие в основном труды самих классиков естествознания, представляется неуместным. Основания для такого вывода уже были приведены, подкрепить же их ссылками на математические теоремы или на уголовный кодекс я не могу. *

Включение сочинения Уиттекера хотя и важнейший, но далеко не единственный недостаток сборника. Все эти недостатки вместе взятые обусловлены в первую очередь тенденциозностью составителя сборника, который буквально поглощен идеей подчеркнуть и «защитить» приоритет Пуанкаре, а частично и Лоренца, вклад которых в создание СТО якобы далеко не достаточно признан и оценен в связи с преувеличением роли Эйнштейна.

Дать оценку такой позиции можно, очевидно, только на основе конкретного анализа фактического материала, ответив тем самым на вопрос: кто создал специальную теорию относительности? Форма рецензии не подходит для решения этой задачи, и на ней мы остановимся преимущественно во второй части статьи, условно названной «комментариями». Но уже здесь можно осветить вопрос об авторстве СТО, если не с научной, то с «человеческой» стороны.

Три работы считаются важнейшими при создании СТО. Автором первой из них (1904 г.) был один из общепризнанных лидеров теоретической физики, голландский профессор Гендрик Антон Лоренц (1853 — 1928), за два года до этого получивший Нобелевскую премию по физике. Автором второй работы (1906 г., краткое сообщение было опубликовано в 1905 г.) явился уже тогда знаменитый французский математик Анри Пуанкаре (1854 — 1912), хорошо известный также своими исследованиями в области физики и методологии науки. Наконец, третья работа (1905 г.) была написана почти безвестным мелким служащим швейцарского федерального патентного бюро Альбертом Эйнштейном (1879 — 1955).

Кому не известно, что новые произведения популярных и любимых писателей и поэтов сразу же привлекают внимание, в то время как сочинения новичков нужно еще пробивать себе дорогу.

В науке та же естественная тенденция проявляется, пожалуй, еще резче.

Почему же в интересующем нас случае — при создании СТО — все получилось наоборот: особенно известной, без преувеличения можно сказать, знаменитой, стала именно работа Эйнштейна? Ответ на этот вопрос был очень четко сформулирован еще, например, в широко известной книге В. Паули «Теория относительности», впервые опубликованной в 1921 г. в наиболее авторитетной в то время «Энциклопедии математических наук». Книга Паули затем переиздавалась и была переведена на другие языки (русский перевод вышел в 1947 г.). Изложение истории создания СТО Паули заканчивает так: «Основы новой теории были доведены до известного завершения Эйнштейном. Его работа 1905 г. была направлена в печать почти одновременно с сообщением Пуанкаре и написана без осведомленности о работе Лоренца 1904 г. Исследование Эйнштейна содержит не только все существенные результаты обеих названных работ, но также прежде всего изложение совершенно нового и глубокого понимания всей проблемы» (стр. 201). Другой известный физик, М. Борн, так вспоминает о впечатлении, произведенном на него чтением статьи Эйнштейна: «Хотя я был хорошо знаком с релятивистской идеей и с преобразованиями Лоренца, ход идей Эйнштейна был для меня откровением» (стр. 236).

В совершенно новом и глубоком освещении проблемы, явившемся откровением, и состоит очевидная причина успеха работы Эйнштейна, причина того, что именно эта работа считается самой важной при создании СТО. Допускать же, что «немаловажную роль» здесь сыграли «националистические настроения немецкой школы физиков» (стр. 307), представляется просто смехотворным, тем более, что Эйнштейн был евреем и швейцарским гражданином.

Чтобы завершить рецензию, сделаем лишь еще два замечания.

Если основным недостатком третьей части сборника является присутствие некоторых материалов, помещение которых либо кажется нам неуместным (Уиттекер), либо вызывает сильные сомнения (не буду на них останавливаться за неимением места), то первая часть сборника страдает недостатком противоположного характера. Действительно, читатель ожидает, что здесь будут отражены идеи, результаты и трудности, особенно важные для понимания истоков СТО. Но в то время как этими истоками является раньше всего электродинамика движущихся сред, первая часть сборника целиком посвящена одностороннему освещению лишь одного аспекта предистории СТО — возникновению «концепции относительности». На более понятном языке это означает, что речь идет о таком расширении принципа относительности классической механики, которое охватывало бы также электродинамику и вообще «всю физику». Если напомнить, что такой

принцип относительности справедлив только в инерциальных системах и означает полную равноправность всех этих систем отсчета при формулировке законов природы, то становится ясным следующее: история возникновения концепции относительности никак не может излагаться вне связи с вопросом об инерциальных системах и с другими основами механики Галилея и Ньютона. Тем не менее как классическая механика, так и дорелятивистская электродинамика движущихся сред остались по существу вне поля зрения составителя, и оно почти целиком заполнено Пуанкаре: в первой части сборника помещены только доклад Пуанкаре и четыре отрывка из его статей и лекций, а также еще лишь одна небольшая заметка Лоренца.

Можно думать, что картина уже достаточно выяснена: рецензируемый сборник — это не столько собрание трудов классиков релятивизма, снабженное каким-то более или менее нейтральным и вспомогательным дополнительным материалом, сколько полемическое и во многом спорное произведение по истории СТО, снабженное оригинальными статьями классиков релятивизма. В принципе и такая форма изложения допустима, но тогда так и нужно прямо заявить, отразив это и в построении, и в названии книги.

В свете сказанного отмечать технические недостатки издания кажется почти что излишним. Но все же трудно пройти мимо того факта, что сборник плохо отредактирован в литературном отношении (это не относится к переводам, уже издававшимся ранее) и изобилует опечатками.

Многие нужные книги по физике у нас очень трудно купить, так как они издаются совершенно недостаточными тиражами. И дело здесь не в недостатке бумаги, поскольку сейчас речь идет не о массовых изданиях, а о монографиях, сборниках обзорных статей и т. п. Книгу нужно было бы издать тиражом в 7—10 тыс. экз., а выпускаются, скажем лишь 3000 экземпляров, и это несмотря на то, что увеличение тиража экономически выгодно. О необходимости изменить положение часто, но безрезультатно говорят, и я пользуюсь возможностью еще раз напомнить о необходимости повысить тиражи многих книг по физике. Правда, вышедший сборник «Принцип относительности» никак не принадлежит к числу таких книг, но вот хороший сборник на ту же тему издать нужно большим тиражом — он найдет широкий круг читателей.

КОММЕНТАРИИ

Ниже мы сделаем ряд фрагментарных замечаний, прямо или косвенно связанных с заголовком настоящей статьи.

1. Что такое специальная теория относительности?

Одним из основных физических понятий является понятие об инерциальных системах отсчета. Данная система отсчета, служащая для определения координат и времени событий, инерциальна, если в ней соблюдается закон инерции — изолированное тело (тело, не находящееся под действием сил) движется равномерно и прямолинейно. Такое определение не свободно, правда, от возражений и нуждается в уточнениях, поскольку остается еще неясным, какое тело можно считать изолированным, но, грубо говоря, изолированность гарантирована, если все другие тела находятся достаточно далеко (подробнее осветить вопрос об инерциальных системах, как и некоторые другие, здесь нет возможности). Примером достаточно «хорошей» инерциальной системы может служить система координат, начало которой совпадает с Солнцем, а оси направлены на далекие звезды. С несколько меньшей, но обычно еще весьма большой точностью, закон инерции выполняется и на Земле (действие силы тяжести считается исключительным). Система отсчета, вращающаяся относительно инерциальной, уже не будет таковой, причем с увеличением угловой скорости вращения различия между инерциальной и вращающейся системами проявятся все резче.

Если данная система инерциальна, то инерциальной будет и любая другая система отсчета, движущаяся относительно нее равномерно и прямолинейно. Обобщение этого заключения на все механические явления — утверждение о том, что все такие явления во всех инерциальных системах протекают совершенно одинаково (разумеется, при одинаковых начальных условиях) — как раз и составляет содержание классического или галилеева принципа относительности. Точнее, использование и формулировка этого принципа включают в себя также вполне определенное, дорелятивистское предположение о том, как связаны между собой координаты и время событий в различных инерциальных системах. Так, если одна из этих систем — система K' (координаты x', y', z и время t') движется относительно данной инерциальной системы K (координаты x, y, z и время t) со скоростью v вдоль положительных осей x и x' (направления всех осей считаем совпадающими), то, как предполагалось до создания СТО,

$$\begin{aligned}x' &= x - vt, & y' &= y, \\z &= z, & t' &= t\end{aligned}$$

(преобразования Галилея).

Впрочем, абсолютность времени — его независимость от движения системы отсчета (отсюда и равенство $t' = t$) — считалась имеющей место вообще в любых системах отсчета.

При равномерном движении тела его ускорение, конечно, равно нулю. Значит, при преобразовании Галилея, т. е. в любых инерциальных системах, ускорение одинаково. Поэтому при таких преобразованиях закон динамики — второй закон Ньютона (масса \times ускорение = силе) — остается неизменным, если только масса и сила, как и ускорение, остаются одинаковыми в системах K и K' . Последнее предполагается (и обосновывается на опыте), в результате чего мы и приходим к выводу о соблюдении классического принципа относительности в механике Ньютона. Вообще гарантией соблюдения классического принципа относительности является неизменность (инвариантность) рассматриваемых физических законов при преобразованиях Галилея.

Когда-то, до второй половины и даже до конца XIX века, считали, что всю физику можно построить на основе ньютоновских уравнений движения. Тем самым считался всегда справедливым и классический принцип относительности. Развитие электродинамики поставило, однако, классический принцип относительности под сомнение. Уравнения электродинамики (уравнения Максвелла) при преобразованиях Галилея не сохраняют свою форму, и поэтому применение этих преобразований приводит к такому выводу: принцип относительности в электродинамике нарушается, и, в частности, свет и электромагнитные волны всех других диапазонов в вакууме в различных инерциальных системах распространяются по-разному. Если вводившаяся тогда «светоносная среда» — эфир неподвижна в одной из инерциальных систем (в системе K), то в этой системе скорость света независимо от направления равна $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с. В других же инерциальных системах K' , движущихся относительно эфира со скоростью v (вдоль осей x и x'), как ясно из преобразований Галилея, скорость света будет равна $c' = c - v$ при его распространении вдоль осей x и x' , равна $c' = c + v$ при распространении света против осей x и x' и т. д.

Но опыты опровергли столь ясный, казалось бы, вывод: все эксперименты, начиная со знаменитого опыта Майкельсона, впервые проведенного в 1881 г. и затем неоднократно повторявшегося, подтверждают справедливость принципа относительности и в электродинамике, и вообще для всей физики. Но как же тогда, в согласии с принципом относительности, скорость света может равняться одной и той же величине в разных системах отсчета, когда из преобразований Галилея очевиден противоположный вывод?

Понадобилось почти четверть века, чтобы в итоге мучительных поисков прийти к решению, составляющему ядро и основу СТО и сводящемуся к отказу от преобразований Галилея. Точнее, как это обычно бывает в подобных случаях, от них не отказались, а был понят их приближенный характер. Точные же формулы, свя-

зывающие координаты и время в системах K' и K , имеют вид

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

(преобразования Лоренца).

Если скорость рассматриваемых инерциальных систем друг относительно друга v достаточно мала по сравнению со скоростью света c , то преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея; отсюда и ясна их точность, характеризуемая параметром v^2/c^2 . Для близкого спутника Земли скорость $v \approx 8$ км/с и $v^2/c^2 \sim 10^{-9}$. Скорость Земли относительно Солнца $v \approx 30$ км/с и $v^2/c^2 \sim 10^{-8}$. Уже из этих примеров ясно, что в области механических явлений, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни, преобразования Галилея и вся связанная с ними ньютоновская механика справедливы с огромной точностью. Но в электродинамике и при исследовании релятивистских частиц — частиц, движущихся с высокой скоростью v , сравнимой со скоростью света в вакууме c , нужно пользоваться преобразованиями Лоренца. Одно из их следствий — равенство $x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2 = (x')^2 + (y')^2 + (z')^2 - c^2(t')^2$. Если учесть, что уравнение фронта сферической световой волны имеет вид $x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2 = 0$, то указанное равенство сразу же свидетельствует о справедливости принципа относительности при распространении света — во всех инерциальных системах скорость света одинакова и равна c .

Здесь нет, разумеется, никакой возможности подробнее излагать основы СТО¹⁾, но не сообщить или не напомнить сказанное выше было невозможно: под СТО как раз понимают теоретические построения, базирующиеся на принципе относительности и преобразованиях Лоренца. Без понимания того, что это значит, нельзя понять, как и кто создал СТО. Для известной полноты картины заметим, что в настоящее время отдельный курс «специальная теория относительности» студентам обычно не читается. Дело в том, что о принципе относительности и преобразованиях Лоренца рассказывают в курсе общей физики и повторяют это в курсе электродинамики. Весь же остальной материал, ко-

¹⁾ Помимо уже цитированной книги В. Паули, упомянем о популярной книге М. Борна «Эйнштейновская теория относительности» (М.: Мир, 1972) и вводных главах курсов Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица «Теория поля» (М.: Наука, 1973) и В. А. Угарова «Специальная теория относительности» (М.: Наука, 1977). О физическом содержании СТО см. также статью Е. Л. Фейнберга (УФН, 1975, т. 116, с. 709). История создания и развития теории относительности освещена, в частности, в книге У. И. Франкфурта «Специальная и общая теория относительности. Исторические очерки» (М.: Наука, 1968); см. также статьи Ю. И. Кобзарева (УФН, 1974, т. 113, с. 679; 1975, т. 115, с. 545).

торый составлял содержание курсов СТО, теперь, естественным образом, вошел в различные разделы теоретической физики (теорию поля, электродинамику сплошных сред и т. д.). Тем самым лишний раз подчеркивается тот факт, что главное в СТО — это новые по сравнению с дорелятивистской физикой пространственно-временные представления, находящие отражение в замене преобразований Галилея преобразованиями Лоренца.

Содержание последних, если говорить о физике, не сводится только к самим приведенным простым формулам, связывающим координаты и время x', y', z', t' с x, y, z и t . Как всегда в физике, нужно также установить смысл всех величин — указать основу используемых методов измерения координат и времени, уточнить некоторые свойства служащих для этой цели масштабов и часов. Относится сюда, в частности, и вопрос о синхронизации часов в каждой из систем K и K' . Так, координаты и время, фигурирующие в преобразованиях Лоренца, определены таким образом, что события, одновременные в системе K (время t), не одновременны в системе K' (время t'). Отказ от абсолютного времени является особенно радикальным выводом (им мы обязаны Эйнштейну). По своему значению и трудности этот вывод можно сравнить с отказом от абсолютной неподвижности Земли, лежащим в основе гелиоцентрической системы Коперника.

2. Как и кто создал СТО?

Путь к СТО лежал, как ясно из сказанного, через преодоление фундаментальной трудности — принцип относительности на опыте соблюдается и в электродинамике (а не только в механике), но это не совместимо с преобразованиями Галилея. Впрочем, Лоренц и другие пытались устранить противоречие без отказа от преобразований Галилея, путем предположения о том, что все тела при их движении относительно эфира сокращаются. Если масштаб, длина которого в покое относительно эфира равна l , при движении со скоростью v имеет длину $l\sqrt{1 - v^2/c^2}$, то можно объяснить, почему некоторые опыты не обнаруживают движения тел относительно эфира и их результаты не зависят от скорости движения Земли относительно Солнца. Гипотезы сокращения, однако, не для всех опытов достаточно; становились известными все новые опыты, которые находились в согласии с принципом относительности и для своего объяснения требовали дополнительных гипотез. Такое положение, конечно, неудовлетворительно, и Лоренц упорно стремился «показать, что многие электромагнитные явления строго, т. е. без пренебрежения членами высших порядков, не зависят от движения системы». Для этой цели Лоренц стремился показать, что для равномерно и прямолинейно движущегося (относительно эфира) тела уравнения элект-

тродинамики допускают решения, которые определенным образом соответствуют решениям для такого же покоящегося тела. Соответствие достигается в результате перехода к новым переменным x', y', z' и t' с помощью преобразований Лоренца, а также введения новых (штрихованных) векторов электромагнитного поля. В результате таких преобразований форма уравнений поля не изменяется, т. е. они имеют одинаковый вид для старых (нештрихованных) и новых (штрихованных) величин. Такое свойство называется инвариантностью — в данном случае инвариантностью уравнений электромагнитного поля относительно преобразований Лоренца.

Сейчас, после создания СТО, мы знаем, что это свидетельствует как раз о соблюдении принципа относительности в электродинамике, но Лоренц отнюдь не считал время t' временем в движущейся системе отсчета, он называл это время местным и полагал, что имеет «дело просто со вспомогательными величинами, введенными лишь с помощью математического ухищрения. В частности, переменную t' нельзя было назвать «временем» в том же смысле, как переменную t » (стр. 193). В 1915 г. Лоренц писал то же самое: «Главная причина моей неудачи заключалась в том, что я всегда придерживался мысли, что только переменную t можно принять за истинное время и что мое местное время t' должно рассматриваться не более как вспомогательная математическая величина. В теории Эйнштейна, напротив, t' играет ту же роль, что и t » (стр. 197). В 1927 г., за год до смерти, Лоренц высказывался еще более определенно: «Для меня существовало только истинное время. Я рассматривал свое преобразование времени только как эвристическую рабочую гипотезу. Итак, теория относительности является фактически работой исключительно Эйнштейна» (стр. 263). Добавлю, что, перечитав сейчас (через 70 лет после их опубликования!) работы Лоренца и Пуанкаре, я лишь с трудом и зная заранее результат (а это, как известно, чрезвычайно облегчает понимание) смог понять, почему доказанная в этих работах инвариантность уравнений электродинамики относительно преобразований Лоренца могла тогда рассматриваться в качестве свидетельства справедливости принципа относительности. К тому же Лоренц и Пуанкаре понимали этот принцип лишь как утверждение о невозможности заметить равномерное движение тела относительно эфира. Перейти отсюда к рассмотрению всех инерциальных систем отсчета как совершенно равноправных (такова современная формулировка принципа относительности) можно без особого труда, только если понимать преобразования Лоренца как имеющие смысл перехода к движущейся системе отсчета.

Как мы видели, Лоренц последнего определенно не считал. Позиция Пуанкаре менее ясна. В его статье 1905 — 1906 гг. просто утверждается, что уравнения электродинамики «можно подверг-

нуть замечательному преобразованию, найденному Лоренцем, которое объясняет, почему никакой опыт не в состоянии обнаружить абсолютное движение Земли» (стр. 122). Само же это «объяснение», на мой взгляд, не идет дальше объяснения Лоренца. Вообще о своей работе Пуанкаре пишет: «Результаты, полученные мною, согласуются во всех важных пунктах с теми, которые получил Лоренц. Я стремился только дополнить и видоизменить их в некоторых деталях. Некоторые имеющиеся расхождения, как мы увидим дальше, не играют существенной роли» (стр. 119). С другой стороны, в более ранних работах, статьях и докладах Пуанкаре имеется ряд замечаний, звучащих почти пророчески. Речь здесь идет и о необходимости определить понятие одновременности, и о возможности использовать для этой цели световые сигналы, и о принципе относительности. Но Пуанкаре не развил этих соображений и в своих работах 1905 — 1906 гг. следует за Лоренцем. Как уже подчеркивалось, они в основном стремились показать и показали, при каких предположениях равномерное движение тел относительно эфира будет совершенно незаметно. Между тем Эйнштейн в его работе 1905 г., можно сказать, «обернул» всю постановку вопроса — он показал, что, приняв принцип относительности и осуществив синхронизацию часов светом (а также приняв, что скорость света не зависит от движения источника), никаких других дополнительных гипотез делать не нужно: преобразования Лоренца и, как следствие, сокращение движущихся масштабов и замедление хода движущихся часов непосредственно следуют из указанных предположений.

Таким образом, если судить по опубликованным материалам, Пуанкаре, был, по-видимому, довольно близок к созданию СТО, но до конца не дошел. Почему так произошло, можно только гадать. Возможно, главная причина в том, что Пуанкаре был все же в первую очередь математиком и в этой связи ему особенно трудно было подняться (или опуститься?) до четкого понимания столь важных для физики сторон проблемы, как достаточно определенное уточнение смысла всех вводимых величин и понятий. Другая, хотя и близкая, гипотеза такова: Пуанкаре помешала его приверженность к конвенционализму, т. е. течению, подчеркивающему (и переоценивающему) роль условных элементов и определений в физике. Какая-то конвенциональность при построении физических теорий совершенно несомненна. Длину можно измерять и в метрах, и в футах, а также и рядом необычных и экстравагантных методов. То же относится ко времени, к другим величинам, а также к определению одновременности — такое определение не предписано однозначно. Но конечный результат, содержание физической теории (в отличие от формы записи и т. п.), не является условным, а определяется природой, объектом исследования. Переоценка конвенционального элемента в познании

может помешать уточнению понятий. Могло это сказаться, в частности, на том, что Пуанкаре не позаботился об уточнении смысла «истинного» времени t и «местного» времени t' , которые на самом деле в одинаковой мере истинны, но являются, если угодно, «местным» временем соответственно для систем K и K' .

Должен подчеркнуть, однако, что подобные гипотезы, в данном случае касающиеся Пуанкаре, не только произвольны, но и вообще незаконны, неправомочны. Пуанкаре, несомненно, принял активное участие в создании СТО, его вклад бесспорен²⁾. Спрашивать же, почему он не выполнил еще и работу Эйнштейна, можно не с большим основанием, чем и в отношении всех физиков того времени, — великие работы потому и называются великими, что сделать их крайне трудно.

²⁾ Поскольку вопрос о вкладе Пуанкаре при создании СТО широко обсуждается, в частности, в настоящей статье, уместно привести здесь мнение на этот счет, высказанное Л. де Бройлем. В своей речи, произнесенной в 1954 г. в связи со столетием со дня рождения А. Пуанкаре, де Бройль говорит (см. *Пуанкаре А. Избр. труды.* — М.: Наука, 1974, т. 3, с. 706, 707): «Еще немного и Анри Пуанкаре, а не Альберт Эйнштейн первым построил бы теорию относительности во всей ее общности, доставив тем самым французской науке честь этого открытия... Однако Пуанкаре так и не сделал решающего шага и предоставил Эйнштейну честь разглядеть все следствия из принципа относительности и, в частности, путем глубокого анализа измерений длины и времени выяснить подлинную физическую природу связи, устанавливаемой принципом относительности между пространством и временем. Почему Пуанкаре не дошел до конца в своих выводах? Несомненно, чрезмерно критическая направленность его склада мышления, обусловленная, быть может тем, что Пуанкаре как ученый был прежде всего чистым математиком. Как уже говорилось ранее, Пуанкаре занимал по отношению к физическим теориям несколько скептическую позицию, считая, что вообще существует бесконечно много логически эквивалентных точек зрения и картин действительности, из которых ученый, руководствуясь исключительно соображениями удобства, выбирает какую-то одну. Вероятно, такой номинализм иной раз мешал ему признать тот факт, что среди логически возможных теорий есть такие, которые ближе к физической реальности, во всяком случае лучше согласуются с интуицией физика, и тем самым больше могут помочь ему. Вот почему молодой Альберт Эйнштейн, которому в то время исполнилось лишь 25 лет и математические знания которого не могли идти в сравнение с глубокими познаниями гениального французского ученого, тем не менее раньше Пуанкаре нашел синтез, сразу снявший все трудности, использовал и обосновал все попытки своих предшественников. Этот решающий удар был нанесен мощным интеллектом, руководимым глубокой интуицией о природе физической реальности.

Однако блестящий успех Эйнштейна не дает нам права забывать о том, что проблема относительности была еще ранее глубоко проанализирована светлым умом Пуанкаре и что именно Пуанкаре внес существенный вклад в будущее решение этой проблемы. Без Лоренца и Пуанкаре Эйнштейн не мог бы достичь успеха».

Как нам представляется, позиция де Бройля, относящегося к памяти А. Пуанкаре с глубоким уважением и максимальной благожелательностью, должна рассматриваться как еще одно свидетельство того, что основным автором СТО является А. Эйнштейн (см. также детальный анализ работы Пуанкаре «К динамике электрона» в статье *Miller A. I.* — *Archive for History of Exact Sciences*, 1973, v. 10, p. 207—328.

Роль работы Эйнштейна, ее смысл, помимо уже сказанного, поясним его же словами, содержащимися в письме, написанном за два месяца до смерти ³⁾: «Вспоминая историю развития специальной теории относительности, мы можем с уверенностью сказать, что к 1905 г. открытие ее было подготовлено. Лоренц уже знал, что преобразование, получившее впоследствии его имя, имеет существенное значение для анализа уравнений Максвелла, а Пуанкаре развил эту мысль. Что касается меня, то я знал только фундаментальный труд Лоренца, написанный в 1895 году, но не был знаком с его более поздней работой и со связанным с ней исследованием Пуанкаре. В этом смысле моя работа была самостоятельной. Новой в ней была мысль о том, что значение преобразования Лоренца выходит за рамки уравнений Максвелла и касается сущности пространства и времени. Новым был и вывод о том, что «инвариантность Лоренца» является общим условием для каждой физической теории. Это было для меня особенно важно, так как я еще раньше понял, что максвелловская теория не описывает микроструктуру излучения и поэтому не всегда справедлива».

Так кто же все-таки создал специальную теорию относительности, спросит читатель, желающий получить простой ответ. Как и в большинстве подобных случаев, СТО не является открытием или результатом, целиком принадлежащим одному человеку. Но главную роль в создании СТО большинство физиков (и я в том числе), безусловно, отводит Эйнштейну, так как именно его работа содержала «изложение совершенно нового и глубокого понимания всей проблемы» (В. Паули, стр. 201) и была «тем последним и решающим элементом в фундаменте, заложенном Лоренцем, Пуанкаре и другими, на котором могло держаться здание...» (М. Борн, стр. 238). К числу этих «других» следует в первую очередь отнести Лармора, который еще в 1900 г. получил преобразования Лоренца (еще раньше, в 1887 г., очень близкие по типу преобразования использовал Фогт).

Существуют и другие оценки роли Эйнштейна, Лоренца и Пуанкаре в создании СТО. И если экстремистские взгляды, сводящиеся к отрицанию вклада Эйнштейна, не заслуживают, по моему убеждению, никакого внимания, то более умеренные формулировки типа «СТО создана Лоренцем, Пуанкаре и Эйнштейном» остаются в конце концов делом их авторов — нельзя же такие вещи декретировать, и никто еще не изобрел весов, на которых с аптекарской точностью удалось бы отмерять научные заслуги. По этой и некоторым другим причинам приоритетные споры, а

³⁾ Цитируем по книге К. Зелига «Альберт Эйнштейн» (М: Атомиздат, 1966), являющейся лучшей известной нам биографией Эйнштейна, изданной на русском языке (см. стр. 67 этой книги; несколько другой перевод см. на стр. 236 рецензируемого сборника).

тем более дразги, достаточно частые в научной среде, обычно вызывают чувство протеста. Но об этом — в следующем разделе. Сейчас же кажется уместным, во избежание недоразумений, сделать замечание, касающееся названия «теория относительности Эйнштейна».

Такое словопотребление совершенно естественно и закономерно, тем более, что оно отнюдь не тождественно с названием «специальная теория относительности Эйнштейна». Дело в том, что под теорией относительности, если не уточнять, понимают и специальную (СТО), и общую теорию относительности (ОТО). Общая теория относительности обобщает и развивает СТО и, как принято считать, является непревзойденной вершиной теоретической физики⁴). Например, М. Борн в 1955 г. в своем докладе заявил: «Я считал, и считаю поныне, что это величайшее открытие человеческой мысли, касающееся природы, открытие, в котором удивительнейшим образом сочетаются философская глубина, интуиция физика и математическое искусство. Я восхищаюсь им как творением искусства». Выразительно также замечание самого Эйнштейна, сделанное им в 1912 г. в письме А. Зоммерфельду, как раз в период создания ОТО: «По сравнению с этой проблемой первоначальная теория относительности (т. е. специальная, или частная, теория.— В. Г.) является просто детской игрушкой». Из другого письма Эйнштейна мы знаем, что «период со дня зарождения идеи о специальной теории относительности и до окончания статьи, в которой она изложена, составил пять или шесть недель». На построение же общей теории относительности Эйнштейн затратил около 8—9 лет (с 1906 или 1907 по 1915—1916 гг.), а затем ее развитием занимался вплоть до своей смерти 18 апреля 1955 г. К этому нужно еще раз добавить, что общая теория относительности в максимальной известной в истории науки степени — создание одного автора — Эйнштейна. Наконец, теория относительности стала достоянием широкой публики и вышла за пределы чисто научных кругов только в 1919 г., когда впервые было наблюденно предсказанное ОТО отклонение световых лучей, проходящих вблизи Солнца. Следовательно, теорию относительности в целом можно связать только с именем Эйнштейна.

5. Замечания о приоритете

Явно или неявно, но вопрос о приоритете занимает видное место в жизни научно-технической среды. Иногда без этого действительно трудно обойтись, например при выдаче патентов или

⁴) Поскольку здесь нет возможности подробнее остановиться на месте ОТО в развитии физики, позволю себе сослаться на свою статью «Гелиоцентрическая система и общая теория относительности (от Коперника до Эйнштейна)», помещенную в настоящем сборнике (стр. 7).

авторских свидетельств на изобретения. Но нередко внимание к приоритету, а тем более борьба за приоритет гипертрофированы под действием таких человеческих страстей, как честолюбие, тщеславие, а иногда и похуже. В применении к таким случаям можно было бы сказать, что «вопросы приоритета — грязное дело». Хотелось бы сделать это «дело» более чистым, и, вероятно, такая задача не безнадежна, поскольку неблагоприятное поведение в вопросах приоритета не может быть врожденным, оно не занесено генетическим кодом. Другими словами, устранение ненормальных явлений в сфере установления приоритета в значительной мере является задачей воспитания. И нет здесь лучшего метода воспитания, чем примеры, достойные подражания. Вот ради такого примера я, собственно, и решил написать настоящий раздел.

В рецензии были приведены утверждения о том, что Эйнштейн не создавал специальной теории относительности. Как же он сам реагировал на подобные высказывания? Ответ ясен из переписки между Борном и Эйнштейном. В 1953 г. Борн писал Эйнштейну из Эдинбурга: «Престарелый математик Уиттекер, с которым я дружу, проживающий здесь в качестве почетного профессора, подготовил новое издание своей старой «Истории развития теории эфира», второй том которой уже вышел в свет. Он содержит, в числе прочего, также и историю создания теории относительности, с той особенностью, что ее открытие приписывается Пуанкаре и Лоренцу, между тем как твои работы упоминаются лишь как второстепенные. Хотя книга происходит из Эдинбурга, я, собственно говоря, не боюсь, что тебе может прийти в голову, будто я стою за этим делом. Фактически вот уже три года, как я делал все возможное, чтобы отговорить Уиттекера от его намерения, которое он давно лелеял и любил пропагандировать. Я перечитал старые оригинальные статьи, в том числе некоторые побочные статьи Пуанкаре, и снабдил Уиттекера английскими переводами немецких работ... Но все было тщетно. Он настаивал на том, что все существенное содержалось уже у Пуанкаре и что Лоренцу было вполне ясно физическое толкование. Ну, мне-то уже известно, сколь в действительности скептически был настроен Лоренц и как долго длилось, пока он стал «релятивистом». Все это я рассказал Уиттекеру, но без успеха. Эта история злит меня, поскольку он пользуется большим авторитетом в говорящих по-английски странах, и многие ему поверят. К тому же мне в особенности неприятно, что в свое изложение он ввел всевозможные частные сообщения по поводу квантовой механики таким способом, что моя роль в ней в особенности расхваливается. Так что многие (если даже и не ты сам) могут подумать, что я сам дурным образом причастен к этому делу».

Ответ Эйнштейна был таков: «Дорогой Борн! Выбрось из головы все мысли по поводу книги твоего друга. Каждый ведет

себя, как это представляется ему правильным, или, выражаясь детерминистически, как ему предначертано. Если он убедит других — это их дело. Что касается меня, то я во всяком случае нашел удовлетворение уже в самом процессе своих усилий. Я не считаю, однако, разумным делом защищать пару своих результатов как свою «собственность», уподобляясь старому скряге, собравшему, надрываясь, пару грошей. Я не питаю к Уиттекеру и уж, разумеется, к тебе никакого зла. Да ведь вовсе и нет нужды мне читать эту штуку»⁵⁾).

Этот ответ очень характерен для Эйнштейна, и тем, кто мало знаком с его биографией, он пояснит многое. Да, собственно, он пояснит главное — в чем «секрет» исключительной популярности Эйнштейна в современном мире. Тот факт, что он был величайшим из великих физиков нашего, да и не только нашего, века, — это основное, но далеко не все. Эйнштейн еще и боролся за справедливость, за свободу и другие права человека, презирал темные силы и являл пример благородства и высокого человеческого достоинства. И просто невозможно себе представить, чтобы Эйнштейн вступил в приоритетные споры, не говоря уже о дрызгах. То же можно сказать о Лоренце и Пуанкаре. Лоренц, так много сделавший для создания СТО, отдавал честь создания этой теории «исключительно Эйнштейну», отмечал вклад Пуанкаре. Последний превозносил роль Лоренца. Эйнштейн подчеркивал заслуги Лоренца и Пуанкаре. Можно подозревать, что Пуанкаре не считал вклад Эйнштейна особенно значительным и, возможно, даже полагал, что он и сам «все сделал». Но в том-то и дело, что в настроениях Пуанкаре мы пытаемся догадаться по его молчанию, а не на основании каких-то высказанных им претензий.

И какой же это разительный контраст по сравнению с тем, что пришлось повидать! Вспоминая поведение некоторых борцов за приоритет (разумеется, за их собственный приоритет, хотя это и прикрывалось фразами об интересах науки), приходит на ум мелькавший в литературе рассказик о беспризорном, требовавшем деньги в такой форме: «Тетка, дай гривенник, не то в морду плюну, а у меня болезнь заразная». И, вероятно, давали тетки гривенники, и уж заведомо цитировали и цитировали вымогателей, требовавших этого во славу их приоритета. Не стоило бы об этом и вспоминать, если бы не убеждение в том, что бактерии «приоритетомании» живы и, во избежание неприятностей, руки, по-прежнему, все время нужно мыть. Учат же с детства не плевать на пол, уступать место пожилым людям и многому подобному, а презрительное отношение к правилам «хорошего поведения», как к буржуазному предрассудку, давно уже сменилось их при-

⁵⁾ Albert Einstein, Hedwiga and Max Born. Briefwechsel. 1916—1955.— München, 1968. Письмо от 12 октября 1953 г.; см. также «Эйнштейновский сборник, 1972».— М.: Наука, 1974, с. 71.

знанием. Точно так же когда-то и в какой-то форме нужно учить молодежь и тому, что и когда можно позволять себе в области приоритета. Тот факт, что писанных правил здесь не существует, довольно естествен и не является особым препятствием.

Чтобы не быть неправильно понятым, а то и обвиненным в лицемерии, должен подчеркнуть, что ни в какой мере не собираюсь объявить само внимание к приоритетным вопросам каким-то недостойным или мелким чувством и т. п. Напротив, насколько известно, большинство людей, занимающихся наукой (не хочется лишний раз употреблять заштампованное слово «ученый»), интересуются приоритетом, равнодушны к нему, и это достаточно естественно. Получение новых научных результатов, и по возможности, важных, значительных и интересных, как раз и является целью этих людей. И получить результат нужно впервые или хотя бы одновременно и независимо от других. Чем больше получено результатов, тем с большей уверенностью их автор может считать, что жизнь прожита не зря, не говоря уже о признании в научной среде и более прозаических благах. Поэтому практически все (исключение составляют так называемые «люди не от мира сего») научные работники в той или иной степени интересуются вопросами приоритета — они радуются признанию их работ и огорчаются невниманию и забвению.

Относится это и к людям, выдающимся в научном и человеческом отношениях. К их числу все физики, насколько я знаю, относят Пауля Эренфеста, оставившего по себе теплую и благодарную память и в нашей стране (Эренфест одно время жил в России, а затем приезжал в СССР из Голландии, где он был преемником Лоренца на кафедре теоретической физики Лейденского университета). Но вот что писал Эйнштейн Зоммерфельду в 1922 г. ⁶⁾: «Когда я последний раз был в Лейдене, то заметил, что Эренфест был прямо несчастен, оттого что в последнем издании Вашей книги Вы не отметили его авторство адиабатической гипотезы».

Каким-то доводом в пользу равнодушия к вопросам приоритета не может служить и приведенное выше письмо Эйнштейна Борну. Эйнштейн тогда находился на склоне дней, а признание уже получил ни с чем не сравнимое. Поэтому, если он тогда в какой-то форме сопоставлял специальную теорию относительности с парой грошей, то это еще пельзя обобщить на всю его жизнь. Да и письмо это было приведено не как пример безразличия к приоритету — в нем отражено в первую очередь другое. Это «другое» не позволяет людям требовать признания и цитирования, подобно тому, как не требуют и даже не просят уважения и любви — их завоевывают другими путями. В вопросах приоритета тоже есть

⁶⁾ Переписка Эйнштейна с Зоммерфельдом частично опубликована в русском переводе: *А. Зоммерфельд. Пути познания в физике.* — М.: Наука, 1973.

такие пути. Но невозможно себе даже представить, скажем, Эренфеста, требующего упоминания его имени в книге Зоммерфельда с помощью письма в «местном» Мюнхенского университета (Зоммерфельд был там профессором) или, например, в редакцию какого-то журнала.

Если же под влиянием минутного раздражения или в силу каких-то других причин «обиженный» все же пишет какое-то письмо в редакцию или вообще реагирует не так, «как надо», то сам же об этом обычно потом жалеет, стыдится своего поведения. С сожалением должен признаться, что вспоминаю несколько таких случаев из собственной практики. В общем опыт показывает, что в вопросах приоритета за редкими исключениями (такие, конечно, существуют) самый правильный путь — это просто молчать, иначе может остаться неприятный осадок, и он горше отсутствия каких-то ссылок, кажущегося или даже истинного невнимания. Большинство людей так и поступает.

Справедливости ради нужно заметить, правда, что такое отношение к вопросам приоритета в каком-то смысле на руку ничтожному, но довольно неприятному и крикливому меньшинству. Проходит научная конференция. В кулуарах, за круглым столом собралась группа участников, они обсуждают будоражащие новости, тему завтрашнего заседания. Идет обмен мнениями, гипотезами, рождаются идеи. На другой день один из участников этой дискуссии выступает на заседании самой конференции, излагает коллективное мнение, явно упоминая об этом. Потом идут прения. Все это будет опубликовано через пару лет в трудах конференции. Но уже через пару месяцев в известном журнале появляется статья одного из участников дискуссии. Он ничего не упоминает, ни дискуссии, ни ее участников, но использует ее результаты. Возможно, что этот автор и на самой дискуссии первым сказал какое-то «э». В любом случае он что-то добавил новое, когда писал статью. Так что это отнюдь не плагиат в обычном смысле слова. Или другой пример. Человек получает препринт (например, ротационированную копию статьи, направленной в журнал) и видит там интересную идею. Может быть, получивший препринт имел аналогичную идею, но не стал публиковать. Может быть, просто досада взяла, что сам не додумался. Так или иначе, пишется статья на ту же тему, но с примечанием: «Когда настоящая работа уже была сделана, нам стала известна статья...». И упрекнуть-то вроде автора не в чем — он ведь сослался, — и поди докажи, что раньше ничего или мало что сделал. Если авторы подобных научных работ люди способные, сами вносят какой-то вклад и никогда не делают ошибок наивных дебютантов, списывающих целые страницы, то их деятельность внешне вполне успешна.

Как с этим бороться? Писать протестующие статьи в журналы? Да это заденет пишущего не меньше, чем заслуженно им крити-

куемого. Для тех, кто огорчен подобной ситуацией, могу в утешение высказать только такую гипотезу: незаслуженные известность и слава, вероятно, не доставляют такого же удовольствия, как заслуженные. И к тому же за круглым столом ведь сидело человек двадцать, и некоторые из них все помнят, так что правда может выплыть наружу, — понимание этого тоже не доставляет удовольствия нашему «герою».

Можно было бы сделать много и других замечаний на приоритетные темы. Тут и вопрос о подсознательных явлениях, когда человек забывает об услышанном или прочитанном и ему вполне искренне кажется, что идея потом явилась у него самого. Тут и вопросы о дипломах за открытия и различных премиях, в частности Нобелевских. Но для этого здесь нет места и ограничусь еще лишь замечанием о приоритете, связанном с «потусторонним миром», с выяснением приоритетных споров в отношении людей, уже давно ушедших от нас.

Спора нет, ответ на вопрос, кто создал теорию или сделал открытие, в той или иной мере связан с приоритетом. «Разыскание», как говорят литературоведы, новых документов и фактов можно только приветствовать. Но могут ли не вызывать чувство досады различные домыслы, например о том, знал ли Эйнштейн работу Лоренца 1904 г.? Эйнштейн вполне четко и, кажется, не раз указывал, что не знал об этой работе, когда писал свою статью. Но вот Дж. Кисуани, отмечая, что «прямых доказательств по этому вопросу нет» (стр. 254), посвящает ему тем не менее несколько страниц, стараясь с помощью анализа терминологии доказать, что Эйнштейн все же знал работу Лоренца, хотя она и была опубликована в малодоступном журнале. А. А. Тяпкин, потративший столь много сил для доказательства (с моей точки зрения, совершенно излишнего) того, сколь значителен был вклад Лоренца, отмечает, что с выводом Кисуани «никак нельзя согласиться» (стр. 327). Таким образом, А. А. Тяпкин не склонен, видимо, считать текстологию методом, особенно подходящим для решения приоритетных вопросов в физике. Но выдвигаемые им самим принципы немногим лучше. Так, он считает, что вопросы приоритета в создании теории «недопустимо оценивать... исходя в основном из факта признания самим автором незначительности собственного вклада в решение проблемы. Подобные признания могут характеризовать лишь степени понимания автором значения своего труда, да и то после поправки, учитывающей скромность автора» (стр. 272).

Хорошо известно, что признание обвиняемого не считается на суде доказательством его виновности, ибо это признание может оказаться вынужденным или иметь целью оградить истинного виновника. Но почему же мы не должны верить утверждению Лоренца, что он не создал специальную теорию относительности?

Да и вообще, не звучит ли крайне странным стремление приписать какому-то автору приоритет, вопреки его мнению и желанию? И не является ли непонимание автором значения его труда лучшим указанием на тот факт, что труд этот далеко не был завершен?

В связи со сказанным вспоминаются два рассказика, имеющих под собой реальную почву. Но, поскольку я позабыл источники и детали, приведу их в форме анекдотов. Первый из них таков: «В своих воспоминаниях Гёте заметил, что больше всего в своей жизни он любил Гретхен; комментатор же собрания сочинений Гёте сделал к этому месту такое примечание: здесь Гёте ошибается, больше всего он любил Лизхен». Второй анекдот — совсем почти быль. «Некто физик А. в разговоре с физиком Б. заметил, что он получил основное уравнение квантовой механики — уравнение Шредингера — еще до Шредингера, но не стал публиковать статьи на этот счет, ибо не считал результат достаточно важным. На это Б. ответил: не советую Вам еще кому-либо рассказывать об этом, ибо не вывести уравнение Шредингера не стыдно, но вот действительно стыдно получить такой замечательный результат и совсем не понять его значения».

Шутки шутками, но ведь недаром говорят, что в каждой шутке есть доля правды. Так или иначе, я думаю, что при обсуждении приоритетных споров исторического характера, типа вопросов истории создания СТО, не мешает, дабы не потерять чувства меры, вспоминать некоторые шутки.

4. Об источнике научного знания

Надежно установлено, что одни и те же по существу научные результаты иногда получают совершенно независимо друг от друга разные люди. Классическим примером является построение неевклидовой геометрии. История создания СТО также являет собой не столь яркий, но в общем аналогичный пример (имеется в виду, скажем, параллелизм между некоторыми результатами Эйнштейна, с одной стороны, и Лоренца и Пуанкаре — с другой). Здесь мы имеем в виду не сроки, не даты поступления сообщений в печать. Разумеется, почти невероятно, чтобы и эти даты совпадали, да это и совершенно неважно в плане установления независимости открытия. И такая независимость довольно многих, по-видимому, поражает и удивляет. Одним из элементарных проявлений подобного удивления является как раз стремление во что бы то ни стало пайти какие-то связи, фактическую зависимость между разными авторами. Действительно, это же проще всего: получил точно такой же результат, значит, подглядел, как-то узнал о том, что сделал предшественник. Но, конечно, это в целом несерьезно.

Другая крайность (мне кажется, что слово «крайность» здесь подходит) заключается в привлечении какой-то иррациональности,

религии. Речь не идет о «боге с бородой» или с атрибутами официальных религий. Имеется в виду какой-то пантеизм или «космическая религия». Например, по словам Эйнштейна, «космическое религиозное чувство является сильнейшей и благороднейшей из пружин научного исследования. Только те, кто сможет по достоинству оценить чудовищные усилия и, кроме того, самоотверженность, без которых не могла бы появиться ни одна научная работа, открывающая новые пути, сумеют понять, каким сильным должно быть чувство, способное само по себе вызвать к жизни работу, столь далекую от обычной практической жизни».

С подобной точки зрения, видимо, именно одно и то же религиозное чувство внушает разным людям одни и те же идеи. Но подробнее и точнее объяснить эту концепцию я не могу, так как не вполне ее понимаю и не разделяю в той мере, в какой понимаю. Сколь угодно сильные чувства и страстное стремление выяснить истину, несомненно, могут не иметь ничего общего с религией. Что же касается близости идей, независимо возникающих у разных людей, то это вполне естественным образом объясняется теорией отражения: человек изучает природу, реальность и, следовательно, его построения и теории являются отражением этой реальности (материальной действительности). Нужно ли удивляться тому, что картины разных художников, если они даже совершенно независимо будут рисовать один и тот же портрет, предмет или пейзаж, окажутся в своей основе похожими одна на другую? Правда, художественное отображение может, и иногда с успехом, очень сильно удаляться от оригинала. В случае же науки требования к отражению значительно более строги — естественнонаучные теории контролируются опытом, математикой, логикой. Поэтому недостаточно точное отражение будет просто признано плохой теорией.

Итак, с такой хорошо известной читателям точки зрения источником научных знаний служит сама природа, не зависящая от нашего сознания действительность. Поэтому не видно трудностей принципиального характера при ответе на вопрос о причинах общности научных теорий, независимо создаваемых разными индивидами.

Та сторона проблемы, быть может, деталь, которая меня некоторое время беспокоила, заключается в следующем. Математики создают понятия и доказывают теоремы, казалось бы, относящиеся к чему-то, совершенно не связанному с реальным миром. Многомерные и функциональные пространства, различные неевклидовы геометрии и т. д. и т. п. — где же они реализуются, что отражают? То же самое можно, впрочем, спросить и об огромном многообразии тех физических теорий, которые явно не отвечают действительности, хотя и не встречают логических трудностей. Ответ, который меня более или менее удовлетворил, таков. Представим

себе гигантскую вычислительную машину. Запущенная в ход, такая машина способна построить, «выдать», сложнейшие математические конструкции, записанные в виде совокупности цифр или даже описанные словами. Так можно, в частности, смоделировать, как-то отразить особенности и свойства многомерных пространств и т. п. Но полученный «продукт» явно материален и ограничен его непосредственным источником — машиной. Человеческий мозг является признанным аналогом гигантской вычислительной машины (или наоборот, что в данном случае не важно). Таким образом, становится ясным, что все математические результаты, физические теории и все остальные продукты деятельности мозга — это в конечном счете какое-то отражение если не окружающего мира, то работы самого мозга, обусловленное и одновременно ограниченное его материальной сущностью.

Боюсь продолжать эти несколько доморощенные или, скорее, непрофессиональные рассуждения, да и нет в этом нужды. Но не хотелось совсем уклониться от обсуждения вопроса, который многих интересует, а кое-кого и волнует.

5. Наука и нравственность

Помимо физики и ее истории, настоящая статья оказалась посвященной и многому другому. Поэтому те читатели, которые вообще не прекратили ее чтения еще раньше, не удивятся и теме этого последнего раздела комментариев. Да и чему удивляться: и наука, и вопросы нравственности, морали тесно переплетаются, когда речь идет не о самом содержании науки, а об ее истории и истории ее создателей. Непосредственным же поводом написать этот раздел послужила анкета «XX век. Наука и общество», на которую «Литературная газета» просила ответить целый ряд советских и зарубежных ученых. Пункт 11 этой анкеты гласил: «Способствует ли само по себе занятие наукой воспитанию высоких нравственных качеств?»

Анкета проводилась около двух лет, но мои ответы появились в первой же подборке (3 сентября 1971 г.) и были даны независимо от каких-либо других и, так сказать, «с хода», без длительных размышлений. Ответ на вопрос № 11 был таков: «К сожалению, в пределах имеющихся у меня сведений нет никаких оснований утверждать, что занятие наукой способствует воспитанию высоких нравственных качеств. Вместе с тем такой вывод меня самого удивляет. Видимо, многие другие факторы значительно сильнее и раньше влияют на формирование личности, чем облагораживающее воздействие занятий наукой».

Некоторые другие ответы на тот же вопрос поражали своей разноречивостью. Вот часть одного из них: «... не могу вспомнить ни одного действительно выдающегося ученого, который бы отли-

чался низким уровнем моральных качеств». А вот часть другого ответа: «... крупный негодяй тоже может быть ученым, он может обладать волей, работоспособностью, интересом к познанию». Вообще вопрос № 11 оказался самым интересным, и я, во всяком случае, следил именно за ответами на этот вопрос. В номере «ЛГ» от 19 сентября 1973 г. был опубликован анализ ответов на анкету, проведенный целыми тремя секторами Института истории естествознания и техники АН СССР. И с некоторым удивлением я увидел, что мой ответ на вопрос № 11 был целиком перепечатан с таким резюме: «Ученый приходит к выводу, который во всех отношениях представляется более достоверным. Да, положительное влияние занятий наукой на нравственность ученого кажется весьма вероятным. Однако оно не может быть решающим. Научная работа — это лишь составляющая часть большого комплекса социальных условий, в которых существует человек. Именно этот комплекс, взятый как целое, и определяет нравственное лицо ученого».

Да, комплекс определяет нравственное лицо. Гений и злодейство совместимы. Но все-таки... Все-таки собственный ответ меня не удовлетворяет. Он справедлив только «в среднем», для массы научных работников. Но в науке среднее далеко не всегда характерно, ведь еще Галилей подчеркивал, что в вопросах науки мнение одного бывает дороже мнения тысячи. Поэтому о связи науки с нравственностью тоже можно и нужно судить не только (и, быть может, не столько) по средним «показателям», сколько на примере самых выдающихся представителей. А здесь картина изменяется. Дж. К. Максвелл, Г. А. Лоренц, М. Планк, А. Эйнштейн и Н. Бор — крупнейшие представители физики за целое столетие, были людьми с самыми высокими нравственными качествами. Одна из их характерных черт была выражена Эйнштейном, с присущей ему афористичностью, словами: «Честного человека надо уважать, даже если он разделяет другие взгляды». Должен добавить, что назвал лишь имена людей, о которых знаю достаточно много. Несомненно, список следовало бы расширить, и из физиков высшего ранга в него не попала бы, видимо, лишь сравнительно малая доля.

Таким образом, связь, и притом связь положительная, между запятием наукой и воспитанием нравственных качеств все же существует, но в прошлом она пробивала себе дорогу с большим трудом и поэтому проявлялась только статистически и в основном только тогда, когда занятие наукой было подлинным делом жизни, было высоким, всепоглощающим призванием. То же можно сказать и о настоящем. А что ждет наших потомков в будущем, какой ответ они дадут на вопрос № 11 в 2079 году?

Разумеется, на этот счет можно только гадать. Генетические изменения в человеческой породе за такое время, в течение трех-пяти поколений, не произойдут, если не думать об искусственном

вмешательстве, допустимость которого вызывает самые серьезные возражения. Речь идет поэтому об изменении социальных условий, существенная роль которых в данном случае несомненна. Обсуждать здесь эту большую проблему в целом нет возможности, да я и не считаю себя на это способным. Хотелось бы тем не менее указать на три частных, быть может второстепенных, момента, связанных с развитием науки.

Во-первых, общепризнанное быстрое повышение удельного веса науки в современном мире (несомненно, этот процесс будет продолжаться) должно, вероятно, укрепить и усилить облагораживающее воздействие занятия наукой или, если угодно, ослабить противоположное воздействие многих других факторов. Во-вторых, положительную роль может сыграть улучшение средств информации, их быстрота, не знающая барьеров, их всеобщность. В-третьих, существенно увеличение продолжительности человеческой жизни. Талант в физике и математике, да и во многих других областях проявляется рано. Совсем молодой человек способен быстро впитать уже известное и добиться самых выдающихся научных успехов. Напротив, социальный, жизненный опыт накапливается медленно, иногда слишком медленно. Человек многого не сделает повторно, если уж раз обжегся, заплатил за свой опыт дорогой ценой. Поэтому, как можно думать, удлинение жизни, повышение среднего возраста должно прямо или косвенно способствовать укреплению нравственности, причем это особенно резко проявится в научной среде.

Я далеко не уверен в своей правоте, быть может, отмеченное выше является лишь частностями и окажется несущественным на фоне других социальных процессов нашей бурной эпохи. Но каждый имеет право высказать свои предположения, особенно если они помогают ему верить в прогресс человечества.

Альберт Эйнштейн.
Собрание научных трудов
(в четырех томах)

Том I. Работы по теории относительности 1905 — 1920 гг.

Том II. Работы по теории относительности 1921 — 1955 гг.

Том III. Работы по кинетической теории, теории излучения и основам квантовой механики 1901 — 1905 гг.

Том IV. Статьи, рецензии, письма. Эволюция физики. — М.: Наука, 1965 — 1967 гг.

Завершено издание собрания научных трудов Альберта Эйнштейна. В составляющих это монументальное издание четырех томах около 2800 страниц и более 300 статей, заметок и других материалов, написанных великим физиком с 1900 по 1955 год — год его смерти.

Эйнштейну не пришлось посетить нашу страну, и он не знал русского языка. Тем не менее факт таков: русское издание подобного типа является первым в мировой литературе. Это обстоятельство, разумеется, не случайно, оно отражает уровень физики в СССР и наши достижения в области издания научной литературы. Вместе с тем нельзя не удивляться тому, что за много лет, прошедших после кончины Эйнштейна, собрание его трудов не издано ни на его родном немецком языке, ни на английском языке (последние 22 года своей жизни Эйнштейн провел в США, где и находится его архив).

Целесообразность издания трудов классиков естествознания нет нужды подчеркивать. Это и подавно излишне в данном случае, поскольку, согласно распространенному мнению, которое полностью разделяется рецензентом, Эйнштейн не только является величайшим физиком нашего века, но и в истории физики может быть сопоставлен по своей творческой мощи и достижениям только с Ньютоном.

Несомненно, однако, что труды классиков науки в большинстве случаев имеют исторический интерес. Кроме того, конечно, собрание научных трудов является человеческим документом. Если и не для всех, то, по крайней мере для специалистов в соответст-

вующей области, чтение сочинений классиков науки вполне сопоставимо с чтением мемуаров, литературной переписки и других документов, оставленных общественными деятелями и классиками литературы и искусства.

Все это, конечно, справедливо и в отношении трудов Эйнштейна, но в не меньшей мере значение их в другом — они актуальны. Две причины обуславливают такой, быть может, несколько неожиданный вывод. Первая причина очевидна — Эйнштейн почти что наш современник, все его работы принадлежат XX веку. Вторая причина более специфична и связана с содержанием и, можно сказать, исторической судьбой общей теории относительности. С одной стороны, общая теория относительности является величайшим достижением как самого Эйнштейна, так и в известном смысле всей теоретической физики. Но, с другой стороны, общая теория относительности в некотором отношении опередила свое время. В пределах Солнечной системы и даже всей нашей Галактики предсказываемые общей теорией относительности новые эффекты весьма малы, что обусловлено слабостью гравитационных полей (силу гравитационного поля можно, как известно, охарактеризовать параметром φ/c , где φ — ньютоновский потенциал тяготения, равный нулю «на бесконечности»; в пределах Солнечной системы $|\varphi|/c^2 \leq 2 \cdot 10^{-6}$). Отсюда проистекает и трудность проверки общей теории относительности и возможность все еще как-то оперировать с «конкурирующими» релятивистскими теориями тяготения. Здесь не место развивать эту тему (мнение рецензента о состоянии проверки общей теории относительности ясно, например, из его статьи, опубликованной в «Эйнштейновском сборнике 1967») *. Общая теория относительности начинает «работать в полную силу» в случае сильных полей тяготения, с которыми и приходится сталкиваться в космологии, а также в условиях гравитационного коллапса и для нейтронных звезд. В последние годы, в связи с успехами астрономии, весь этот круг проблем, объединяемый сейчас общим названием «релятивистская астрофизика», привлекает к себе пристальное внимание и является объектом многочисленных исследований. Внимание к общей теории относительности в различных ее аспектах сильно возросло в последнее время и вне непосредственной связи с развитием астрофизики. В результате общая теория относительности сегодня занимает и в физике, и особенно в астрономии значительно большее место, чем в прошлом.

Общая теория относительности есть вполне определенная теория гравитационного поля, в которой это поле полностью описывается метрическим тензором g_{ik} . Установленные Эйнштейном

*) О современном состоянии вопроса см. статью, помещенную на стр. 157 настоящего сборника.

(окончательно в 1915 г., а с учетом Λ -члена в 1917 г.) уравнения для g_{ik} — это как раз те уравнения, с которыми сейчас и оперируют. Насколько уравнения Эйнштейна однозначны и обязательны, как с ними работать, каков смысл различных понятий и образов, используемых в общей теории относительности, — вот с такими и многими другими вопросами сталкивается все большее число физиков, астрономов и математиков, занимающихся проблемами, в той или иной форме связанными с общей теорией относительности. Всякий, кто следит за литературой или присутствовал на семинарах и конференциях, знает, как много споров вызывают эти вопросы, сколько труда приходится тратить на их решение. Достаточно напомнить два примера недавнего прошлого: споры о самом существовании и характере гравитационного излучения, а также анализ гравитационного коллапса и решений в области «внутри» шварцшильдовской сферы.

Эти замечания побуждали затем, чтобы сформулировать основной тезис: собрание трудов Эйнштейна является и надолго останется ценнейшим источником для изучения общей теории относительности, понимания многих ее особенностей и типичных черт. Было бы, разумеется, нелепым противопоставлять эти труды хорошим учебникам, в которых излагается общая теория относительности. Речь идет о другом; работы Эйнштейна в области общей теории относительности при современном уровне преподавания и исследований в этой области остаются актуальными, представляют не только исторический интерес. Впрочем, как это обычно имеет место в отношении подлинно великих научных теорий, сохраняющих все свое значение в наши дни, в области общей теории относительности история и современность во многом вообще неотделимы друг от друга.

Каковы логические и физические основы теории? И, конкретно, каково значение принципа эквивалентности и принципа общей ковариантности для ее построения? Обойти эти вопросы не может никто из тех, кто излагает общую теорию относительности студентам. Без ответа на них понимание общей теории относительности может быть лишь формальным. Мнения же на этот счет существуют весьма различные. Сам Эйнштейн придавал принципу эквивалентности особое значение. В 1916 г. (Собрание трудов, т. I, стр. 505) он писал: «по моему разумению моя теория покоится исключительно на этом принципе». О том же пишет Эйнштейн и в 1918 г. (т. I, стр. 614). Насколько нам известно, Эйнштейн и в дальнейшем никогда не оставлял такого убеждения. В то же время существует мнение, согласно которому принцип эквивалентности лишь «выполнил важные обязанности повивальной бабки при рождении общей теории относительности. Я предлагаю похоронить повивальную бабушку с соответствующими почестями...» (Д. Синг. Общая теория относительности. — М.: ИЛ, 1963, с. 9). Более того, в лите-

ратуре высказывается мнение, что Эйнштейн неправильно понимал принцип эквивалентности, забывая об его локальном характере.

Обращаясь к работам Эйнштейна, мы не видим, однако, никаких оснований для подобного утверждения. Построение общей теории относительности, если опираться на литературные источники, было начато Эйнштейном в статье «О принципе относительности и его следствиях», опубликованной в 1907 г. (т. I, стр. 65). Можно надеяться, что не покажется излишним, если здесь будет приведен целиком § 17 из этой статьи, озаглавленный «Ускоренная система отсчета и гравитационное поле».

«До сих пор мы применяли принцип относительности, т. е. требование независимости законов природы от состояния движения системы отсчета, только к *н е у с к о р е н н ы м* системам отсчета. Можно ли представить себе, что принцип относительности выполняется и для систем, движущихся относительно друг друга с ускорением?»

Правда, пока еще нет возможности подробно обсуждать здесь этот вопрос. Но поскольку этот вопрос должен возникнуть перед каждым, кто следил за применениями принципа относительности до настоящего времени, я не могу не высказать здесь своего мнения на этот счет.

Рассмотрим две системы отсчета $\bar{\Sigma}_1$ и Σ_2 . Пусть Σ_1 движется с ускорением в направлении своей оси X , и пусть ее ускорение (постоянное во времени) равно γ . Предположим, что Σ_2 покоится, по находится в однородном гравитационном поле, которое сообщает всем телам ускорение $-\gamma$ в направлении оси X .

Как известно, физические законы относительно $\bar{\Sigma}_1$ не отличаются от законов, отнесенных к Σ_2 ; это связано с тем, что в гравитационном поле все тела ускоряются одинаково. Поэтому при современном состоянии наших знаний нет никаких оснований полагать, что системы отсчета Σ_1 и Σ_2 в каком-либо отношении отличаются друг от друга, и в дальнейшем мы будем предполагать полную физическую равноценность гравитационного поля и соответствующего ускорения системы отсчета.

Это предположение распространяет принцип относительности на случай равномерно ускоренного прямолинейного движения системы отсчета. Эвристическая ценность этого предположения состоит в том, что оно позволяет заменить однородное поле тяжести равномерно ускоренной системой отсчета, которая до известной степени поддается теоретическому рассмотрению.

Речь здесь идет об однородном гравитационном поле и равномерно ускоренной системе отсчета, но нет и намека на возможность «исключить» любое поле тяготения выбором системы отсчета. Кстати сказать, уже в этой работе Эйнштейн пришел к выводу о влиянии тяготения на ход часов и распространение света. Развивая эти идеи в статье 1911 г. (т. I, стр. 165), Эйнштейн повторяет формули-

ровку принципа эквивалентности и делает следующее замечание (т. I, стр. 166).

«Конечно, нельзя л ю б о е поле тяжести заменить состоянием движения системы без гравитационного поля, точно так же, как нельзя преобразовать все точки произвольно движущейся среды к покою посредством релятивистского преобразования».

Этот момент неоднократно подчеркивался Эйнштейном и в дальнейшем. Вот выдержка из статьи 1914 г. (т. I, стр. 285).

«Предварительно сделаем еще одно замечание для устранения напрашивающегося недоразумения. Странник обычной современной теории относительности с известным правом называет «кажущейся» скорость материальной точки. Именно, он может выбрать систему отсчета так, что материальная точка имеет в рассматриваемый момент скорость, равную нулю. Если же существует система материальных точек, которые обладают разными скоростями, то он уже не может ввести такую систему отсчета, чтобы скорости всех материальных точек относительно этой системы обращались в нуль. Аналогичным образом физик, стоящий на нашей точке зрения, может называть «кажущимся» гравитационное поле, поскольку соответствующим выбором ускорения системы отсчета он может достичь того, чтобы в определенной точке пространства-времени гравитационное поле обращалось в нуль. Однако примечательно, что обращение в нуль гравитационного поля посредством преобразования в общем случае не может быть достигнуто для протяженных гравитационных полей. Например, гравитационное поле Земли нельзя сделать равным нулю посредством выбора подходящей системы отсчета».

Наконец, в 1916 г. Эйнштейн опубликовал заметку (т. I, стр. 505) — ответ на критическую статью Ф. Котлера, в которой специально подчеркивается локальный характер принципа эквивалентности. Эйнштейн, в частности, пишет (т. I, стр. 506):

«Нельзя утверждать, что, если в системе K' существует п р о з в о л ь н о е гравитационное поле, то всегда найдется такая система K , по отношению к которой изолированная масса движется прямолинейно и равномерно, т. е. в которой нет никакого поля тяжести. Абсурдность такого утверждения очевидна. Например, если поле тяжести в системе K создается покоящейся материальной точкой, то это поле для всей области вокруг материальной точки невозможно исключить никакими преобразованиями системы координат. Никким образом нельзя также утверждать, что поле тяжести в какой-либо мере объясняется чисто кинематически: «кинематическое, нединамическое понимание гравитации» невозможно. Мы не можем получить л ю б о е гравитационное поле посредством простого ускорения одной галилеевой системы координат относительно другой, поскольку таким путем возможно получать поля только определенной структуры, которые, однако,

должны подчиняться тем же законам, что и все другие гравитационные поля. Это еще одна формулировка принципа эквивалентности (специально для применения этого принципа к гравитации)».

Можно надеяться, что уже приведенные выдержки не оставляют ни малейших сомнений в правильном понимании Эйнштейном принципа эквивалентности, как носящего локальный характер.

Совсем другое дело, необходим ли принцип эквивалентности для построения общей теории относительности. О необходимости в строгом смысле слова говорить здесь, конечно, не приходится. Общая теория относительности с формальной точки зрения сводится к уравнениям для g_{ik} , которые должны быть в применении к решению физических задач дополнены определенными высказываниями о граничных и начальных условиях, а также о смысле и методах измерения наблюдаемых величин. Не существует никакого однозначного ответа в отношении путей получения всей этой схемы. Если же она принята, то возможность введения в достаточно малой пространственно-временной области (в сопутствующей системе отсчета и в полях специального типа, например в стационарном поле, в ряде случаев достаточно требовать малости только пространственной области) локально-инерциальной системы отсчета без поля тяготения эквивалентна возможности считать в этой достаточно малой области или, формально, в бесконечно малой области, риманово пространство евклидовым. В этом отношении принцип эквивалентности автоматически содержится в общей теории относительности, разве что вместе с часто даже не оговариваемым предположением о достаточной «гладкости» функций $g_{ik}(x^l)$.

Наконец, необходим ли принцип эквивалентности для понимания общей теории относительности? Вряд ли можно дать уверенный ответ на подобные вопросы, в какой-то мере это дело вкуса. Но мнение рецензента в этом отношении, как и мнение многих других, целиком совпадает со взглядами Эйнштейна: принцип эквивалентности представляет собой подлинную физическую основу общей теории относительности. Действительно, как же иначе понять, почему поля тяготения нужно описывать именно с помощью метрического тензора g_{ik} , а не другими величинами? В частности, если не опираться на принцип эквивалентности, то самым естественным обобщением ньютоновской теории тяготения представляется скалярная релятивистская теория тяготения (поле тяготения в ней описывается скаляром ϕ). Именно с этого и начал сам Эйнштейн (см. т. II, стр. 404). Скалярная теория тяготения детально развивалась Нордстремом и была оставлена только после 1919 г., когда впервые наблюдалось отклонение световых лучей в поле Солнца (в скалярной теории отклонение лучей отсутствует). Более того, даже в наши дни Дикки и другие развивают тензорно-скалярную теорию и проверяют ее на опыте (напомним, что одной из научных сенсаций 1967 г. явилось как раз утверждение

о сплюснутости Солнца, которую Дикки ожидал, обосновывая тензорно-скалярную теорию; другое дело, что сплюснутость Солнца может объясняться и другими причинами *), и о подтверждении теории Дикки пока еще не может быть и речи). Правда, равенство инертной и тяжелой масс, а также гравитационное смещение частоты имеют место не только в общей теории относительности, но и, например, в скалярной и тензорно-скалярной теориях. Но основная идея общей теории относительности о связи и даже в известном смысле тождестве метрики и тяготения все равно представляется неотделимой от принципа эквивалентности и возникла только на его основе. Впрочем, об эвристическом значении этого принципа, о его роли в качестве «повивальной бабки», видимо, ни у кого нет сомнений. Предлагается лишь «похоронить» этот принцип при современном изложении и, следовательно, при преподавании общей теории относительности. Однако для того, кто знакомится с теорией, она в каком-то отношении рождается вновь. Тезис, защищаемый рецензентом, как раз в том и состоит, что использование принципа эквивалентности остается лучшим и даже единственным прочным фундаментом, на котором должно покоиться изложение общей теории относительности и в наши дни.

Меньшее значение имеет принцип общей ковариантности. Видимо, Эйнштейн на первом этапе переоценивал роль этого принципа. Но по крайней мере уже в 1918 г. он с полной ясностью подчеркнул математический характер принципа ковариантности (принципа «а» в цитируемой заметке; т. I, стр. 613). Вместе с тем этот принцип «приобретает значительную эвристическую силу, которая проявилась при решении гравитационных проблем и основана на следующем: из двух согласующихся с опытом теоретических систем предпочтение должно быть отдано той, которая проще и прозрачнее с точки зрения абсолютного дифференциального исчисления. Если гравитационной механике Ньютона придать форму ковариантных (четырёхмерных) уравнений, то легко убедиться, что принцип «а» практически (хотя и не вполне строго) исключает эту теорию!» (т. I, стр. 614).

Такое же мнение о принципе ковариантности Эйнштейн высказывал и в последующих статьях (т. II, стр. 344; т. IV, стр. 284). Вопрос о роли принципа ковариантности, видимо, достаточно широко обсуждался в физических кругах сразу же после создания общей теории относительности. Одно из свидетельств этого — известная монография В. Паули «Теория относительности», опубликованная в 1921 г. (русский перевод издан в 1947 г.). В § 52 книги В. Паули роль принципа ковариантности освещена, на наш

*) По-видимому, Солнце вообще не сплюснуто в той степени, как это предполагал Дикки (см. статью, помещенную на стр. 7 настоящего сборника).

взгляд, вполне правильно. Вместе с тем в своей рецензии на книгу Паули Эйнштейн горячо рекомендует ее читателям (т. IV, стр. 46).

Единственный принципиальный момент, который играл для Эйнштейна важную роль при построении теории и в отношении которого он был отчасти неправ, связан с относительностью инерции. Речь идет о предположении, что «инерция материальной точки полностью обусловлена воздействием всех остальных масс посредством некоторого рода взаимодействия с ними» (статья 1912 г.; т. I, стр. 225). В уже цитированной заметке 1918 г. (т. I, стр. 613) Эйнштейн называет такое требование принципом Маха. Но здесь же он замечает, что «необходимость придерживаться его (т. е. принципа Маха. — В. Г.) отнюдь не разделяется другими авторами, но я и сам считаю, что выполнение его необязательно». Необязательность принципа Маха Эйнштейн подчеркивал и ранее — в 1913 г. (т. I, стр. 296). Фактом является вместе с тем то, что принцип Маха казался тогда Эйнштейну весьма привлекательным. Между тем требование об относительности инерции и связанные с ним аргументы, фигурировавшие в ранних статьях Эйнштейна, чужды идеям теории поля. К сожалению, нам не удалось установить, когда это обстоятельство стало окончательно ясно самому Эйнштейну. Но оно, несомненно, стало ему ясно достаточно давно, упоминания о принципе Маха еще в двадцатые годы исчезли из его статей. Наконец, в «Автобиографических заметках», написанных на 68 году жизни, т. е. в 1946 или 1947 г., Эйнштейн писал (т. IV, стр. 268):

«По мнению Маха, в действительно рациональной теории инертность должна, подобно другим ньютоновским силам, происходить от взаимодействия масс. Это мнение я долгое время считал в принципе правильным. Оно неявным образом предполагает, однако, что теория, на которой все основано, должна принадлежать тому же общему типу, как и ньютонова механика: основными понятиями в ней должны служить массы и взаимодействия между ними. Между тем нетрудно видеть, что такая попытка решения не вяжется с духом теории поля».

Впрочем, принципу Маха можно придать форму, в которой он согласуется с теорией поля. Именно это сделано в уже цитированной статье Эйнштейна 1918 г., где принцип Маха формулируется так: « G -поле (т. е. поле g_{ik} . — В. Г.) полностью определяется массами тел» (т. I, стр. 613). Затем Эйнштейн указывает, что принцип Маха «тесно связан с вопросом пространственно-временной структуры мира как целого, так как в порождении G -поля принимают участие все массы (т. I, стр. 614). Фактически уравнения Эйнштейна для поля g_{ik} как с Λ -членом, так и без него, принципу Маха в приведенной формулировке не удовлетворяют. Вместе с тем в литературе и до сих пор ведется дискуссия о принципе Маха, его смысле, возможных формулировках и т. п.

Спросим теперь, правильно ли с точки зрения уровня современной физики понимал Эйнштейн созданную им общую теорию относительности? На первый взгляд сама постановка такого вопроса может шокировать. Но фактически этот вопрос обсуждается в различных статьях и монографиях и в принципе является вполне законным. В истории физики известны примеры того, когда авторы замечательных открытий не понимали или не вполне понимали их истинное содержание. Например, де Бройль и Шредингер ввели и оперировали Ψ -функцией, но не знали, каков ее подлинный смысл. Таким образом, вопрос о понимании теории ее автором имеет смысл и дело здесь в конкретно-историческом анализе, а не в предвзятых мнениях. Нужно, однако, помнить, что многие дискуссии являются в основном результатом недостаточно четкого или двусмысленного определения предмета спора. Так может произойти и в отношении ответа на вопрос, правильно ли понимал Эйнштейн свою теорию. Никакого «абсолютно правильного» понимания не существует, и нам представляется, что автора фундаментальной теории можно считать непонявшим ее только в том случае, если он ошибался или заблуждался в понимании либо математической структуры теории (уравнения, условия при их решении и т. п.), либо смысла входящих в теорию величин. Последнее (конкретно, непонимание смысла Ψ -функции) имело место в отношении создателей волновой механики. Очевидно, при принятом выше определении, о непонимании Эйнштейном общей теории относительности вряд ли приходится даже и говорить. Поэтому и дискуссия может идти и на самом деле идет о другом — истоках теории, роли принципов эквивалентности и общей ковариантности и т. п. По нашему убеждению, которое подкрепляется уже хотя бы сказанным выше, Эйнштейна никак нельзя упрекнуть в непонимании его теории и при таком расширенном и не вполне определенном подходе к вопросу. Но существует и другое мнение, с которым можно познакомиться в монографии В. А. Фока «Теория пространства, времени и тяготения» (Физматгиз, 1961). В частности, на стр. 497 этой монографии высказывается точка зрения, согласно которой «теория тяготения не была правильно понята ее автором». Каждый интересующийся основами общей теории относительности сам сможет определить свою позицию в этом вопросе, обратившись к трудам Эйнштейна — теперь они доступны всем, знающим русский язык.

Подчеркивая выше глубину понимания Эйнштейном теории гравитационного поля, мы вовсе не собираемся, вместе с тем, канонизировать его взгляды как по этому, так и по каким-либо другим вопросам. Подобная канонизация чужда духу науки, всему подходу к ней в первую очередь самого Эйнштейна. Не приходится сомневаться в том, что за полстолетия, протекших после установления Эйнштейном его уравнений для g_{ik} -поля,

теория развивалась, а ряд ее аспектов оказался лучше понятным. Можно спорить и о том, как излагать и называть теорию Эйнштейна. Оба вопроса не представляются принципиальными. Поэтому отметим лишь, что название «общая теория относительности» возникло естественным образом (см. т. I и, в частности, приведенные выше цитаты). Термин «теория гравитационного поля», которым часто (начиная с 1907 г.) пользовался и сам Эйнштейн, в известном отношении точнее и правильнее, чем название «общая теория относительности». Но даже это не вполне верно, поскольку существуют и до сих пор обсуждаются в литературе несколько теорий гравитационного поля. Если же говорят «общая теория относительности», то сразу ясно, что речь идет о вполне конкретной теории — эйнштейновской теории гравитационного поля. Мы уже не упоминаем об аргументах исторического и практического характера, делающих замену названия, которое Эйнштейн дал своей теории, и ненужной, и неосуществимой.

Общая теория относительности — вершина научного творчества Эйнштейна. Поэтому, а также по другим упоминавшимся причинам, на ней выше и было сконцентрировано внимание. Вместе с тем имя Эйнштейна в науке навсегда будет связано и с достижениями фундаментального значения, выполненными им еще в трех областях: частной (специальной) теории относительности, квантовой теории излучения и, выражаясь старомодно, в области молекулярной теории теплоты (броуновское движение, квантовая теория теплоемкости газов и твердых тел, рассеяние света в жидкостях, квантовая статистика идеального газа и др.). Все эти вопросы теперь излагаются в учебниках, и в отношении их понимания особых проблем не возникает. Тем не менее многое в этих работах Эйнштейна остается интересным и поучительным не только в плане историческом, но и в качестве образца при использовании методов и техники теоретической физики. Эйнштейн обычно идет к цели таким путем, который, после того как он известен, представляется самым простым, экономным и естественным. В качестве примера, одного из многих, можно привести опубликованные в 1916 и 1917 гг. статьи 43 и 44, т. III, посвященные квантовой теории излучения. Введенные здесь коэффициенты Эйнштейна A_m^n , B_n^n и B_m^n , определяющие вероятность спонтанного излучения, индуцированного излучения и поглощения, и сейчас широко используются в оптической и радиоспектроскопии, астрофизике и квантовой электронике. Если опираться только на работы Эйнштейна, то известное утверждение — «все гениальное просто» — можно было бы считать доказанным.

Несмотря на то, что рецензия уже вышла по объему за обычные рамки такого жанра, нам удалось, да и то бегло, затронуть лишь небольшую часть вопросов, которые возникают при чтении работ Эйнштейна. Трудно найти сочинения более интересные и поучи-

тельные для физика. Этому способствует, конечно, и блестящий литературный стиль Эйнштейна.

Свою лекцию, посвященную истории возникновения общей теории относительности, Эйнштейн закончил словами (т. II, стр. 406):

«В свете уже достигнутых результатов счастливо найденное кажется почти само собой разумеющимся, и любой толковый студент усваивает теорию без большого труда. Позади остались долгие годы поисков в темноте, полных предчувствий, напряженное ожидание, чередование надежд и изнеможения и, наконец, прорыв к ясности. Но это поймет только тот, кто пережил все сам».

Да позволено¹ будет не вполне согласиться с последним замечанием. Собрание трудов Эйнштейна как раз и дает возможность многим, особенно молодежи, многое понять и пережить.

Остановимся в заключение на вопросах, касающихся самого издания трудов. Задача редакторов явно была весьма сложной. Помещать ли статью, посвященную анализу творчества и биографии Эйнштейна? Как расположить статьи и какие из них отобрать? Какими должны быть редакционные комментарии? В целом, как нам представляется, все эти задачи решены правильно и хорошо (мы уже не говорим о таких достоинствах издания, как высококачественный перевод и большое количество фотографий, помещенных в конце т. IV). Например, отсутствие обычной для собрания трудов большой вводной или заключительной статьи вполне понятно. Об Эйнштейне и его работах написано так много, содержание и стиль его работ таковы, что упомянутая статья была бы уместна только в случае ее чрезвычайно высокого качества или оригинальности. Но такую статью трудно запланировать и заказать, подобные статьи — редчайшее исключение. Вполне оправдано и расположение материала, при котором в первых двух томах сконцентрированы работы по теории относительности. Следует лишь предупредить читателей, что некоторый материал на этот счет содержится также в томе IV.

Наконец, представляется правильной большая скупость, проявленная в отношении комментариев. Комментарии могут быть нескончаемыми, сделать их бесспорными очень трудно. В качестве иллюстрации этого, быть может, странного тезиса заметим, что даже в имеющихся комментариях при их весьма беглом просмотре замечены неточности. В примечании на стр. 266 (т. I) утверждается, что Эйнштейн окончательно установил свое уравнение тяготения в 1916 г., в то время как это было сделано в 1915 г. (статья 37, т. I). На стр. 352 и 399, т. II в примечаниях приводятся совсем несовременные значения для постоянной Хаббла и «времени особенности», хотя эти данные и именуются современными. Касающееся работ Фридмана примечание на стр. 119, т. II, также представляется нам не вполне удачным. Фридман показал, что существуют неста-

ционные решения для однородной и изотропной Вселенной и при отсутствии Λ -члена. Но никаких убедительных аргументов против возможности использовать Λ -член ни он, ни кто другой не выдвигал. Многие космологи, и в первую очередь Леметр, всегда пользовались уравнениями с Λ -членом. В 1967 г. выяснилось, что вопрос о роли Λ -члена весьма актуален и, быть может, будет решен в близком будущем путем наблюдений.

Заметим также, что расположение некоторых статей представляется неудачным. Так, статья 43, т. 1, помещена среди статей 1917 г., но в ней имеются разделы, написанные несколькими годами позже. То же касается статьи 33, т. I, помещенной среди статей 1915 г., хотя в ней упоминается о результатах наблюдения солнечного затмения в 1919 г. Дело здесь в том, что обе эти статьи дополнялись и перерабатывались автором, причем перевод осуществлен не с первого издания. Правильнее было бы отнести эти статьи, хотя и с оговорками, но к более позднему периоду. Наконец, представляется спорным включение в рецензируемое собрание трудов, которое отнюдь не является полным «академическим» изданием, целого ряда материалов. Это относится к написанному кем-то другим изложению доклада Эйнштейна (статья 68, т. III), записи беседы (статья 36, т. IV) и к ряду рецензий и заметок в т. IV.

Отмеченные недостатки отнюдь не играют роли ложки дегтя в бочке меда, они действительно второстепенны. Но рецензент обязан останавливаться на подобных моментах. К тому же предстоит издание ряда других собраний трудов физиков и опыт издания трудов Эйнштейна нужно использовать. В целом этот опыт — большая удача и заслуга редакции, переводчиков и работников издательства. Нисколько не умаляя роли всего коллектива, представляется справедливым особо подчеркнуть вклад, внесенный Н. А. Смородинским. Советские физики знают, что он в течение многих лет отдавал собиранию и редактированию трудов Эйнштейна много сил, и делал это с любовью, без которой успешно решить поставленную задачу не удалось бы.

В собрании научных трудов Эйнштейна отсутствуют, естественно, многие его ненаучные статьи. Нет здесь, за одним исключением (письма к М. Соловицу), и многочисленных писем Эйнштейна. Тем не менее, в настоящем собрании, особенно в т. IV, имеется немало материалов, позволяющих увидеть и понять все величие Эйнштейна не только как гениального физика, но и как человека. Особенно впечатляющими нам показались речи и заметки Эйнштейна, посвященные Максиму Планку (статьи 12, 50 и 74, том IV). Последняя из этих статей — некролог (1948 г.) и начинается она так:

«Человек, которому было суждено одарить мир великой созидательной идеей, не нуждается в похвале потомства. Его творчество даровало ему более значительное благо.

Вместе с тем хорошо — и это было необходимо, — что представители тех, кто борется за истину и знания, собрались сегодня здесь со всех четырех сторон света. Они присутствуют здесь, чтобы доказать, что даже в такие времена, как наши, когда политические страсти и грубая сила нависают, как меч, над головами людей, полных тревоги и страха, знамя идеала нашего поиска истины держится высоко и в чистоте. Этот идеал — вечная связь, объединяющая ученых всех времен и народов, — на редкость совершенно отражен в личности Макса Планка».

Идеал, о котором упоминает здесь Эйнштейн, на редкость совершенно отражен и прежде всего в нем самом.

Никогда не появится надгробный памятник на могиле Эйнштейна, ибо не существует и самой этой могилы — по завещанию Эйнштейна его прах был развеян по ветру. Но Эйнштейн сам воздвиг себе грандиозный памятник своими трудами, к ним обращаются и всегда будут обращаться физики и астрономы во всем мире.

Об экспериментальной проверке общей теории относительности

Опыт никогда не скажет теории «да», но говорит в лучшем случае «может быть», большей же частью — просто «нет». Когда опыт согласуется с теорией, для нее это означает «может быть»; когда же он противоречит ей, объявляется приговор: «нет».

А. ЭЙНШТЕЙН [1]

1. Всякая физическая теория нуждается в контроле и проверке на опыте — путем наблюдений и экспериментов. Это утверждение в наше время настолько глубоко осознано и отвечает повседневной практике физиков, что обычно даже представляется более простым, чем является в действительности. Дело в том, что при проверке теории какого-либо эффекта и, вообще, когда речь идет о каких-то частных вопросах, могут возникнуть те или иные трудности, но, как правило, не приходится задумываться о принципах. Картина уже иная при экспериментальной проверке фундаментальных теорий и представлений таких, как частная и общая теории относительности и нерелятивистская квантовая механика. Проблема экспериментальной проверки подобных теорий — это, вместе с тем, вопросы о границах их применимости, степени полноты *)

*) Под полнотой теории понимается способность ответить на любой правильно поставленный вопрос, относящийся к области ее применимости. Так, хорошо известная дискуссия о полноте нерелятивистской квантовой механики связана с возможностью (или невозможностью) отказа от вероятностных предсказаний. Согласно общепринятой точке зрения (отдельные исключения, все более редкие, не дают оснований отказаться от такой характеристики ситуации) нерелятивистская квантовая механика полна в том смысле, что в принципе даст в своей области ответ на любой вопрос, находящийся в соответствии с физической реальностью. Указать же, например, «куда падает» каждый отдельный электрон в дифракционных опытах, теория не может не в силу своей неполноты, а вследствие неклассической природы микроробъектов (электронов). Мы не можем, конечно, развивать здесь эту тему (мнение автора по этому поводу см. в [2]).

и т. д. Здесь затрагивается сам фундамент физики и, естественно, анализ содержания и задач экспериментальной проверки требует особенно тщательного подхода.

Чтобы не уделять слишком много места общим рассуждениям, остановимся на одной характерной черте, особенно вышукло выступающей при сопоставлении фундаментальных теорий с опытом. Мы имеем в виду глубокую асимметрию, существующую в отношении опровержения теории и ее подтверждения. Именно этот момент отражен в словах Эйнштейна, приведенных в качестве эпиграфа к настоящей статье. В самом деле, любое несоответствие между выводами из фундаментальной теории и опытом (разумеется, имеются в виду вполне строгие и определенные предсказания теории и достаточно надежный эксперимент) опровергает теорию или, во всяком случае, указывает на ее ограниченность. Напротив, согласие того или иного предсказания теории с опытом еще отнюдь не доказывает, что именно данная теория справедлива. Во-первых, о согласии теории с опытом можно говорить лишь с учетом точности наблюдений и экспериментов. Во-вторых, и это не столь тривиально, один и тот же результат (эффект и т. п.) может следовать из разных теорий. Классическим примером здесь может служить формула для уровней энергии в атоме водорода, получающаяся без учета релятивистских поправок и спина. Эта формула, найденная Н. Бором с помощью его правила квантования за десятилетие до создания квантовой механики, в точности совпадает с квантовомеханической формулой, хотя квантовая теория Бора отнюдь не тождественна квантовой механике.

Таким образом, утверждать, что фундаментальная теория проверена, а тем более доказана на опыте, в строгом смысле, крайне нелегко. Фактически физика развивается не ожидая каких-либо строгих доказательств, и такой подход, такая стратегия, вполне естественны и оправданы. Если оставшаяся где-то в тылу проблема или неясность не «рассосутся» сами собой со временем и окажутся подлинно важными, к ним вернуться. Впрочем, какая-то категория физиков (мы, конечно, говорим здесь только о физиках лишь для определенности) проявляет интерес в первую очередь именно к методическим и логическим вопросам, в силу чего прогресс в области анализа фундамента физических теорий, их связи с экспериментом и т. п. все время продолжается даже при отсутствии драматических событий типа «опровергающих основы» новых экспериментов.

Именно так в целом обстоит дело в отношении экспериментальной проверки частной теории относительности и нерелятивистской квантовой теории. Эти теории лежат в основе всей физики, их следствия крайне многочисленны и разнообразны, ни с какими противоречиями они не сталкиваются. Поэтому и проблема экспериментальной проверки указанных теорий считается, по существу,

решенной и, во всяком случае, она не актуальна. Лучшим доказательством здесь является практика — в физической литературе (а она сейчас огромна, как и число физиков) вопросы об экспериментальной проверке и обосновании (анализе основ) частной теории относительности и квантовой механики встречаются весьма редко, особенно в плане каких-то сомнений в справедливости основ и т. п. *).

В случае общей теории относительности (ОТО), хотя она «старше» нерелятивистской квантовой механики на целое десятилетие, сложилась иная ситуация. Экспериментальная проверка ОТО остается актуальной задачей современной физики и астрономии. В качестве доказательства (а как еще доказывать подобные утверждения?) можно сослаться на содержание физических и астрономических журналов и книг (см., в частности, последние обзоры в УФН [4, 5]).

В настоящей статье мы постараемся осветить состояние экспериментальной проверки ОТО, по не в плане детального изложения имеющихся данных и проектов новых экспериментов [4, 5], а с целью дать общую картину современной ситуации.

2. Основы ОТО, включая вывод и обсуждение формул для ряда наблюдаемых эффектов, изложены в большом числе доступных курсов и монографий (см. в особенности [6—9]). Тем не менее здесь также представляется необходимым хотя бы кратко привести и прокомментировать ряд выражений и формул.

ОТО представляет собой теорию гравитационного поля, в которой это поле полностью описывается метрическим тензором $g_{ik}(x^i)$, определяющим квадрат интервала

$$ds^2 = g_{ik} dx^i dx^k, \quad (1)$$

где x^1, x^2, x^3 — в широких пределах произвольные пространственные координаты и $x^0 = ct$ — временная координата; в инерциальной (галилеевой) системе отсчета (если она существует) при использовании декартовых координат

$$g_{00} = 1, g_{11} = g_{22} = g_{33} = -1, g_{ik} = 0 \text{ при } i \neq k \quad (2)$$

(иногда выбирают другие знаки при g_{00} и g_{ik}).

*) Не хотелось бы, чтобы эти замечания были восприняты как негативное отношение к исследованиям, посвященным истории, анализу путей и методов измерений, логическим основам и экспериментальной проверке частной теории относительности и квантовой механики. Напротив, удивляет, сколько часто приходится при обсуждении этих «основ» все еще сталкиваться с неясностями и особенно отсутствием понимания и интереса у широких кругов физиков. Представляется, однако, что обсуждение основ частной теории относительности и квантовой механики, подобно обсуждению основ классической механики, перешло уже в области методологии и истории физики. В качестве интересного примера анализа вопроса об экспериментальной проверке частной теории относительности укажем на статью [3].

Поле $g_{ik}(x^l)$ подчиняется уравнениям Эйнштейна

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = \frac{8\pi G}{c^2} T_{ik}. \quad (3)$$

Здесь $R_{ik} = R^l{}_{ilk}$ — тензор Риччи, $R^l{}_{iklm}$ — тензор кривизны (тензор Римана), $R = g^{ik} R_{ik}$ — скалярная кривизна, T_{ik} — тензор энергии-импульса вещества (включая все поля, кроме гравитационного) и $G = 6,670 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$ — гравитационная постоянная; тензор $R^l{}_{iklm}$, а следовательно, тензор \tilde{R}_{ik} и скаляр R выражаются через g_{ik} , $\partial g_{ik}/\partial x^l$ и $\partial^2 g_{ik}/\partial x^l \partial x^m$, причем вторые производные g_{ik} входят линейным образом. Поскольку четыре координаты x^l можно подвергнуть преобразованию, отвечающему различному выбору системы координат, 4 из 10 компонент g_{ik} можно считать произвольными; таким образом, независимыми являются 6 компонент тензора g_{ik} и уравнения Эйнштейна служат для их определения.

В 1917 г., через два года после установления уравнений (3), Эйнштейн их обобщил [10] путем добавления к правой части уравнения так называемого Λ -члена, равного Λg_{ik} . Введение такого члена (и только его) не противоречит общим требованиям, приводящим к уравнениям (3), но в нерелятивистском пределе ведет к некоторому обобщению ньютоновской теории тяготения. Кроме того, если космологическая постоянная достаточно мала, как это вытекает из космологических соображений [11], то она не играет никакой роли не только в слабых полях (в частности, в пределах Солнечной системы), но и в случае «черных дыр». Космологии же, где Λ -член вполне может оказаться существенным*), мы здесь касаться не будем и ниже положим $\Lambda = 0$.

В слабом гравитационном поле (а это значит, что компоненты g_{ik} можно считать близкими к галилеевым значениям (2)) можно положить $g_{00} = 1 + 2\varphi/c^2$, $T_0^0 = \rho c^2$ (ρ — плотность массы), и для вводимого таким путем скалярного гравитационного потенциала φ из (3) вытекает уравнение ньютоновской теории тяготения

$$\Delta\varphi = 4\pi G\rho. \quad (4)$$

Как ясно из сказанного, условие применимости этого (ньютоновского) приближения и вместе с тем условие слабости поля имеет вид

$$|\varphi|/c^2 \ll 1. \quad (5)$$

*) Об этом см. статью, помещенную на стр. 62 настоящего сборника. Долгие годы шли споры о том, следует или нет учитывать Λ -член даже в космологии. Автор был в числе тех, кто никогда не видел оснований пренебрегать этим членом, а в настоящее время такое мнение общепринято (см. [11—13]).

На поверхности Солнца

$$\frac{|\Phi_{\odot}|}{c^2} = \frac{GM_{\odot}}{r_{\odot}c^2} = \frac{r_{g\odot}}{2r_{\odot}} = 2,12 \cdot 10^{-6}. \quad r_{g\odot} = \frac{2GM_{\odot}}{c^2} = 2,94 \cdot 10^5 \text{ см}, \quad (6)$$

поскольку масса Солнца $M_{\odot} = 1,99 \cdot 10^{33}$ г и радиус солнечной фотосферы $r_{\odot} = 6,96 \cdot 10^{10}$ см.

Введенная в (6) величина

$$r_g = 2GM/c^2 \approx 3 \cdot 10^5 (M/M_{\odot}) \text{ см} \quad (7)$$

называется гравитационным радиусом. Для Земли (на ее поверхности)

$$|\Phi_{\oplus}|/c^2 = GM_{\oplus}/r_{\oplus}c^2 = 7 \cdot 10^{-10}, \quad M_{\oplus} = 5,98 \cdot 10^{27} \text{ г}, \quad (8)$$

$$r_{g\oplus} = 6,37 \cdot 10^8 \text{ см}, \quad r_{g\oplus} = 0,86 \text{ см}.$$

Для круговой орбиты планеты $|\Phi|/c^2 = v^2/c^2$, где v — скорость планеты; для земной орбиты $|\Phi|/c^2 \approx 10^{-8}$, поскольку $v = 3 \cdot 10^6$ см/с.

С ростом массы тела и уменьшением его радиуса потенциал $|\Phi|$ возрастает и поле может стать сильным. Для сферически-симметричной (и невращающейся) массы метрика вне массы имеет вид (решение Шварцшильда, 1916 г.)

$$ds^2 = \left(1 - \frac{r_g}{r}\right) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{1 - r_g/r} - r^2 (\sin^2 \theta d\varphi^2 + d\theta^2). \quad (9)$$

Здесь используются «сферические» пространственные координаты r , θ и φ (в этих координатах длина окружности с центром в центре массы равна $2\pi r$). Применяются также другие координаты и в особенности «изотропные сферические» координаты ρ , θ , φ , причем $r = \rho (1 + r_g/4\rho)^2$ и

$$ds^2 = \left(\frac{1 - r_g/4\rho}{1 + r_g/4\rho}\right)^2 c^2 dt^2 - \left(1 + \frac{r_g}{4\rho}\right)^4 [d\rho^2 + \rho^2 (\sin^2 \theta d\varphi^2 + d\theta^2)]. \quad (10)$$

В приближении слабого поля (разложение по $r_g/r \ll 1$ или по $r_g/4\rho \ll 1$)

$$ds^2 = (1 - r_g/r) c^2 dt^2 -$$

$$- (1 + r_g/r + \dots) dr^2 - r^2 (\sin^2 \theta d\varphi^2 + d\theta^2),$$

$$ds^2 = (1 - r_g/\rho + r^2/2\rho^2 + \dots) c^2 dt^2 -$$

$$- (1 + r_g/\rho + \dots) [d\rho^2 + \rho^2 (\sin^2 \theta d\varphi^2 + d\theta^2)]. \quad (11)$$

При проверке ОТО в слабых полях широко применяется такой прием: используются выражения (11), но с введенными в них произвольными безразмерными коэффициентами α , β , γ , ... т. е.

выражения

$$ds^2 = \left(1 - \frac{\alpha r_g}{r} + \frac{\beta - \alpha \gamma}{2} \frac{r_g^2}{r^2} + \dots\right) c^2 dt^2 - \left(1 + \frac{\gamma r_g}{r} + \dots\right) dr^2 - r^2 (\sin^2 \theta d\varphi^2 + d\theta^2), \quad (12)$$

$$ds^2 = \left(1 - \frac{\alpha r_g}{\rho} + \frac{\beta r_g^2}{2\rho^2} + \dots\right) c^2 dt^2 - \left(1 + \frac{\gamma r_g}{\rho} + \dots\right) [d\rho^2 + \rho^2 (\sin^2 \theta d\varphi^2 + d\theta^2)].$$

В ОТО

$$\alpha = \beta = \gamma = 1. \quad (13)$$

В других, отличных от ОТО теориях гравитационного поля те или иные значения α , β , γ и других вводимых коэффициентов могут отличаться от значений, вытекающих из ОТО (в пост-ньютоновском приближении для произвольного, а не только сферически-симметричного гравитационного поля вводят около десятка таких коэффициентов, большинство из которых удобно выбрать так, чтобы в ОТО они равнялись нулю; см. в особенности [9]) *). Впрочем, масса тела M определяется по его ньютоновскому потенциалу $\varphi = -GM/r$ или ускорению $\mathbf{g} = -\nabla\varphi - \frac{GM}{r^2} \mathbf{r}$ пробного тела; если же $\alpha \neq 1$, то потенциал равнялся бы $\varphi = -\alpha GM/r$ (см. (7), (12)). Поскольку определить массу M каким-либо другим путем (помимо измерения ускорения \mathbf{g}) не представляется возможным, следует сразу положить $\alpha = 1$ (так мы и поступим).

3. Экспериментальная проверка ОТО проводится в двух, хотя и не резко разграниченных, направлениях. Первое из них связано с основами теории, ее предпосылками. Второе направление — проверка следствий ОТО и, в частности, на формальном языке, проверка справедливости равенств (13). Отмеченная выше асимметрия, характеризующая пути проверки физической теории, побуждает считать первое направление во всяком случае не менее значительным, чем второе. Конкретно, это относится раньше всего к принципу эквивалентности, на котором базируется ОТО **).

*) Из (13) ясно некоторое преимущество второй из форм (12) для квадрата интервала, поскольку в случае справедливости ОТО $(\beta - \alpha\gamma) = 0$ и член типа $(r_g/r)^2$ в (12) равен нулю.

**) «По моему разумению, моя теория покоится исключительно на этом принципе» — таково мнение Эйнштейна, который, кроме того, считал проверку принципа эквивалентности более важной, чем следствий ОТО (речь идет о рассматриваемых ниже эффектах ОТО в слабом поле). Чтобы не загромождать изложение, не будем здесь давать ссылок на соответствующие работы Эйнштейна, тем более, что они легко доступны (см. *А. Эйнштейн. Собрание научных трудов.* — М.: Наука, 1965—1967) и, кроме того, широко цитируется в других статьях сборника. Что касается экспериментальной проверки

Согласно этому принципу в достаточно малой пространственно-временной области (в «лифте») действие поля тяжести неотличимо от ускорения системы отсчета. Из ОТО, если ее принять, принцип эквивалентности следует самым непосредственным образом и имеет такой же смысл, как утверждение о возможности в достаточно малой области вблизи точки на кривой или на поверхности заменить эту кривую (или поверхность) касательной (или касательной плоскостью). Отсюда ясно, что любое нарушение принципа эквивалентности свидетельствовало бы о несправедливости ОТО в меру этого нарушения, т. е., во всяком случае, указывало бы на границы применимости ОТО. Обратное же, конечно, неверно, поскольку принцип эквивалентности может строго, а тем более приближенно, соблюдаться и в неэйнштейновских теориях гравитационного поля.

В общем, вполне понятно и оправдано то внимание, которое уделяется проверке равенства инертной и тяжелой масс $m_{\text{и}}$ и $m_{\text{т}}$, вытекающего из принципа эквивалентности*). По определению массы $m_{\text{и}}$ и $m_{\text{т}}$ входят в ньютоновский закон динамики $m_{\text{и}}\ddot{\mathbf{r}} = -m_{\text{т}}\nabla\varphi$ для материальной «точки», находящейся в гравитационном поле (потенциал φ). Следовательно, в случае равенства $m_{\text{и}} = m_{\text{т}}$ все тела должны в поле тяжести двигаться («падать») с совершенно одинаковым ускорением $\ddot{\mathbf{r}} \equiv \mathbf{g} = -\nabla\varphi$. Со времен Галилея именно этот факт и проверяется со все возрастающей точностью. В начале 20-х годов были опубликованы результаты последних опытов Этвеша с сотрудниками, указывавших на равенство $m_{\text{и}} = m_{\text{т}}$ с точностью 10^{-9} (был сделан вывод, что отношение $m_{\text{и}}/m_{\text{т}}$ для дерева и платины отличается менее чем на 10^{-9}). В 1964 г. была достигнута [16] уже точность 10^{-11} и, наконец, в 1971 г. опубликованы лучшие из известных измерений [17], свидетельствующие о равенстве отношения $m_{\text{и}}/m_{\text{т}}$ для платины и алюминия с точностью не меньшей $1 \cdot 10^{-12}$. Для указанных весьма различных материалов вклады сильного и электромагнитного взаимодействия в собственную энергию (а значит, и инертную массу) достаточно велики, чтобы при несоблюдении равенства $m_{\text{и}} = m_{\text{т}}$ сказаться на проведенных экспериментах. Учет слабого взаимодействия, если бы оно вносило вклад только в $m_{\text{и}}$ (но не в $m_{\text{т}}$), привел бы в опытах [17] к эффекту порядка $2 \cdot 10^{-10}$, и, следовательно, эти опыты с точностью 0,5% (см. [5], а также [55]) ука-

ОТО, то мы будем базироваться на обзоре [5], где приведен большой список литературы последнего периода. Ссылки на более старые работы можно найти в [14, 15], где состояние проверки ОТО освещено соответственно на 1955 и на 1966 гг.

*) В историческом плане, конечно, ситуация была другой — принцип эквивалентности был сформулирован Эйнштейном (в 1907 г.) как обобщение известного уже тогда со значительной точностью (опыты Этвеша) равенства

$$m_{\text{и}} = m_{\text{т}}$$

зывают на соблюдение принципа эквивалентности для слабых взаимодействий.

По ряду причин особенно важно ответить на вопрос о вкладе в массы $m_{\text{и}}$ и $m_{\text{т}}$ гравитационного взаимодействия (не говоря уже о том, что гравитационное взаимодействие является самым слабым из известных, в рамках ОТО равенство $m_{\text{и}} = m_{\text{т}}$ безусловно должно сохраняться и при учете гравитации). Отношение энергии гравитационного взаимодействия $E \sim Gm^2/a$ (речь идет о теле радиуса a , имеющего массу m) к энергии покоя mc^2 составляет (полагаем, что плотность тела $\rho \sim 5$)

$$\Delta \sim Gm/c^2 a \sim r_g a \sim 4\pi G \rho a^2 / 3c^2 \sim 10^{-27} a^2. \quad (14)$$

В лабораторных условиях отношение Δ , разумеется, совершенно ничтожно, но для Земли в целом уже $\Delta \sim 3 \cdot 10^{-10}$, поскольку $a \sim 6 \cdot 10^8$ см; для Юпитера $\Delta \sim 10^{-8}$ и для Луны $\Delta \sim 2 \cdot 10^{-11}$. Если бы учет гравитационного взаимодействия нарушал равенство $m_{\text{и}} = m_{\text{т}}$ для Земли, а тем самым противоречил принципу эквивалентности, то лунная орбита определенным образом осциллировала бы [18, 5]. В 1976 г. были опубликованы результаты соответствующих наблюдений, осуществленных с помощью лазерной локации Луны, двумя независимыми группами [19]. Вывод, вытекающий из данных наблюдений, таков: гравитационная энергия Земли дает одинаковый вклад в $m_{\text{и}}$ и $m_{\text{т}}$ с точностью 2—3% или, в других терминах, отношения $m_{\text{и}}/m_{\text{т}}$ для Земли и для Луны одинаковы с точностью порядка 10^{-11} .

Итак, равенство $m_{\text{и}} = m_{\text{т}}$ проверено сейчас уже с точностью на несколько порядков большей, чем это было известно во время создания ОТО; кроме того, доказано, что с достигнутой точностью (см. выше) гравитационная энергия (в ньютоновском смысле этого понятия) вносит одинаковый вклад и в $m_{\text{и}}$, и в $m_{\text{т}}$.

В ОТО, как и в теории тяготения Ньютона, гравитационная постоянная G действительно считается постоянной, т. е. не зависит от времени (а также от пространственных координат). Уже давно дискутируется, однако, возможность того, что в действительности G , а также какие-либо другие «константы» изменяются со временем. Конкретно, делается допущение, что величина G падает со временем и была миллиарды лет назад значительно больше, чем теперь (это существенно для геофизики и космологии). Такое падение G приводило бы, в частности, к увеличению размеров орбит планет и их спутников, например к увеличению расстояния Земля — Луна (речь идет об увеличении этого расстояния, скажем, на сантиметры в год). В настоящее время нет никаких сколько-нибудь надежных данных, свидетельствующих об изменениях G . Во всяком случае, можно утверждать, что $|dG/dt|/G < 4 \cdot 10^{-10}$ год $^{-1}$.

Поскольку ОТО базируется также на частной теории относительности, можно было бы обсуждать здесь и вопрос о точности этой теории. Но мы не будем этого делать и ограничимся, имея в виду фундамент ОТО, только еще одним замечанием. Масса тела m как в классической механике, так и в частной теории относительности является скаляром. Это значит, в частности, что масса одинакова при всех направлениях ускорения или действующей силы. А что если масса фактически анизотропна и неодинакова при ускорении в направлении на центр Галактики и, скажем, в направлении на галактический полюс? Аргумент отвергнуть такую возможность нельзя, и были поставлены соответствующие опыты (см. [20], гл. 6). Наиболее точный из них, осуществленный с использованием ядерного магнитного резонанса, привел к заключению, что относительная анизотропия массы $\Delta m/m < 5 \cdot 10^{-23}$.

Резюмируя, можно констатировать, что все эксперименты, которые мы несколько условно связываем с проверкой основ ОТО, не дают никаких указаний на ее ограниченность.

4. В процессе создания ОТО Эйнштейн указал на три следствия теории, которые в литературе называют критическими, классическими, стандартными или знаменитыми эффектами. Эти эффекты таковы: красное (гравитационное) смещение частоты спектральных линий, отклонение лучей света, проходящих вблизи Солнца, и поворот перигелия Меркурия. Согласно ОТО собственное (истинное) время τ в какой-либо фиксированной точке связано с координатным временем $t = x^0/c$ соотношением $\tau = \frac{1}{c} \int \sqrt{g_{00}} dx^0$. В постоянном (стационарном или статическом) гравитационном поле частота света, измеренная в координатном (мировом) времени, одинакова вдоль светового луча, и, следовательно, определяемая на опыте частота $\nu = 1/\tau_0$ (τ_0 — период колебаний, измеряемый в собственном времени τ) в различных точках не одинакова. Отношение частот ν_2 и ν_1 в точках 2 и 1 равно

$$\nu_2/\nu_1 = \sqrt{g_{00}(1)/g_{00}(2)}. \quad (15)$$

В слабом поле $g_{00} = 1 + 2\varphi/c^2$, и с точностью до членов порядка φ/c^2

$$(\nu_2 - \nu_1)/\nu_1 \approx \delta\nu/\nu_1 \approx \delta\nu/\nu = (\varphi_1 - \varphi_2)/c^2. \quad (16)$$

Отсюда следует, например, что спектральные линии излучения, испускаемого фотосферой Солнца, при их приеме на Земле смещены в красную сторону, причем (см. (6))

$$\delta\nu/\nu \approx -GM_{\odot}/c^2 r_{\odot} = -2,12 \cdot 10^{-6}. \quad (17)$$

К сожалению, гравитационное красное смещение линий в спектре Солнца маскируется другими эффектами, в первую очередь обусловленными движениями газа в фотосфере. Поэтому вопрос о красном смещении линий в солнечном спектре длительное время

дискутировался и вызывал противоречивые суждения (см. [14] и цитируемую там литературу). В настоящее время ясно, что данные о спектре Солнца находятся в согласии с выражением (17), но точность подтверждения этой формулы не превышает одного или даже нескольких процентов. Несколькими ранее (в 1960 и 1965 гг.) более точные измерения гравитационного смещения частоты были произведены на Земле с γ -лучами с использованием эффекта Мёссбауэра, причем формула (16) была подтверждена с точностью до 1%. Недавно были произведены еще более совершенные измерения с помощью самолета и ракеты; точность здесь при сравнении с формулой (16) достигла 0,04% (см. [5], где указана оригинальная литература). Нужно отметить, что гравитационное смещение частоты, указанное Эйнштейном еще в его первой работе по ОТО (1907 г.), следует из принципа эквивалентности и частной теории относительности. Поэтому этот эффект можно относить не только к числу следствий ОТО, но и считать связанным с ее фундаментом (см. выше; в частности, измерения гравитационного смещения частоты не дают сведений о величинах β и γ в (12)) *). Несмотря на то, что опыты типа Этвеша проверяют принцип эквивалентности в известном смысле с большей точностью, чем опыты по красному смещению, речь идет о разных объектах (макроскопические массы, фотоны), и эксперименты обоих типов только дополняют друг друга (на анализе этого вопроса за пределами ОТО останавливаться здесь не будем; см. [21]).

В 1907 г. и, подробнее, в 1911 г., до получения основного уравнения ОТО (3), Эйнштейн указал и на эффект отклонения световых лучей, проходящих вблизи Солнца. При этом, однако, учитывалось лишь изменение под действием Солнца компоненты $g_{00} \approx 1 + 2\varphi/c^2$. Поэтому для угла отклонения луча было получено выражение, вдвое меньшее приводимого ниже (см. (19)), т. е. выражение

$$\alpha' = 2GM_{\odot}/c^2 R. \quad (18)$$

Любопытно, что эта формула, как затем выяснилось, была получена еще в 1801 г. (!) Золднером на основе корпускулярной теории света (ссылку и соответствующий вывод формулы см. в [14]).

После того как в 1915 г. было получено уравнение (3), Эйнштейн в том же году рассмотрел на его основе задачу об отклоне-

*) В качестве примера одного из возможных выводов формулы (16) приведем следующий, использующий квантовый язык (из результата постоянной Планка h выпадает, и аналогичный вывод можно осуществить, используя вместо энергии кванта $h\nu$ энергию дуга волн E , а также учитывая адиабатическую инвариантность отношения E/ν). «Масса фотона» $m_{\pm} = m_T - h\nu/c^2$ и изменение его энергии $h\delta\nu$ при прохождении разности гравитационных потенциалов $\varphi_2 - \varphi_1$ равно $h\delta\nu = -\frac{h\nu}{c^2}(\varphi_2 - \varphi_1)$, откуда и приходим к (16).

нии световых лучей, а также о повороте перигелия Меркурия. При этом вместо (18) для угла отклонения луча α был получен вытекающий из ОТО результат *):

$$\alpha = 4GM_{\odot}/c^2R = 2r_{g\odot}/R = 1'', 745 r_{\odot}/R, \quad (19)$$

где R — прицельный параметр, или, практически, ближайшее расстояние между лучом и центром Солнца; другими словами, лучи, проходящие непосредственно вблизи края (диска) Солнца, отклоняются на 1,75 угловой секунды. Попытка измерить отклонения лучей была предпринята еще в 1914 г., когда немецкая экспедиция прибыла для этой цели в Россию, но была интернирована в связи с началом войны. Если бы эта экспедиция успешно провела измерения, то казалось бы, что она опровергла теорию Эйнштейна, поскольку тогда правильным считался результат (18)! Первые успешные наблюдения отклонения световых лучей были произведены в 1919 г. в двух разных пунктах и привели соответственно к значениям (при $r_{\odot}/R = 1$) $\alpha = 1,98 \pm 0,18$ и $\alpha = 1,69 \pm 0,45$. Таким образом, было не только доказано существование эффекта, но и подтверждена формула (19), а не (18). Именно после этих наблюдений ОТО привлекла внимание широкой публики и стала знаменита.

Прошло уже 60 лет со времени этих первых наблюдений отклонения световых лучей, но прогресс оптических измерений эффекта оказался за столь длительный период удручающе малым. Формулу (19) или, точнее, только значение $1'',75$ для максимального отклонения (а не закон изменения α с R) удалось, в результате наблюдений для ряда затмений, проверить (и подтвердить) лишь с точностью, равной примерно 10—20% (см., например, [8, 9, 14]). Проектировавшиеся, судя по литературе, оптические измерения угла α вне затмений (как наземные, так и со спутников) оказались, очевидно, трудно выполнимыми и еще не сделаны. В терминах, использующих параметры β , γ и т. д., по измерению угла α можно непосредственно определить параметр γ , поскольку $\alpha = \frac{2r_{g\odot}}{R} \left(\frac{1 + \gamma}{2} \right)$. Упомянутые оптические измерения дают значение γ , лежащее в пределах от 0,9 до 1,3, что, конечно, неудовлетворительно. В последнее десятилетие проводятся измерения угла α в радиодиапазоле (прием радиоизлучения квазаров с использованием интерферометров). Последние данные [5] дают для γ значение 1, отвечающее ОТО, при точности около 2%.

*) Как ясно, например, из (11), в том же порядке по ϕ/c^2 , что и g_{00} , изменяется и компонента $g_{rr} = -1 + 2\phi/c^2$. Это и приводит к удвоению результата (18) с переходом к (19). Физически же дело в том, что отклонение лучей связано также с искривленным пространством, а не только с учетом принципа эквивалентности, в силу которого $g_{00} = -1 + 2\phi/c^2$.

Сравнительно недавно (в 1964 г.) начал рассматриваться [22] эффект той же природы, что и отклонение лучей, но совсем другой по технике измерений. Речь идет о релятивистской задержке электромагнитного сигнала при его распространении в неоднородном гравитационном поле. Практически эксперимент заключается в радиолоцировании Меркурия или Венеры с Земли. При неучете эффекта ОТО сигнал дойдет до планеты и вернется обратно за время $t_0 = 2r/c$, где r — расстояние по прямой между Землей и лоцируемой планетой (влиянием межпланетной среды пренебрегаем, оно достаточно точно контролируется или исключается при работе с разными несущими частотами радиосигналов). Если же принять во внимание кривизну пространства-времени, а в данном случае опираться на выражения (12), то должно наблюдаться дополнительное запаздывание сигнала на величину δt , зависящую от взаимного положения планет и Солнца. Запаздывание максимально, когда сигнал проходит вблизи края Солнца, т. е. лоцируемая планета находится в верхнем соединении. В таких и близких условиях (подробнее см. [7—9])

$$\delta t \approx \frac{4GM_{\odot}}{c^3} \left[1 + \left(\frac{r_1 + r_2}{2r} \right) \ln \frac{4r_1 r_2}{R^2} \right], \quad (20)$$

где R — «прицельный параметр» (см. (19)), r_1 — расстояние от Земли до Солнца и r_2 — расстояние от Солнца до лоцируемой планеты (Меркурия, Венеры), по предположению находящейся с другой стороны Солнца; разумеется, значение $(\delta t)_{\max}$ достигается при $R = r_{\odot}$. В случае Меркурия $(\delta t)_{\max} = 2,4 \cdot 10^{-4}$ с (при $\gamma = 1$, что отвечает ОТО), в то время как $t_0 \approx 23$ мин (следовательно, $(\delta t)_{\max}/t_0 \sim 2 \cdot 10^{-7} \sim 0,1 \mid \varphi_{\odot} \mid / c^2$; см. (6)). Весьма существенно, что запаздывание δt изменяется при движении Земли и планеты, в силу чего можно производить дифференциальные измерения и, в частности, выявить логарифмический член в (20). Точность определения времени δt , а тем самым и проверка ОТО таким методом, определяется точностью, с которой известны положения планет (и некоторые их параметры) или космических зондов (искусственных планет или искусственных спутников планет). Известные нам предварительные данные, основанные на использовании спутника Марса «Викинг», указывают на то, что $|1 - \gamma| \leq \leq 0,01$ (см. [5]). В общем в настоящее время параметр γ можно считать отличным от единицы не более чем на 1—2%. В тензорно-скалярной теории гравитации (теории Бранса — Дикки) $\gamma = (\omega + 1)/(\omega + 2)$, где ω — вводимый в этой теории свободный параметр. Если, например, $\gamma = 0,99$, то $\omega = 98$, в то время как ОТО отвечает предельный переход $\omega \rightarrow \infty$. Еще сравнительно недавно (когда нельзя было гарантировать, что γ отличается от 1 меньше чем на 10%) параметр ω мог считаться не слишком большим (обычно приводилось значение $\omega \sim 5-6$). Если же $\omega \sim 10^2$,

то привлечение скалярного поля становится уже особенно неправдоподобным.

Последний и, в известном смысле, наиболее важный из «критических» эффектов — поворот перигелия Меркурия или, общее, поворот (прецессия) орбит планет и их спутников. Как хорошо известно, в ньютоновской теории орбита планеты в пренебрежении всеми возмущениями представляет собой эллипс, в одном из фокусов которого расположено Солнце (или, точнее, находится центр тяжести системы Солнце — планета). Фактически планетарные орбиты медленно поворачиваются в своей плоскости, так что их перигелий (ближайшая к Солнцу вершина эллипса) перемещается под влиянием, в первую очередь, возмущений других планет *). В результате, например, перигелий Меркурия поворачивается на $532''$ в столетие. Еще в середине XIX века было выявлено, что учет только возмущений со стороны других известных планет неполностью объясняет этот эффект — необъясненным остается поворот перигелия Меркурия примерно на $40''$ в столетие. Такой поворот пытались связать с существованием еще одной (незамеченной) планеты, отклонениями от законов Ньютона и т. п. Первым триумфом ОТО, если иметь в виду ее применение к конкретным явлениям и эффектам, явилось как раз объяснение указанного поворота перигелия Меркурия.

Согласно ОТО угловое смещение (в радианах) перигелия планеты за один ее оборот равно

$$\dot{\psi} = \frac{6\pi GM_{\odot}}{c^2 a (1 - e^2)} = \frac{24\pi^3 a^2}{c^2 T^2 (1 - e^2)}, \quad (21)$$

где a — большая полуось эллипса (орбиты), $e = \sqrt{1 - b^2/a^2}$ — эксцентриситет орбиты (b — ее малая полуось), T — период обращения планеты вокруг Солнца (при переходе ко второму выра-

жению в (21) использован третий закон Кеплера $a^3 = \frac{GM_{\odot}}{4\pi^2} T^2$).

Заметим, что в отличных от ОТО теориях гравитации, при использовании формулы (12), результат (21) оказывается умноженным на $(2 - \beta + 2\gamma)/3$. Поэтому смещение перигелия зависит не только от γ , но и от β , а тем самым «проверяет» и члены порядка $(r_g/r)^2$ в (12). Нет оснований, однако, считать прецессию перигелиев планет эффектом порядка $(\varphi/c^2)^2 \sim (GM_{\odot}/rc^2)^2$, поскольку значение $\dot{\psi}$ явно является величиной порядка $|\varphi|/c^2$. Зависимость же $\dot{\psi}$ и от члена \dot{r}^2/\dot{z}^2 в (12) обусловлена тем обстоятельством, что движение планеты уже в ньютоновском приближении зависит от φ (точ-

*) Помимо такого «векового» возмущения, накапливающегося со временем, существуют периодические возмущения элементов орбиты. Кроме поворота перигелия, под влиянием некоторых возмущений происходит вековое смещение узлов орбиты.

нее, от градиента $\nabla\varphi$), и поэтому релятивистская поправка входит в комбинации типа $\varphi\left(\frac{\varphi}{c^2}\right) \sim \frac{1}{c^2}\left(\frac{GM}{r}\right)^2$.

Тем не менее, конечно, измерение смещения перигелиев планет особенно ценно тем, что дает дополнительную информацию по сравнению с измерением отклонения лучей или запаздывания сигналов (см. выше). Для Меркурия, согласно (21),

$$\psi = 43'',03 \text{ в столетие.} \quad (22)$$

В упоминавшейся работе Эйнштейна, в которой была получена формула (21), в качестве наблюдаемого значения ψ , оставшегося ранее необъясненным, приводится значение $45'' \pm 5''$. Лет 20 — 30 назад принимавшиеся в результате обработки наблюдений значения ψ составляли $42'',56 \pm 0,96$ и позже $43'',11 \pm 0,45$ (ссылки см. в [14, 15]). Сейчас приводится [5] значение $(2 - \beta + 2\gamma)/3 = 1 \pm 0,01$, т. е. прецессия перигелия Меркурия сходится с предсказанием ОТО (21), (22) с точностью до 1%. Если считать, что $\gamma = 1$ с точностью 2%, то $\beta = 1$ с точностью 7%.

В отношении определения угла ψ прогресс за два-три десятилетия, как мы видим, по существу, отсутствует, хотя новые результаты, разумеется, надежнее старых. Фактически, однако, за это время произошло некоторое драматическое событие — было высказано предположение, что Солнце сплюснуто и, вероятно, обладает значительным гравитационным квадрупольным моментом, в силу чего совпадение наблюдений с результатом (22) является случайным (соответствующие ссылки см., например, в [8, 9, 15]). В последние годы утверждения о сплюснутости Солнца были вполне убедительно, видимо, опровергнуты [4, 5] и совпадение наблюдений с ОТО в отношении прецессии перигелия Меркурия опять не вызывает сомнений.

5. Развитие физики и техники, в частности запуск искусственных спутников и космических зондов, чрезвычайно расширило экспериментальные возможности, и это уже сказалось на проверке ОТО. Так, приведенные выше измерения отклонений радиоволн вблизи Солнца и запаздывания радиолокационных сигналов были бы совершенно невозможны не только во время создания ОТО, но и лет 30 назад. Естественно, существует много проектов (а в ряде случаев уже проводятся наблюдения и их обработка), направленных на измерение равенства $m_{\text{и}} = m_{\text{т}}$ и эффектов ОТО с все возрастающей точностью. Видное место при этом отводится космическим исследованиям [4, 5, 14, 15]. Хотя проекты использования искусственных спутников Земли, Солнца и планет явились еще до запуска первого спутника (4 октября 1957 г.) *),

*) Здесь хочется сделать одно отступление исторического характера. Еще в 1918 г. Лензе и Тирринг указали [23], что вращение центрального тела (Солнца, Земли, Юпитера и т. д.) должно приводить к «эффекту враще-

прошедших двух десятилетий оказалось недостаточно для того, чтобы на спутниках и с их использованием широко развернулись гравитационные эксперименты, требующие компенсации «сноса» спутников, тонкой аппаратуры и т. п. Можно думать, однако, что сейчас уже дорога для соответствующих экспериментов широко открыта и некоторые из них будут осуществлены в ближайшие годы (запуски «солнечного зонда», спутника с прецессионным гироскопом и др.). Мы не будем останавливаться на этих проектах подробнее, так как не могли бы сообщить чего-то нового по сравнению со статьей [5], к которой и отсылаем (см. также [4]). В результате намеченных опытов можно надеяться определить параметр γ с точностью до 0,01 %, а параметр β с точностью 0,1 %. Как космические, так и проектируемые лабораторные (наземные) эксперименты [25] позволят поднять проверку основ и следствий ОТО в слабых полях «на новую высоту» — увеличить точность на два-три, а иногда и больше порядков по сравнению с достигнутой.

Такие опыты, однако, очень трудоемки, и уже по этой причине, не говоря о других, возникают вопросы: нужно ли дальше проверять ОТО, а если это делать, то в каких направлениях, с какими более конкретными целями и т. п.

Можно, конечно, в общем виде утверждать, что всякое уточнение экспериментов и наблюдений, особенно когда речь идет о проверке фундаментальных теорий, полезно и оправдано. Но такой ответ обходит реальную проблему. Средства и силы, которыми располагают физики и астрономы, хотя и весьма велики, но, не-

ния» — дополнительному (обусловленному вращением центрального тела) повороту перигелиев и узлов планетарных орбит по соответствующему изменению орбит спутников планет. В 1956 г. автор настоящей статьи опубликовал заметку [24] (см. также [14, 15]), в которой обсуждался этот вопрос в применении к искусственным спутникам Земли. Оказывается, что релятивистский «эффект вращения» для близких спутников может составить до 60" в столетие в отношении поворота перигея спутника и до 20" в столетие для поворота узлов орбиты. В то же время для перигея Луны вращение Земли приводит лишь к дополнительному повороту на $3 \cdot 10^{-4}$ угловой секунды в столетие. Фактически из-за различных несравненно больших возмущений, вызванных несферичностью Земли и т. д., выделить «эффект вращения» спутников Земли не только еще не удалось, но и вряд ли будет возможно в обозримом будущем. Мы остановились здесь на этом вопросе в первую очередь по другой причине. Познакомившись с заметкой [24], Г. Тирринг вспомнил интересный эпизод (нижеследующее излагается в письме, помещенном в полученном в свое время автором и сейчас им, к сожалению, утерянном ротопринтированном бюллетене одного австрийского Общества). В майский вечер 1918 г. Тирринг рассказывал Эйнштейну о своей работе с Лензе и о том, что для Луны «эффект вращения» крайне мал. Тогда, глядя на вечернее небо, Эйнштейн воскликнул: «Wie schade dass wir nicht einen Erdmond haben, der gerade nur ausserhalb der Erdatmosphäre umlauft!» («Как жалько, что мы не имеем Луны, которая вращается как раз за границами земной атмосферы!»). Сейчас мы имеем искусственные луны, движущиеся вблизи Земли, но по указанной причине «эффект вращения» измерить все равно не можем.

сомненно, ограничены. Последнее особенно бросается в глаза, если учесть, какое огромное количество проблем и задач стоит перед наукой. Делать все и невозможно, и крайне неразумно. Напротив, история науки и техники убедительно свидетельствует об эффективности концентрации усилий на основных направлениях, хотя и недопустимо работать только над «горячими» задачами. Автор уже имел возможность останавливаться на этом круге вопросов [26], и здесь достаточно подчеркнуть, что выбор стратегии и тактики при проверке ОТО представляется отнюдь не праздным занятием.

Когда проверка той или иной фундаментальной теории особенно актуальна? Во-первых, это имеет место, когда теория только появляется и на ее основе делаются определенные предсказания. Например, после создания ОТО всем было ясно, сколь необходимы обнаружение отклонения световых лучей полем Солнца и измерения гравитационного смещения частоты. Во-вторых, проверка теории становится необходимой при появлении противоречий, альтернативных предположений и т. п. Так обстоит дело в связи с утверждением о наличии у Солнца большого квадрупольного момента, хотя этот пример и нельзя по своей значимости сравнить с предыдущим. В-третьих, проверка теории привлекает особое внимание, если появляется возможность принципиально новых опытов, далеко выходящих за пределы уже осуществленных экспериментов и наблюдений.

Какова ситуация в отношении проверки ОТО в слабом поле, если руководствоваться указанными критериями? Сейчас неизвестно никаких, ни малейших, надежно установленных отклонений от результатов, согласующихся с ОТО. В свете сказанного в начале настоящей статьи важность последнего утверждения не следует недооценивать. Кроме того, все предсказания ОТО для области слабых гравитационных полей, которые удалось проверить, оказались правильными. Тем самым сомневаться в справедливости ОТО в слабых полях (условие (5) и, точнее, ограниченное эффектами порядка φ/c^2) нет никаких оснований. Дальнейшие выводы уже не могут не быть весьма субъективными. По нашему мнению, в охарактеризованных выше условиях дальнейшую экспериментальную проверку ОТО в слабом поле нельзя считать актуальной, привлекательной проблемой *). Однако это заключение никак не следует понимать как какое-то возражение против проводящихся и намечаемых экспериментов по проверке ОТО. Дело в том, что в реальных условиях речь обычно не идет о вполне свободном выборе занятий. Если, например, у радио-

*) Такое же мнение высказывалось нами и ранее (см., например, [27]), и вообще оно является широко распространенным. Лишь на некоторое время проверка ОТО в слабом поле вновь оказалась на авансцене в связи с уже упоминавшейся дискуссией о сплюснутости Солнца.

астронома имеется возможность измерить отклонение радиоволн в поле Солнца, то он вполне правильно поступает, делая такие измерения на своем радиоинтерферометре, построенном и в основном используемом совсем для других целей. Аналогично все, вероятно, новые гравитационные эксперименты связаны с развитием техники измерений и служат многим целям. Особо здесь нужно выделить эксперименты, связанные с приемом гравитационных волн. Прием гравитационных волн может в известных (практически, правда, в весьма скромных) пределах служить для проверки ОТО. Но в первую очередь с приемом гравитационных волн будет связано рождение новой ветви астрономии — гравитационно-волновой астрономии. Поэтому усилия, направленные на разработку приемников гравитационных волн (см. [5] и указанную там литературу), полностью оправданы и вне всякой связи с проблемой проверки ОТО.

В силу сказанного не приходится сомневаться в том, что проверка ОТО в слабом поле (в поле Солнца) будет продолжаться. И если не произойдет чего-то непредвиденного (а такая возможность всегда имеется и она-то и «подливает масла в огонь»), то лет через 5—10 мы убедимся в справедливости ОТО в слабом поле с еще существенно большей точностью, чем сейчас. Но о чем это будет свидетельствовать и что это даст для проверки ОТО в целом?

6. Собственно, только теперь мы переходим к тому, что считаем подлинно актуальным — проблеме проверки ОТО в сильном гравитационном поле. Допустим «с целью аргументации» (for the sake of argument), что ОТО вполне надежно проверена с точностью не только до членов порядка φ/c^2 , но и с точностью до членов порядка $(\varphi/c^2)^2$, которые в пределах Солнечной системы еще минимум на 6 порядков меньше (см. (6)). Можно ли отсюда заключить, что ОТО справедлива и в сильном поле, когда $|\varphi|/c^2 \sim 1$ или, точнее, когда отклонения компонент g_{ik} от их галилеевых значений в выражениях (9) или (10) порядка единицы? Если подходить формально; то вполне определенный отрицательный ответ на этот вопрос очевиден. В самом деле, например, в (9) компонента

$$-g_{rr} = \frac{1}{1 - r_g/r} = 1 + \frac{r_g}{r} + \left(\frac{r_g}{r}\right)^2 + \left(\frac{r_g}{r}\right)^3 + \dots,$$

и знание первых трех членов этого ряда (это, очевидно, как раз и соответствует знанию членов порядка φ/c^2 и $(\varphi/c^2)^2$) ни в коей мере не гарантирует, что сумма всех членов равна $(1 - r_g/r)^{-1}$. Если же мы знаем только два члена ряда, как это имеет место в действительности (при $\gamma = \beta = 1$, что отвечает ОТО), то судить о всей сумме членов еще меньше оснований. Фактически ситуация не столь мрачна. ОТО отнюдь не равноценна, если можно так вы-

разиться, решению Шварцшильда (9). ОТО базируется на ряде глубоких принципов, не все из которых, конечно, обязательны, но в своей совокупности лишь с очень большим трудом допускающих изменения (здесь мы исходим также из допущения, что в слабом поле ОТО справедлива; подробнее об основах ОТО см. [6 — 9, 28]). В качестве «эмпирического» свидетельства в пользу сказанного укажем, что, несмотря на многолетние и многочисленные попытки, не построена еще ни одна теория гравитационного поля, отличная от ОТО, совпадающая с ней в слабом поле и не встречающая никаких возражений (несколько подробнее см. ниже).

Так или иначе проверять ОТО в сильных полях необходимо.

В пределах Солнечной системы можно надеяться измерить члены порядка $(\varphi/c^2)^2 \sim i\bar{U}^{-12}$, в первую очередь с помощью «солнечного зонда» — межпланетной станции, подходящей близко к Солнцу. Для белых карликов параметр $|\varphi|/c^2 = GM/r_0 c^2$ на два порядка больше, чем для Солнца, но независимое (не из красного смещения линий в спектре) определение радиуса фотосферы r_0 весьма затруднительно. Для нейтронных звезд значение $|\varphi|/c^2 = GM/r_0 c^2$ достигает уже 0,1—0,3 (например, при $M = M_\odot$ и $r_0 = 10^6$ см параметр $|\varphi|/c^2 \approx 0,15$), и измерения относительного красного смещения различных линий в гамма- и рентгеновском диапазонах могут использоваться [29] для проверки принципа эквивалентности в довольно сильном гравитационном поле. Еще одна возможность — исследование движения пульсара (намагниченной нейтронной звезды) в достаточно тесной двойной системе. В 1974 г. первый такой пульсар был обнаружен и исследуется; соответствующие возможности обсуждаются в [5]. Заметим, что релятивистская прецессия орбиты для двойной системы с массой компонент $\bar{M}_{1,2} \sim \bar{M}_\odot$ и наблюдаемым орбитальным периодом $T \approx 7,7$ ч составляет около 4 угловых градусов в год, что на четыре порядка больше, чем для Меркурия. Такое сравнение, однако, несколько дезориентирует. Физическим параметром является не прецессия орбиты за какое-то произвольное время (скажем, за год), а прецессия за один оборот. Именно такую величину представляет собой угол ψ , определяемый выражением (21). Для Меркурия $\psi \sim 5 \cdot 10^{-7}$, а для обсуждаемого пульсара в двойной системе $\psi \sim 5 \cdot 10^{-5}$ (рад/об), т. е. лишь на два (а не на четыре) порядка больше. В общем и для пульсара в двойной системе параметр $|\varphi|/c^2 \ll 1$, и речь идет об измерении только эффектов первого порядка по этому параметру. Тот же факт, что значение параметра $|\varphi|/c^2$ для пульсара существенно больше, чем для Меркурия, с лихвой, по-видимому, компенсируется худшим знанием элементов орбиты пульсара. Поэтому прежде всего следует применять ОТО для анализа поведения пульсара и тем самым его изучения, а не для проверки ОТО в еще довольно слабом поле (см. [56]).

В свете сказанного перспективы проверки ОТО в сильных полях представляются весьма и весьма скромными. Тем больше оснований подчеркнуть, что не только сильные, но и, можно сказать, сверхсильные гравитационные поля в рамках ОТО, безусловно, могут и даже должны встречаться. Именно, это имеет место в космологии и для «черных дыр».

Нестационарные изотропные и однородные космологические модели (Фридман, 1922 и 1924 гг.) обладают особенностями (сингулярностями). В открытых моделях имеется одна сингулярность при $t = 0$, в закрытых моделях сингулярности уже две — при $t = 0$ и в конце фазы сжатия (мы считаем общий характер таких моделей известным; см., например, [6 — 9, 11]). При приближении к сингулярностям в этих моделях плотность вещества (материи) ρ неограниченно возрастает. Одно время казалось, что появление сингулярностей в решениях ОТО связано с высокой симметрией рассматривавшихся моделей. Но затем было выяснено [6, 30, 31], что это не так, и появление сингулярностей (бесконечной плотности вещества или, даже и при отсутствии вещества, бесконечной кривизны пространства) является весьма общим свойством уравнений ОТО. Сингулярность появляется, в частности, при рассмотрении приводящего к образованию черной дыры гравитационного коллапса какой-то массы (например, достаточно массивной звезды). В этом случае, однако, сингулярность, расположенная при $r = 0$ (в начале координат), «не видна» наблюдателю, находящемуся па бесконечности (т. е. при $r \rightarrow \infty$; здесь r — радиальная координата в решении Шварцшильда (9)).

Как расценивать появление «истинной» сингулярности — бесконечной плотности материи и (или) бесконечной кривизны пространства (а тем самым и бесконечно сильных приливных сил; см., например, [9], § 31.2)? Согласно наиболее распространенному в настоящее время мнению (которого автор придерживался всегда и ранее) наличие «истинных» сингулярностей несомненно свидетельствует о границах применимости ОТО — конкретной классической теории гравитационного поля *). Помимо общих соображений, такое заключение со всей убедительностью вытекает из анализа самой ОТО с учетом основ квантовой теории. Действительно, с квантовой точки зрения неизбежно существование нулевых колебаний гравитационного поля, да и всех других существующих полей. Классической теорией можно пользоваться лишь при условии, что все эти флуктуации достаточно малы. Конкретно, квантовые флуктуации самой метрики δg_{ik} должны быть малы по сравнению с классическими значениями g_{ik} . Из этого требования вытекает (см. [9, 12, 32] и указанную там литературу), что

*) Во избежание недоразумений, мы везде называем ОТО только классическую теорию. Если же речь идет о квантовании ОТО или, правильнее сказать, о квантовом обобщении ОТО, то это отмечается и в терминологии.

границы применимости ОТО определяются параметрами

$$\begin{aligned}
 l_g &= (\hbar G/c^3)^{1/2} = 1,6 \cdot 10^{-33} \text{ см}, & t_g &= l_g/c = 5,4 \cdot 10^{-44} \text{ с}, \\
 \rho_g &= \frac{\hbar}{cl_g^4} = \frac{c^3}{\hbar G^2} = 5,2 \cdot 10^{93} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}, \\
 M_g &= \left(\frac{\hbar c}{G}\right)^{1/2} = \rho_g l_g = \frac{\hbar}{cl_g} = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ г}.
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

Это означает, что классическая теория неприменима, если радиус кривизны пространства сравним с планковской длиной l_g или плотность вещества ρ сравнима с ρ_g . Другими словами, классическая теория (ОТО) применима лишь при $\rho \ll \rho_g$, для «точечных» тел с массой $M \gg M_g$, интервалов $t \gg t_g$ и длин $l \gg l_g$. Конкретизация этих неравенств (т. е. точность классического приближения) может быть осуществлена только на основе квантовой теории гравитации, которой в сколько-нибудь законченном виде еще не существует. Поэтому, очевидно, если мы применяем ОТО, например, в области плотностей $\rho < 10^{93} - 10^{94} \text{ г/см}^3$, то здесь имеется некоторая условность — может оказаться, что в силу появления каких-то численных факторов ОТО с точностью, скажем, до 1% справедлива лишь при $\rho < 10^{90} \text{ г/см}^3$ и т. п. Менее тривиальна другая оговорка. Выше мы считали, что ОТО лимитирована лишь, так сказать, со стороны квантовой теории. В остальном же предполагалось, что имеет смысл рассматривать пространство и время так, как это делается в макроскопической физике и астрономии, вплоть до масштабов l_g и t_g . Между тем современная физика (в данном случае микрофизика, или, как иногда говорят, физика высоких энергий, или физика элементарных частиц) «добралась» лишь до масштабов $l \sim 10^{-15} - 10^{-16} \text{ см}$. Это значит, что известные физические эксперименты более или менее гарантируют применимость обычных пространственных представлений именно до указанных масштабов (отметим для сравнения, что комptonовская длина нуклона $\hbar/Mc \sim 10^{-12} \text{ см}$ и $\hbar c/E \sim 10^{-15} \text{ см}$ при энергии частицы $E \sim 1 \text{ эрг} \sim 10^{12} \text{ эВ}$). Еще сравнительно недавно высказывались предположения, что существует какая-то фундаментальная длина $l_f \sim 10^{-17} \text{ см}$, так что при $l \lesssim l_f$ пространство становится уже «необычным» — как-то квантуется и т. п. Сейчас, в связи с развитием единой теории слабых и электромагнитных взаимодействий, основания для введения длины $l_f \sim 10^{-17} \text{ см}$ отпали и вообще о фундаментальной длине почти перестали упоминать. Бросается в глаза, однако, тот разрыв на 17 порядков (!), который существует между наименьшими «обследованными» масштабами $l \sim 10^{-16}$ и гравитационной длиной $l_g \sim 10^{-33} \text{ см}$. Если даже весьма далеко экстраполировать и считать, скажем, что фундаментальная длина $l_f \sim 10^{-20} \text{ см}$, то и тогда разрыв между l_g и l_f колоссален. В то же время, насколько мы можем судить,

сейчас нельзя указать никаких оснований на эксперименте возражений против существования фундаментальной длины $l_f < 10^{-17}$ см. Это не означает, конечно, что такая длина действительно существует. Возможно, что роль l_f играет как раз гравитационная длина l_g . Но в силу сказанного нельзя утверждать, что пределы применимости ОТО определяются параметрами (23). Напротив, если существует какая-то фундаментальная длина l_f , то, как можно думать, границы ОТО определяются параметрами

$$l_f, t_f \sim l_f/c, \rho_f \sim \hbar/cl_f^3 \sim \rho_g (l_g/l_f)^4. \quad (24)$$

При $l_f \sim 10^{-17}$ см время $t_f \sim 10^{-27}$ с и максимальная плотность $\rho_f \sim 10^{30}$ г/см³ $\sim 10^{-64}$ ρ_g . Как ни велико даже при $l_f \sim 10^{-20}$ см отличие между значениями l_f, t_f, ρ_f и гравитационными параметрами (23), оно затрагивает только микромасштабы и существенно [33] (вблизи классических сингулярностей*), а также в теории реликтовых черных «мини» дыр. Последняя тема — вопрос о черных дырах с малой массой, которые «испаряются» (излучают фотоны и другие частицы) при учете квантовых эффектов [34], принадлежит к числу самых интересных в физике и астрофизике последних лет. Однако этой и родственных проблем мы здесь касаться не можем (см. [35—37]).

Тот факт, что выявляются границы применимости ОТО (даже если она в точности справедлива в классической области) при учете квантовых эффектов, а возможно, также в случае существования фундаментальной длины **) $l_f \gg l_g$, представляется имеющим большое принципиальное значение. Исследование пространственно-временной области вблизи сингулярностей, появляющихся в ОТО, создание квантовой теории гравитации и квантовой космологии, связь этих вопросов с микрофизикой — все это проблемы первостепенного значения, привлекающие к себе в настоящее время пристальное внимание. В этом можно видеть и одно из свидетельств того, как ОТО и теория гравитации в целом после многих лет, если не забвения, то известной изоляции, вышли на широкий простор, занимают в физике все более видное место. Вместе с тем вряд ли уместно и целесообразно связывать проблему сингуляр-

*) Термин «классическая сингулярность» означает, что имеется в виду сингулярность, появляющаяся в классической (неквантовой) теории, в частности в ОТО. Нет никаких оснований полагать, что какая-то сингулярность сохранится и в квантовой области и вообще в «истинной» квантовой теории гравитации, выходящей за рамки ОТО. Заметим, что в работе [38] проводится анализ поведения физических часов при приближении к классической сингулярности. При этом делается вывод, что любые часы при достаточном приближении к сингулярности «отказываются» и не могут измерять собственное время. Отсюда следует вывод [38] о неприменимости ОТО вблизи сингулярности. Можно видеть, однако, что соответствующее ограничение, по-видимому, не сильнее квантовых ограничений $M \gg M_g, l \gg l_g$ и т. д.

**) См. [39], где приводится аргумент в пользу того, что $l_f \sim l_g$.

ности с вопросом об экспериментальной проверке ОТО. Скорее даже напротив — для того чтобы обобщать ОТО на квантовую область, крайне важно быть уверенным в том, что она справедлива в классической области. Именно так и можно сейчас определить цель экспериментальной проверки ОТО — доказать ее применимость в области сильных гравитационных полей, но еще вдали от «истинных» сингулярностей.

7. Чрезвычайно важно, что такая задача — проверка ОТО в сильном поле, но вдали от сингулярности, — оказывается самым тесным образом связанной с актуальнейшими в физическом, астрофизическом и космологическом планах вопросами о существовании, образовании и поведении черных дыр.

Весьма любопытно, что понятие о черных дырах было, по сути дела, введено Лапласом еще в конце XVIII века [40]. Лаплас отметил, что, согласно корпускулярной теории света и ньютоновской теории тяготения, достаточно массивное тело не может испускать света. В самом деле, корпускула с массой m может уйти на бесконечность (излучиться) только в том случае, если ее начальная кинетическая энергия $mv_0^2/2$ на фотосфере звезды с массой M и радиусом r больше или равна $mv_0^2/2 = GmM/r$ (здесь, разумеется, приравнены инертная и тяготеющая массы корпускулы m). Но скорость света равна $v_0 = c$ и поэтому свет может испуститься (уйти далеко от звезды) только при условии $r > r_g = 2GM/c^2$. Получение таким способом точного выражения для гравитационного радиуса (см. (7)) является, конечно, случайностью, поскольку использованные выражения к свету в точности неприменимы. Но если бы мы выше более современным образом заменили $mv_0^2/2$ не на $mc^2/2$, а на mc^2 , то разница получилась бы только в два раза. Физику же дела приведенный расчет передает правильно. О черных дырах вспомнили, по-видимому, лишь почти через 250 лет — в 1939 г., — но уже на основе ОТО [41]. Прошло еще 25 — 30 лет (и примерно 50 лет после создания ОТО), прежде чем черные дыры заняли заметное, а затем и видное место в физике и астрономии. Причину можно видеть в том, что гравитационный радиус звезды с массой M , которая порядка массы Солнца M_\odot , составляет только несколько километров (см. (7)), что значительно меньше радиуса обычных звезд (для Солнца $r_\odot/r_g \sim 2 \cdot 10^5$, где $r_\odot = 7 \cdot 10^{10}$ см — радиус фотосферы). В таких условиях решение Шварцшильда (9), относящееся только к вакууму (области вне звезды), нужно лишь для учета тех поправок порядка $|\varphi|/c^2 \sim r_g/r$, о которых мы говорили ранее. Поэтому и до сих пор в некоторых курсах ОТО гравитационный коллапс и черные дыры рассматриваются, скорее, как некоторая экзотика.

Между тем именно в случае справедливости ОТО можно было бы ожидать появления большого количества черных дыр. Дело

в том, что остывшие («выгоревшие») звезды могут остаться в состоянии белых карликов, только если их масса $M \ll (1,2-1,4) M_{\odot}$; для нейтронных звезд $M \lesssim 3M_{\odot}$. Правда, последний результат зависит от некоторых не вполне строгих предположений об уравнении состояния ядерного вещества, но в общем достаточно надежен. Холодные звезды с $M > 3M_{\odot}$ или, во всяком случае, с $M > 5M_{\odot}$ должны, согласно ОТО, коллапсировать неограниченным образом, образуя черные дыры. Это значит, что в сопутствующей поверхности звезды системе отсчета эта поверхность в какой-то момент пересекает шварцшильдову сферу с радиусом r_g . Для удаленного же от звезды наблюдателя она «застывает», быстро приближаясь к размеру $r = r_g$. Поле вне застывшей звезды при этом в рамках ОТО строго описывается решением (9), для которого $g_{00} \rightarrow 0$ и $g_{rr} \rightarrow -\infty$ при $r \rightarrow r_g$. Тем самым гравитационное поле застывшей звезды (или, если угодно, сформировавшейся черной дыры) является очень сильным — его нельзя аппроксимировать несколькими членами рядов типа (12). Правда, нужно подчеркнуть, что сингулярность Шварцшильда, как иногда называют особенность, имеющую место для решения Шварцшильда (9), не является «истинной» особенностью гравитационного поля в том смысле, как это понятие использовалось выше. Именно, при $r \rightarrow r_g$ компоненты пространственного тензора кривизны конечны, а определитель $g = |g_{ik}| = -r^4 \sin^2 \theta$ никакой особенности также не имеет. «Наблюдатель», падающий вместе с веществом звезды при пересечении сферы Шварцшильда, этого пересечения «не заметит», и, таким образом, особенность на сфере $r = r_g$ не является «истинной» *). Но вряд ли ее следует называть «фиктивной», поскольку для внешнего наблюдателя именно сфера Шварцшильда является «горизонтом событий» — имеет указанный выше смысл сферы, на которой звезда «застывает». Для вращающихся черных дыр картина несколько сложнее, но горизонт событий также, вообще говоря, имеется (речь идет о решении Керра; за всеми подробностями отсылаем к [9, 11]).

Многие звезды имеют массу $M \gg M_{\odot}$ и поэтому, казалось бы, после остывания должны превратиться в черные дыры. Газ, скапливающийся в центральных областях шаровых скоплений и галактик, также в конце концов должен образовывать черные дыры большой массы. В силу этого выше и было отмечено, что в рамках ОТО

*) Заметим, что для достаточно массивных черных дыр (при $M \gg M_{\odot}$) плотность ρ при приближении радиуса звезды к гравитационному радиусу остается еще не слишком большой, скажем, не выше плотности вещества в ядрах $\rho_{\text{я}} \sim 3 \cdot 10^{14} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. Действительно, плотность $\rho_0 = 3M/(4\pi r^3) = 3c^3/(32\pi G^3 M^2)$, поскольку $r_g = 2GM/c^2$; поэтому, например, при $M = 10 M_{\odot}$ плотность $\rho_0 \sim 2 \cdot 10^{14} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$.

можно ожидать появления черных дыр, не как исключительных объектов, а как часто встречающегося естественного продукта эволюции массивных тел.

Фактически, однако, черные дыры еще с уверенностью не обнаружены ни в одном случае, хотя их настойчиво ищут как среди звезд, так и в ядрах галактик и квазаров, уже лет пятнадцать. Такая ситуация нуждается в комментариях.

Несмотря на то, что из ОТО несомненно следует, что черные дыры могут существовать, их появление вовсе не обязательно. Действительно, в процессе сгорания ядерного топлива звезда может взрываться и в некоторых случаях безусловно взрывается (новые и сверхновые звезды). При взрыве звезда «сбрасывает» оболочку, причем оставшаяся масса может быть меньше $3M_{\odot}$ или меньше $1,2M_{\odot}$, что позволяет избежать образования черной дыры. Расчет ряда звездных моделей приводит именно к такому результату. В случае галактических ядер также можно в принципе избежать коллапса за счет ядерных взрывов или перераспределения энергии между звездами в скоплении (в последнем случае считаем, что галактическое ядро представляет собой плотное звездное скопление) [42]. Нужно при этом иметь в виду, что звезды, их скопления и газовые массы, вообще говоря, вращаются. При их сжатии с сохранением момента количества движения скорость вращения возрастает, что препятствует коллапсу. Потеря же массой момента количества движения является относительно медленным процессом*). Коротко говоря, образование черных дыр может происходить с большим трудом и достаточно медленно, а может практически и вообще не происходить.

Итак, если черные дыры не будут обнаружены, то это еще не доказывает несправедливость ОТО в сильном поле, хотя и требует специальных объяснений. Против ОТО свидетельствовало бы обнаружение стабильных холодных звезд с массой $M > 3M_{\odot}$ (или, для осторожности, с еще большей массой). Против ОТО свидетельствовало бы также поведение компактной звезды с большой массой, противоречащее предсказаниям ОТО (отсутствие «гори-

*) Для облака газа с размером $r_1 \sim 10^{18}$ см и характерной скоростью движения газа $v_1 \sim 10^8$ см/с произведение $r_1 v_1 \sim 10^{26}$ см²/с и таков же по порядку величины момент количества движения в газе в расчете на 1 грамм. При сжатии облака до размеров r_2 порядка гравитационного радиуса r_g газ движется со скоростью $v_2 \sim c$ и, следовательно, $r_2 v_2 \sim cr_g \sim 10^{26}(M/M_{\odot})$ см²/с, где M — масса газа. Очевидно, при $M/M_{\odot} \sim 10$ отношение $r_1 v_1 / r_2 v_2 \sim 10^7$, т. е. до образования черной дыры момент количества движения облака должен уменьшиться на 6—7 порядков.

В модели магнитоида [44, 44а], в которой учитывается влияние магнитного поля, уменьшение момента количества движения обеспечивается, правда, за достаточно короткое время [44а]. При этом, однако, фрагментация и ядерные взрывы все равно могут помешать коллапсу с образованием черной дыры.

зонта событий» в условиях, когда, согласно ОТО, он обязательно должен существовать, как это имеет место для невращающейся звезды *)). Обнаружение черных дыр, напротив, явилось бы веским подтверждением ОТО, хотя для количественной проверки (скажем, доказательства справедливости решения (9)) самого факта существования горизонта событий еще мало.

Как же обстоит дело с поисками черных дыр? Черную дыру можно обнаружить либо по ее гравитационному воздействию на другую звезду в двойной системе, либо по специфическому свечению, возникающему при аккреции на черную дыру газа, падающего из межзвездной среды или истекающего из звезды-компаньона [11а]. Поиски черных дыр в двойных системах привели пока что к выявлению лишь одного «кандидата в черные дыры»; им является довольно яркая «рентгеновская звезда» — двойная система Cyg X-1 (Лебедь X-1), исследуемая уже несколько лет. Масса компактного компонента этого источника превосходит $5M_{\odot}$, в силу чего и имеется подозрение, что наблюдается черная дыра. Колебания рентгеновской светимости источника и его спектр также необычны — не такие, как в случае аккреции на нейтронную звезду. Тем не менее ясности в вопросе о природе Cyg X-1 еще нет. Последний обзор на эту тему [43], написанный тремя американскими и двумя советскими астрофизиками, начинается словами: «Мы были бы очень рады, если бы Cyg X-1 был черной дырой. Однако, честно говоря, мы в этом совершенно не уверены» **). Правда, статья заканчивается замечанием, что «Cyg X-1, вероятно, является ближайшей активно аккрецирующей черной дырой», но в целом вопрос открыт (возможное альтернативное предположение состоит в том, что Cyg X-1 представляет собой не двойную, а тройную систему ***). В отношении галактических ядер и квазаров (или, точнее, кернов этих ядер и квазаров) ситуация еще более неопределенная. Сейчас конкурируют [44] в основном три модели кернов — плотное скопление звезд, магнитоплазменное тело (магнитоид или спинар) и массивная черная дыра. Последняя

*) По предположению, именуемому гипотезой космической цензуры в рамках ОТО, образующаяся при коллапсе истинная сингулярность всегда окружена горизонтом событий, если только метрика на бесконечности является галилеевой. Эта гипотеза не доказана, с чем и связана осторожность, проявляемая при формулировке предположения о том, что отсутствие горизонта событий противоречит ОТО.

***) We would be happy if Cygnus X-1 were a black hole. However, in honesty, we quite uncertain — таков английский текст, который переведен выше.

****) Отметим, что, согласно [43а], при наличии очень сильного магнитного поля масса еще не коллапсировавшей холодной звезды может существенно превосходить значение $3M_{\odot}$. Предполагалось также [43б], что излучение Cyg X-1 связано не с аккрецией газа на компактную звезду, а с магнитными эффектами в двойной звездной системе.

модель, во всяком случае, не более вероятна, чем модель магнитоида. Вместе с тем имеются аргументы [42, 42а], свидетельствующие против присутствия очень массивных черных дыр в центре Галактики и, возможно, других галактик, а также шаровых скоплений. Здесь не место вдаваться в подробности, но складывается впечатление, что черные дыры со звездными массами ($M < (20 - 50) M_{\odot}$), во всяком случае, — большая редкость. Прямые указания на существование массивных черных дыр ($M > (10^2 - 10^3) M_{\odot}$) вообще отсутствуют, хотя в некоторых случаях (например, в ядре радиогалактики Дева А-М87) имеются известные указания [44б], позволяющие подозревать присутствие черной дыры.

Если черные дыры не будут обнаружены, то вопрос о подтверждении справедливости ОТО в сильных полях останется, вероятно, открытым на неопределенное время. Обнаружение же черных дыр, как уже подчеркивалось, качественно подтвердит ОТО, а исследование этих дыр может послужить эффективным методом количественной проверки ОТО в сильном поле.

В такой ситуации приобретает, естественно, большой интерес анализ теоретических возможностей в отношении построения теорий гравитации, в которых черные дыры не могут появляться. Такие теоретические схемы известны [45—48]. При этом, например, в работе [47] попытка построить новую (отличную от ОТО) теорию гравитации мотивируется именно сомнением в возможности существования черных дыр. Такие сомнения вообще довольно распространены (см., например, [28] в качестве последнего известного примера). Поэтому хотелось бы еще раз подчеркнуть, что нам черные дыры представляются вполне разумным и непротиворечивым следствием ОТО, вовсе не требующим ее изменения (в отличие от ситуации с «истинными» сингулярностями). Но, когда ставится вопрос о проверке ОТО, то нельзя принимать заранее, что черные дыры могут существовать.

Все упомянутые работы [45 — 48] базируются на введении «априорной геометрии» [9] в том смысле, что, помимо метрического тензора g_{ik} , рассматривается также еще один метрический тензор γ_{ik} (поэтому теория [47] называется биметрической и этот термин можно с основанием применять и к другим подобным схемам). Тензор γ_{ik} задан и отвечает плоскому пространству-времени (т. е. может быть выбран в форме (2) с $\gamma_{00} = 1$ и т. д.). Описание гравитационного поля только с помощью одного метрического тензора g_{ik} основано на принципе эквивалентности. Введение второго тензора γ_{ik} связано поэтому с каким-то отказом от принципа эквивалентности, но, разумеется, конкретные варианты биметрических теорий строятся с учетом известных из опыта фактов. В качестве примера укажем, что в [47] выбрана система уравнений, для которой вакуумное сферически-симметричное решение для g_{ik}

определяется выражением *)

$$\begin{aligned}
 ds^2 &= e^{-r_g/\rho} c^2 dt^2 - e^{r_g/\rho} [d\rho^2 + \rho^2 (\sin^2 \theta d\varphi^2 + d\theta^2)] = \\
 &= [1 - r_g/\rho + 1/2 (r_g/\rho)^2 + \dots] c^2 dt^2 - \\
 &- [1 + r_g/\rho + 1/2 (r_g/\rho)^2 + \dots] [d\rho^2 + \rho^2 (\sin^2 \theta d\varphi^2 + d\theta^2)]. \quad (25)
 \end{aligned}$$

Отсюда и из (10), (11) следует, что в слабом поле выражения для ds^2 в ОТО и в биметрической теории совпадают — это обеспечивает идентичность результатов для соответствующих эффектов, наблюдаемых в Солнечной системе. Вместе с тем решение (25) не имеет никакой особенности на гравитационном радиусе r_g и, конкретно, компонента g_{00} при $r = 4\rho = r_g$ не обращается в нуль, в отличие от решения Шварцшильда (9), (10). Поэтому черной дыры, согласно (25), не существует. В работе [49] теория [47] была использована для решения задачи о максимально возможной массе M_{\max} нейтронной звезды. В определенных предположениях об уравнении состояния вещества, приводящих в ОТО к значению $M_{\max} = 1,46 M_{\odot}$, в [49] получено значение $\bar{M}_{\max} = 8,1 M_{\odot}$ (правда, вопрос об устойчивости полученного решения не исследовался). Если $M > M_{\max}$, то, согласно биметрической теории [49], должен произойти коллапс, но, по-видимому, никакого горизонта событий (черной дыры) не образуется, т. е. удаленный «наблюдатель» может проследить падение вещества в центр звезды. Там, видимо, имеется «истинная» сингулярность, но вопрос о ее характере и даже самом существовании, насколько нам известно, с должной детальностью еще не был рассмотрен.

Сделанными замечаниями мы, по существу, и ограничимся. Биметрические теории, вообще говоря, значительно сложнее ОТО, а их исследование находится в начальной стадии. Между тем даже ОТО, изучаемая десятилетиями, неоднократно преподносила сюрпризы и отнюдь не может считаться простой и прозрачной во всех своих математических и физических аспектах. Определенные указания на трудности, с которыми сталкиваются биметрические теории, уже появились [50, 51] и совершенно еще неясно, можно ли построить непротиворечивую биметрическую теорию **). Впрочем, нет оснований ограничиваться только анали-

*) Обозначения здесь изменены по сравнению с [47] и, главное, радиальная переменная ρ считается такой же, как в «изотропных» сферических координатах (см. (10)). Как известно, в теориях гравитации вопрос о выборе и смысле координат при сопоставлении наблюдений с теорией не тривиален, с чем и связана сделанная оговорка.

***) Согласно [51] в известных биметрических теориях излучаются гравитационные волны с отрицательной энергией, в силу чего излучающая система (скажем, двойная звезда) может, излучая, повышать свою энергию. Подобный вывод представляется явно недопустимым — свидетельствующим о непригодности теории. Вопрос о том, нельзя ли построить какую-либо биметрическую теорию, лишенную отмеченного дефекта, остается еще неясным,

зом биметрических теорий, поскольку известны и другие заслуживающие внимания варианты теории гравитации [28, 52, 53]. Так, в [53] развивается теория с несимметричным тензором g_{ik} , которой была посвящена последняя работа Эйнштейна [57]. Особенно интересной, по крайней мере для макрофизики, представляется нам попытка [28] построить тетраэдную теорию гравитации, удовлетворяющую всем основным принципам ОТО, но отличную от нее. К сожалению, анализ варианта [28] далек от завершенности и сейчас предсказать его судьбу невозможно.

Общая теория относительности начала свой путь более семи десятилетий назад, более шести десятилетий она изучается в ее современной форме. За это время сменились уже несколько поколений физиков и астрономов, причем были сделаны открытия непреходящего значения. На долгие годы (особенно с конца 20-х до примерно конца 50-х годов) ОТО оказалась, однако, как бы в стороне от магистральных дорог развития науки, сейчас же она находится (можно сказать, опять находится) в центре внимания. В более узком плане экспериментальной проверки ОТО также имели место взлеты и падения, связанные с появлением тех или иных неясностей или сомнений (еще раз упомянем для примера трудности при наблюдении красного смещения спектральных линий в солнечном спектре и вопрос о сплюснутости Солнца). Но сегодня ОТО в отношении ее согласия с экспериментами и наблюдениями находится в лучшей ситуации, чем когда-либо ранее. Нет ни малейших указаний на какую-то неточность ОТО в слабых гравитационных полях, и все предсказания теории, которые удалось проверить, подтвердились. Экспериментальные исследования в слабом поле продолжаются, и через несколько лет соответствующий материал будет значительно богаче, чем сейчас. Вместе с тем центр тяжести в изучении ОТО, ее применений и проверки явно переместился в область сильных гравитационных полей. Если ОТО как классическая теория гравитации точна, то основным является вопрос об ее квантовом обобщении и соответствующем исследовании области вблизи классических сингулярностей. Здесь космология, и ОТО в целом, смыкается с микрофизикой. В классической (неквантовой) области в настоящее время центральной для ОТО и ее проверки представляется проблема черных дыр — их обнаружения и изучения. До тех пор, пока черные дыры не будут найдены, трудно, если не невозможно, быть вполне уверенным в справедливости ОТО и в сильных полях. Обнаружение черных дыр явилось бы еще одним подлинным три-

но отмеченная трудность кажется имеющей глубокий характер. Появление решений с отрицательной энергией препятствует также обобщению ОТО путем введения членов с высшими производными [54], для чего, казалось бы, есть основания [42].

умфом ОТО, а их последующее исследование — методом количественной проверки ОТО в сильном поле.

Когда ситуация прояснится? Очень трудно дать ответ. Но если обнаружить черную дыру можно, что называется, в любой момент, то количественная проверка ОТО «с использованием» черных дыр явно потребует длительного времени. К счастью, как уже подчеркивалось выше, наука не развивается путем строго последовательного продвижения вперед, когда каждый следующий шаг делается после доказательства полной обоснованности предыдущего. ОТО приносила важнейшие результаты, даже когда была проверена менее убедительным образом, чем сейчас. Движение вперед будет, конечно, продолжаться, и лишь как о предостерегающем сигнале мы должны помнить о том, что черные дыры еще надежно не обнаружены и общая теория относительности для сильного гравитационного поля с экспериментальной точки зрения еще не проверена.

Помимо логических аргументов, экспериментальных данных и теоретического анализа, каждый физик руководствуется также своей интуицией, верит в тот или иной характер дальнейшего развития исследований. Правда, из осторожности чаще всего стараются не делать прогнозов, да и вероятность ошибки при оценках принципиальных вопросов действительно достаточно велика. Тем не менее, закончив статью утверждением, правильным с фактической точки зрения, автор хотел бы не скрывать и своего интуитивного мнения. Именно, глубокая простота и стройность, а также вся предшествующая история развития общей теории относительности, позволяют думать (или, если угодно, верить), что эта теория строго справедлива и в сильных полях вплоть до некоторой пространственно-временной области вблизи истинных сингулярностей, где уже нужно учитывать квантовые и, возможно, какие-то иные микрофизические эффекты. С этой точки зрения черные дыры, безусловно, могут существовать, и если они не будут обнаружены, то это нужно связывать с условиями их образования; эти условия в конкретной космической обстановке вполне могут оказаться достаточно неблагоприятными. Вместе с тем, повторим это еще раз, вполне возможно, что черные дыры удастся обнаружить и даже в самом близком будущем.

ЛИТЕРАТУРА]

1. *Эйнштейн А.* Собрание научных трудов.— М.: Наука, 1966, т. 3, с. 432.
2. *Гинзбург В. Л.*— Вопросы философии, 1972, № 11, с. 14; в сб.: Философские проблемы астрономии XX века.— М.: Наука, 1976, с. 57; см. также — *Q. J. Roy. Astron. Soc.*, 1975, v. 16, p. 265.
3. *Mansouri R., Sezl R. U.*— General Relativity and Gravitation, 1977, v. 8, p. 497, 515, 809; см. также *Newman D. et al.*— *Phys. Rev. Lett.*, 1978, v. 40, p. 1355.
4. *Коноплева, Н. П.*— УФН, 1977, т. 123, с. 537.

5. Руденко В. Н.— УФН, 1978, т. 126, с. 361.
6. Ландау Л. Д. и Лифшиц Е. М. Теория поля.— М.: Наука, 1973.
7. Меллер К. Теория относительности.— М.: Атомиздат, 1975.
8. Вейнберг С. Гравитация и космология.— М.: Мир, 1975.
9. Мизнер К., Торн К., Уилер Дж. Гравитация.— М.: Мир, 1977, т. 1—3.
10. Эйнштейн А. Собрание научных трудов.— М.: Наука, 1965, т. 1, с. 601.
- 11а. Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Теория тяготения и эволюция звезд.— М.: Наука, 1971.
- 11б. Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Строение и эволюция Вселенной.— М.: Наука, 1975.
12. Гинзбург В. Л., Киржниц Д. А., Любушин А. А.— ЖЭТФ, 1971, т. 60, с. 451; см. также в сб.: Гравитация.— Киев: Наукова думка, 1972, с. 40.
13. Kirzhnits D. A., Linde A. D.— Ann. of Phys., 1976, v. 101, p. 195.
14. Гинзбург В. Л.— УФН, 1956, т. 59, с. 11; в сб.: Эйнштейн и современная физика (сб. памяти А. Эйнштейна).— М.: Гостехиздат, 1956, с. 93; см. также — УФН, 1963, т. 81, с. 739.
15. Гинзбург В. Л.— В кн.: Эйнштейновский сборник, 1967.— М.: Наука, 1967, с. 80;— Astronautica Acta, 1966, v. 12, p. 136.
16. Dicke R. H., Roll P. G., Krotkov I.— Ann. of Phys., 1964, v. 26, p. 442.
17. Брагинский В. Б., Панов В. И.— ЖЭТФ, 1971, т. 61, с. 873; см. также Брагинский В. Б., Манукин А. Б. Измерение малых сил в физических экспериментах.— М.: Наука, 1974.
18. Nordtvedt K.— Phys. Rev., 1968, v. 169, p. 1014; 1968, v. 170, p. 1186.
19. Williams J. A. et al.— Phys. Rev. Lett., 1976, v. 36, p. 551; Counselman Ch. C. et al.— Phys. Rev. Lett., 1976, v. 36, p. 555.
20. Гравитация и относительность. /Под ред. Х. Цзю и В. Гоффмана.— М.: Мир, 1965.
21. Will C. M.— Phys. Rev., 1974, v. D10, p. 2330; Nordtvedt K.— Phys. Rev., 1975, v. D11, p. 245; Hangan M. P., Will C. M.— Phys. Rev., 1977, v. D15, p. 2711.
22. Shapiro I. I.— Phys. Rev. Lett., 1964, v. 13, p. 789.
23. Lense J., Thirring H.— Phys. Z., 1918, Bd. 19, S. 156.
24. Гинзбург В. Л.— ЖЭТФ, 1956, т. 30, с. 213; см. также — УФН, 1957, т. 63, с. 119.
25. Braginsky V. B., Caves C. M., Thorne K. S.— Phys. Rev., 1977, v. D15, p. 2047.
26. Гинзбург В. Л. О физике и астрофизике.— М.: Наука, 1974; см. также— Природа, 1976, № 6, с. 73.
27. Гинзбург В. Л.— В сб.: Эйнштейн и развитие физико-математической мысли.— М.: Изд-во АН СССР, 1962, с. 117; In: Recent Developments in General Relativity.— Pergamon Press-PWN, 1962, p. 57; Proc. on Theory of Gravitation.— Paris — Warszawa: Gauthier-Villars-PWN, 1964, p. 55.
28. Möller C. On the crisis in the theory of gravitation and the possible solution.— Mat. Fys. Skr. Dan. Vid. Selsk, 1978, v. 39, № 13.
29. Brecher K.— Astrophys. J. (Letters), 1978, v. 219, p. L117.
30. Хокинг С., Эллис Дж. Крупномасштабная структура пространства-времени.— М.: Мир, 1977.
31. Пенроуз Р. Структура пространства-времени.— М.: Мир, 1972.
32. Уилер Дж. Предвидение Эйнштейна.— М.: Мир, 1970.
33. Гинзбург В. Л.— Письма в ЖЭТФ, 1975, т. 22, с. 514; Гинзбург В. Л., Фролов В. П.— Письма в Астрон. ж., 1976, т. 2, с. 474.
34. Hawking S. W.— Nature, 1974, v. 248, p. 30; Commun. Math. Phys., 1975, v. 43, p. 199.
35. Markov M. A. Gravitational Radiation and Gravitational Collapse/Ed. C. De Witt.— IAU, 1974, p. 106; см. также Марков М. А. О природе материи.— М.: Наука, 1976, с. 151, 159.

36. Фролов В. П.— УФН, 1976, т. 118, с. 473; см. также в сб.: Черные дыры.— М.: Мир, 1978.
37. Зельдович Я. Б.— УФН, 1977, т. 123, с. 487.
38. Møller C. On the Behaviour of Physical Clocks in the Vicinity of Singularities of a Gravitational Field.— Nordita publication, 1977, № 672.
39. Горелик Г. Е., Озерной Л. М.— Письма в ЖЭТФ, 1977, т. 26, с. 419.
40. Laplace P. S. Le systeme du monde.— Paris, 1795, v. 2 (ссылку на английское издание и фотокопию соответствующей страницы французского издания см. в [9]).
41. Oppenheimer J. R., Snyder H.— Phys. Rev., 1939, v. 56, p. 455.
42. Докучаев В. И., Озерной Л. М.— Письма в Астрон. ж., 1977, т. 3, с. 391; Астрон. ж., 1978, т. 55, с. 27.
- 42a. Bailey M. E., Clube S. V.— Nature, 1978, v. 275, p. 278.
43. Eardley D. W., Lightman A. P., Shakura N. I., Shapiro S. L., Sunyaev R. A.— Comments on Astrophysics, 1978, v. 7, p. 151 (УФН, 1978, т. 126, с. 515); см. также Oda M.— Space Sci. Rev., 1977, v. 20, p. 757.
- 43a. Ardavan II., Partovi M. H.— Phys. Rev., 1977, v. 16D, p. 1664.
- 43b. Bahcall J. N., Kulsrud R. M., Resenbluth M. N.— Nature Phys. Sci., 1973, v. 243, p. 27.
44. Гинабуре В. Л., Озерной Л. М.— Astrophys. and Space Sci., 1977, v. 48, p. 401; см. также — УФН, 1976, т. 120, с. 309.
- 44a. Озерной Л. М., Сомов Б. В., Усов В. В.— Astrophys. and Space Sci., 1971, v. 11, p. 244; v. 12, p. 267.
- 44b. Young P. J. et al.— Astrophys. J., 1978, v. 221, p. 721, 731.
45. Lightman A. P., Lee D. L.— Phys. Rev., 1973, v. D8, p. 3293.
46. Ni W. T.— Phys. Rev., 1973, v. D7, p. 2880.
47. Rosen N.— Ann. of Phys., 1974, v. 84, p. 455; см. также GRG, 1976, v. 7, p. 839; 1977, v. 8, p. 617; 1978, v. 9, p. 339; Stoeger W. R.— GRG, 1978, v. 9, p. 165.
48. Логунов А. А., Фоломешкин В. Н.— Теор. и мат. физика, 1977, т. 32, с. 147, 167.
49. Rosen J., Rosen N.— Astrophys. J., 1975, v. 202, p. 782.
50. Yilmaz H.— GRG, 1977, v. 8, p. 957.
51. Will C. W.— Astrophys. J., 1977, v. 214, p. 826.
52. Hehl F. W., von der Heyde P., Kerlick G. D.— Phys. Rev., 1974, v. D10, p. 1066.
53. Moffat J. W.— Phys. Rev., 1977, v. D15, p. 3520; см. также — Phys. Rev., 1978, v. D17, p. 396.
54. Stelle K. S.— GRG, 1978, v. 9, p. 353.
55. Hsu J. P.— Phys. Rev., 1978, v. D17, p. 3164.
56. Taylor J. H., Fowler L. A., McCulloch P. M.— Nature, 1979, v. 277, p. 437.
57. Эйнштейн А. Собрание научных трудов.— М.: Наука, 1966, т. 2, с. 849.

Переходное излучение и переходное рассеяние

ВВЕДЕНИЕ

Когда заряженная частица (например, электрон) движется в вакууме, она излучает электромагнитные волны только в том случае, если претерпевает ускорение, скажем, под действием внешнего магнитного поля или при соударении с другой частицей. Если же она не ускоряется, а движется равномерно и прямолинейно (в инерциальной системе отсчета), частица не излучает. Такова одна из азбучных истин физики. Но, как и во многих других случаях, эта кажущаяся такой простой и ясной истина в действительности довольно сложна и многогранна.

Если не упоминать о еще более ранних замечаниях О. Хевисайда и В. Кельвина, первое серьезное посягательство на утверждение об отсутствии излучения при равномерном движении заряда совершил в 1904 г. известный немецкий физик А. Зоммерфельд. Он рассмотрел на основе уравнений электродинамики (уравнений Максвелла) движение заряженного шарика в вакууме с постоянной скоростью v и пришел к выводу, что излучение отсутствует, лишь пока скорость v меньше скорости света c . Если же v больше c , излучение появляется, причем оно весьма своеобразно — нормали к волнам образуют круговой конус, угол раствора которого θ удовлетворяет условию $\cos \theta = c/v$. В соответствии со сказанным это условие излучения соблюдается лишь для скорости v , большей или равной скорости света, так как в противном случае $\cos \theta$ был бы больше единицы.

Но не успела работа Зоммерфельда подвергнуться широкому обсуждению, как в 1905 г. появилась специальная теория относительности. А из релятивистской динамики сразу же становится ясно, что тело нельзя ускорить до скорости, равной c , так как масса тела возрастает с его скоростью по закону $m^* = m/\sqrt{1-v^2/c^2}$ и при приближении v к c стремится к бесконечности. Таким образом, отпала, казалось бы, и возможность движения источника со сверхсветовой скоростью в вакууме. Лишь несколько лет назад это утверждение было пересмотрено. Во-первых, начали рассма-

тривать гипотетические частицы — тахионы, которые обладают, можно сказать, массой $m^* = m/\sqrt{v^2/c^2 - 1}$ и могут двигаться только со скоростью v , большей c (в противном случае масса тахиона оказалась бы мнимой). Тахионам посвящена уже большая литература¹⁾, но они не только не обнаружены, но и сама возможность их существования крайне сомнительна, так как это, видимо, привело бы к нарушению принципа причинности или другим недопустимым следствиям (таково, по крайней мере, наиболее распространенное мнение, которое я разделяю). Во-вторых, в 1971 г. автор настоящей статьи вспомнил такой давно известный факт: теории относительности ни в какой мере не противоречит возможность движения различных возмущений (скажем, световых пятен — «зайчиков» — на экране) со сколь угодно большими скоростями. В качестве примера можно указать на то, что импульс излучения от пульсара PSR0532 в знаменитой Крабовидной туманности бежит по поверхности Земли со скоростью около 10^{24} см/с, т. е. примерно в 40 000 млрд. раз превосходящей скорость света (пульсар делает 33 оборота в секунду и находится на расстоянии $R \approx 6 \cdot 10^{21}$ см, откуда скорость «зайчика» $v = 2\pi\nu R \approx 1,2 \cdot 10^{24}$ см/с, где ν — частота оборотов).

Такой «зайчик» нельзя использовать для передачи информации, например между разными точками земной поверхности (поэтому и нет противоречия с теорией относительности). «Зайчик» состоит из совокупности частиц (фотонов) и, если не иметь в виду тахионы, никак не может состоять из одной частицы. Но аналогичный «зайчик» (в случае, например, когда он создается заряженными частицами, падающими на металлическую поверхность) вполне способен излучать волны — он может играть роль излучателя в теории Зоммерфельда²⁾.

Однако излучающие сверхсветовые «зайчики», не говоря уже о тахионах, — это все же некоторая экзотика, а подлинно важное излучение при равномерном движении источника было открыто в 1934 г. С. И. Вавиловым и П. А. Черенковым и теоретически осмыслено в 1937 г. И. Е. Таммом и И. М. Франком. Это излучение получило название черепковского (в СССР мы употребляем, правда, термин «излучение Вавилова — Черепкова»). За его открытие и объяснение была присуждена Нобелевская премия 1958 г. по физике.

Черепковское излучение на частоте ν возникает, когда заряд (или другой источник, скажем, магнитный диполь) движется в прозрачной среде со скоростью v , превосходящей фазовую скорость c_ϕ электромагнитных волн с рассматриваемой частотой ν . Как известно, $c_\phi = c/n$, где c — скорость света в вакууме и

¹⁾ См. Эйнштейновский сборник, 1973.— М.: Наука, 1974, с. 84—200.

²⁾ Подробнее см. в следующей статье настоящего сборника.

$n(\nu)$ — показатель преломления среды на рассматриваемой частоте ν . При этом излучение распространяется (речь идет о нормали к волновым фронтам) под углом θ к траектории (рис. 1), причем

$$\cos \theta = c_{\Phi}/v = c/(n(\nu)v).$$

Очевидно, это условие отличается от условия излучения в вакууме лишь заменой c на $c/n(\nu)$. Но эту замену, а физически —

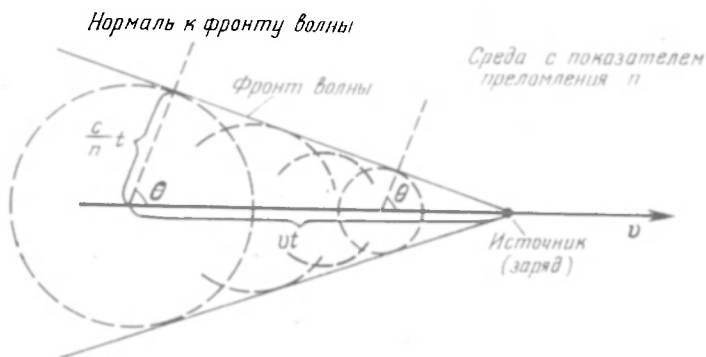


Рис. 1. Излучение Еавиллова — Черенкова. Условие излучения $\cos \theta = c/nv$ соответствует фазировка волн, излучаемых вдоль траектории источника, $(c/n)t$ — путь, проходимый светом за время t ; vt — путь, проходимый источником за время t .

переход от равномерного движения в вакууме к такому же движению в прозрачной среде, — никто не догадался сделать за целые десятилетия (даже если вести отсчет лишь от работы Зоммерфельда). Сделано же это было, можно сказать, под давлением эксперимента в ходе попыток объяснить наблюдения Черенкова.

Кстати сказать, выражение $\cos \theta = c_{\Phi}/v$ давно и хорошо известно в акустике (условие Маха), где роль фазовой скорости света c_{Φ} играет скорость звука, а v — скорость источника звука (скажем, пули). Это и неудивительно, поскольку обсуждаемое условие излучения носит, по сути дела, кинематический характер — это условие интерференции (фазировки) волн любой природы, испускаемых источником вдоль его траектории (см. рис. 1). Такой же результат следует из законов сохранения энергии и импульса для частицы и излучаемых ею волн (при учете импульса, передаваемого среде)³⁾.

Мы лишь бегло остановились на вопросе об излучении, возникающем в однородной среде при равномерном движении сверх-

³⁾ См., например, Гинабург В. Л. — УФН, 1973, т. 110, с. 309.

светового источника, поскольку тема настоящей статьи иная ⁴). Именно, мы хотим ответить на вопрос: а что если скорость источника — досветовая (т. е. меньше фазовой скорости света $c_{\text{ф}} = c/n$)? Не может ли равномерно движущийся источник излучать и в этом случае?

ПЕРЕХОДНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Ответ на такой вопрос был дан И. М. Франком и автором еще более тридцати лет назад — в 1944 г. Ответ положительный и связан с возможностью появления излучения, которое мы назвали переходным.

Почему заряд, равномерно движущийся, но с досветовой скоростью, не излучает? Это легче всего объяснить в случае движения заряда в среде, когда можно считать, что вдоль своей траектории заряд производит возмущения атомов среды; таким образом, каждый атом становится центром вторичных волн, которые затем распространяются и интерферируют. При досветовой скорости заряда волны, исходящие от разных частей траектории, гасят друг друга. Если же $v > c_{\text{ф}}$, они, напротив, находятся в фазе, и получается суммарный эффект (по сути дела, это и пояснено на рис. 1). До создания теории относительности считали, что вакуум подобен некоторой среде, носившей название эфира. С точки зрения представления об эфире отсутствие излучения равномерно движущегося (со скоростью $v < c$) источника в вакууме объясняется так же, как это сделано выше в случае среды (такой подход получил название принципа Гюйгенса). Если же не вводить понятие об эфире, отсутствие излучения можно объяснить и иным образом, но это сейчас неважно. Важно то, что принцип Гюйгенса хорошо «работает» при описании излучения в вакууме и совсем уже нагляден для случая излучения в среде.

При таком подходе сразу же легко понять, почему заряд излучает, если он ускорен. Дело просто в том, что вторичные волны, испускаемые с разных частей траектории заряда, уже не гасят друг друга. Пусть, например, заряд сначала равномерно двигался с нерелятивистской скоростью, а затем резко затормозился и остановился (рис. 2). Тогда вторичные волны, испускаемые почти

⁴ По этой причине изложение выше велось, можно сказать, в весьма упрощенном виде. Фактически Зоммерфельд, по-видимому, совсем не руководствовался акустической аналогией и условием для конуса Маха. В форме $\cos \theta = c/(nv)$, в применении к электромагнитным волнам, это условие появилось и было положено в основу всего рассматриваемого в работе И. Е. Тамма и И. М. Франка. Более того, подход этих авторов к интерпретации соответствующих экспериментов встречал вначале возражения, что является лишним свидетельством нетривиальности теории эффекта Вавилова — Черепкова в период ее создания (подробнее см. Франк И. М. Проблемы теоретической физики. В сб.: Памяти И. Е. Тамма. — М.: Наука, 1972, с. 350).

со всей траектории, будут гаситься, по конец траектории (точнее, область около конца траектории с размерами порядка длины излучаемой волны) окажется источником волн, уходящих от заряда. В общем случае, если скорость заряда изменяется даже незначительно, какое-то излучение всегда возникает (такое излучение при столкновении заряженных частиц называют тормозным, но при ускорении частицы в результате действия внешнего магнитного поля излучение именуют магнитотормозным или, для релятивистских частиц, — синхротронным излучением). Картину можно описать и так: при изменении скорости заряд как бы «стряхивает» с себя некоторую часть окружающего его электромагнитного поля.

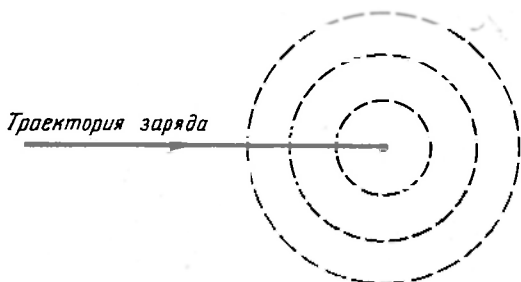


Рис. 2. Излучение при резкой остановке заряда.

Фактически, однако, дело не в изменении скорости v , а в изменении отношения v/c_ϕ . В вакууме, конечно, фазовая скорость волн $c_\phi = c$ и всегда одинакова, в силу чего все и сводится к изменению скорости заряда. Но в среде $c_\phi = c/n(v)$ и излучение возникает именно при изменении отношения $vn(v)/c$. Отсюда сразу же ясно, что излучение появляется и при постоянной скорости v , если вдоль траектории заряда изменяется показатель преломления $n(v)$. Именно подобная ситуация складывается, например, при пересечении частицей (зарядом) границы раздела вакуума со средой или границы раздела двух разных сред. Как раз такой простейший тип переходного излучения и был рассмотрен вначале. Но в общем случае переходное излучение «в чистом виде» (т. е. без одновременно возникающего тормозного и черепковского излучения) появляется всегда, когда источник равномерно движется с досветовой скоростью в среде, свойства которой изменяются в пространстве и (или) во времени.

Быть может, приведенное объяснение нефизикам покажется все же формальным. Как поэтому, так и из независимых соображений поясним природу переходного излучения другим способом на таком частном примере. Пусть электрон в процессе своего равномерного движения переходит из вакуума в металл (рис. 3,

верхний). Для радиоволн, инфракрасных лучей и видимого света достаточно гладкая металлическая поверхность представляет собой прекрасное зеркало. Более того, в хорошем приближении это зеркало можно охарактеризовать физическим эпитетом — назвать идеальным, т. е. полностью отражающим падающее на

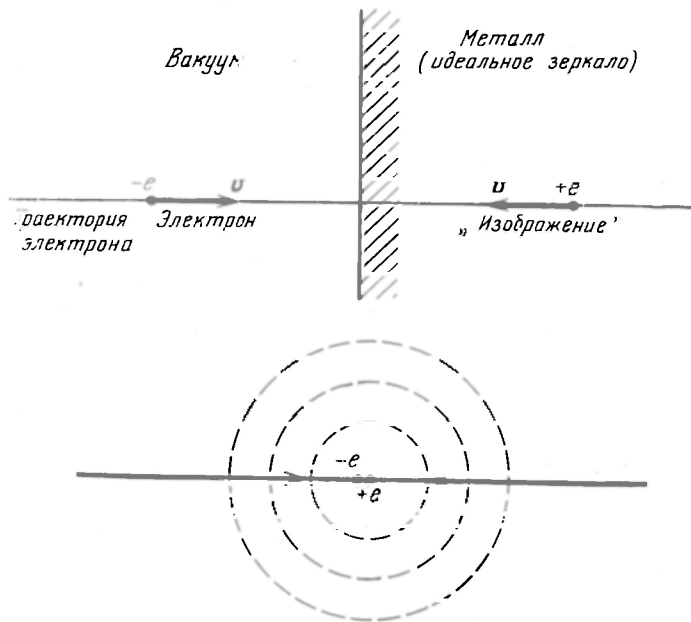


Рис. 3. К пояснению природы переходного излучения при падении электрона на идеальное зеркало.

него излучение. При подходе к зеркалу человек видит свое приближающееся изображение. Точно так же падающий на зеркало электрон «видит» в зеркале движущееся ему навстречу его собственное изображение, эквивалентное позитрону. В точной формулировке это означает следующее. Электромагнитное поле в вакууме, создаваемое зарядом $-e$ (электроном), падающим со скоростью v по нормали на идеальное зеркало, равно (в вакууме) полю самого этого заряда (как если бы он был один во всем пустом пространстве) плюс поле его изображения — заряда $+e$ («позитрона»), движущегося в зеркале ⁵⁾. Но что произойдет дальше, когда электрон достигнет границы зеркала? Очевидно, он пересечет границу и дальше будет двигаться в металле. Однако поле

⁵⁾ Фактически, конечно, поле, отвечающее заряду $+e$ (изображению), создается положительным зарядом, возникающим на поверхности зеркала под действием заряда $-e$ (т. е. электрона, находящегося в вакууме).

заряда, находящегося в металле, практически полностью экранируется электронами проводимости уже на весьма малых (атомных) расстояниях. Поэтому в вакууме картина будет такой: как электрон, так и его изображение («позитрон») при пересечении границы как бы исчезают, аннигилируют. Поэтому и излучение в вакууме возникает точно такое же, как при мгновенной остановке двух зарядов $-e$ и $+e$ в одной точке (рис. 3, нижний).

Такое описание, правда, пригодно лишь для волн, для которых зеркало можно считать идеальным (в известном приближении, как упоминалось, это справедливо в радиодиапазоне и в оптике). Но в этих пределах, как мы видим, переходное излучение эквивалентно тормозному излучению в случае резкой остановки в одной точке движущихся навстречу друг другу зарядов $-e$ и $+e$. Полная излученная при этом энергия в единичном интервале частот ν равна $8e^2v^2/3c^3$, что вдвое больше, чем при резкой остановке одного заряда $+e$ или $-e$ в свободном пространстве (в случае остановки движущихся навстречу нерелятивистских зарядов $-e$ и $+e$ их поля складываются, а плотность энергии поля учетверяется; с другой стороны, в рассматриваемом случае переходного излучения поле имеется только в половине пространства — в вакууме).

После того как электрон попадает в металл, он начинает тормозиться (сталкиваться с ионами решетки и с другими электронами), в силу чего появляется и тормозное излучение. Но для электронов с достаточно большой энергией (равной, скажем, 1 кэВ и больше) роль тормозного излучения, наблюдаемого вне металла, мала — электрон быстро уходит в глубь вещества, откуда излучение наружу не выходит. Если же на зеркало падают протоны или еще более тяжелые частицы, тормозное излучение еще меньше, так как для более тяжелых частиц ускорение в результате соударений значительно меньше, чем для электронов. В то же время переходное излучение от массы частиц не зависит.

Кстати сказать, на первый взгляд кажется, что при наличии излучения (черепковского или переходного) некоторые наши рассуждения неверны: ведь движение частицы не может быть равномерным, и нужно принимать во внимание ускорение, обусловленное излучением волн. Это, однако, не так. Во-первых, в принципе всегда можно компенсировать потери на излучение и обеспечить равномерное движение частицы. Во-вторых, если энергия частицы достаточно велика по сравнению с потерями на излучение, то роль этих последних оказывается совершенно несущественной. Таким образом, приближение, при котором движение источника считается равномерным даже и при наличии излучения, имеет широкую область применимости.

Итак, можно утверждать, что именно переходное излучение — основной, доминирующий механизм свечения при падении элект-

тронов на поверхность металла. Более того, сейчас ясно, что такое свечение уже давно наблюдалось на анодах рентгеновских трубок. Но тогда природа свечения выяснена не была, хотя переходное излучение представляет собой достаточно ясный классический (не квантовый) эффект, свойства которого сразу же выясняются из анализа уравнений Максвелла⁶⁾. Трудно сомневаться в том, что препятствием для понимания послужила здесь глубоко укоренившаяся уверенность, что равномерно движущийся заряд излучать не может. Впрочем, в 1945—1946 гг., когда была опубликована статья И. М. Франка и автора, такого предубеждения уже не могло быть, по все равно па переходное излучение долгое время не обращали внимания.

Первые, хотя и весьма несовершенные результаты наблюдений переходного излучения были опубликованы только в 1959 г. П. Гольдсмитом и Дж. Джелли, использовавшими протоны с энергией от 1 до 5 МэВ. В последовавшем затем потоке исследований применялись в основном электроны с энергией от нескольких до сотни кэВ. Еще ранее, а тем более после появления экспериментальных данных было опубликовано большое число статей, в которых теория переходного излучения была распространена на случай пластинок или пленок, наклонного падения заряда и т. п. Хорошее согласие теории с опытными данными (имеющее место во всех случаях, когда такое сравнение оправдано условиями расчета или эксперимента) не может, разумеется, вызывать удивление — речь ведь идет о достаточно простом эффекте. Центр тяжести проблемы, естественно, переместился поэтому в другую плоскость — встал вопрос о возможности использовать переходное излучение для каких-либо целей, в первую очередь в физике. Так было и с излучением Вавилова — Черенкова: этот эффект с точки зрения непосредственных приложений интересен в первую очередь в связи с созданием соответствующих счетчиков, широко используемых в физике высоких энергий.

СЧЕТЧИКИ НА ПЕРЕХОДНОМ ИЗЛУЧЕНИИ

Самое слабое место черепковских счетчиков состоит в том, что для ультрарелятивистских частиц, когда скорость v очень близка к c , характеристики счетчика почти не зависят от энергии. Поэтому создание счетчиков нового типа, позволяющих не только реги-

⁶⁾ Сказанное справедливо и в отношении эффекта Вавилова — Черенкова (соответствующее свечение жидкостей под действием гамма-лучей наблюдалось и даже изучалось до П. А. Черенкова). Однако до тех пор, пока лишь наблюдается, например, некоторое свечение, но ни с экспериментальной, ни с теоретической стороны не выявлена специфика этого свечения (не осознано, что речь идет не о каком-то уже давно известном явлении, скажем, люминесценции), не приходится, конечно, говорить об открытии нового эффекта.

стрировать, но и измерять энергию релятивистских частиц, давно стало и остается до сих пор актуальной задачей. Естественно было подумать о возможности применения для этой цели и переходного излучения. На первый взгляд, однако, создание счетчика на переходном излучении («переходного счетчика») не кажется особенно перспективным. Во-первых, полная (просуммированная по углам и по частотам) интенсивность переходного излучения от одной границы раздела двух сред весьма мала — грубо говоря, фотон переходного излучения испускается с вероятностью порядка постоянной

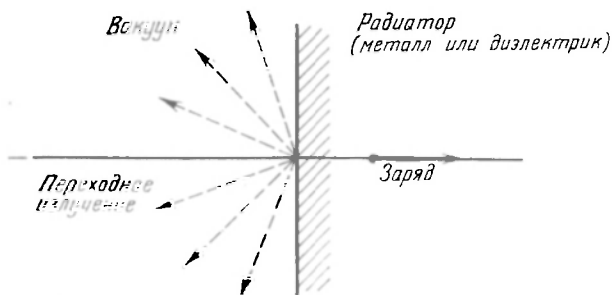


Рис. 4. Переходное излучение «назад».

тонкой структуры $\alpha = 2\pi e^2/(\hbar c) = e^2/(\hbar c) \approx 1/137$, т. е. для испускания одного фотона частица должна пересечь около сотни границ! Во-вторых, если регистрировать переходное излучение «назад» (рис. 4), нужно иметь в виду, что оно сосредоточено в оптической части спектра, причем полная его интенсивность для ультрарелятивистских частиц лишь очень медленно (логарифмически) растет с энергией. Точнее, логарифмически растет с энергией полная (для всех углов) интенсивность излучения в заданном (скажем, в единичном) интервале частот; однако излучение «назад» значительно лишь в оптической части спектра, в силу чего частотный интервал используемого излучения ограничен, его нельзя увеличить.

Первое затруднение можно, правда, преодолеть, наблюдая переходное излучение от стопки из большого числа пластинок — для релятивистских частиц их можно без потери интенсивности сделать из плотного прозрачного материала (разделенного, скажем, промежутками, заполненными воздухом). Но другие затруднения остаются, и, по-видимому, счетчики на оптическом переходном излучении интереса не представляют. Новые возможности стали ясны после того, как в 1959 г. Г. М. Гарибян и К. А. Барсуков обратили внимание на то, что (как это следует из общего выражения для интенсивности переходного излучения) полная интенсивность переходного излучения, проинтегрированная по всем

углам, для ультрарелятивистских частиц возрастает пропорционально энергии частицы E за счет излучения все более и более жестких фотонов. Переходное излучение в этом случае простирается вплоть до частоты порядка

$$\nu_{\max} = \frac{\nu_p}{\sqrt{1 - \epsilon_j^2}} = \nu_p \frac{E}{m_e c^2},$$

где $\nu_p = \sqrt{e^2 N / \pi m_e} \approx 9 \cdot 10^3 \sqrt{N}$ — плазменная частота среды, причем N — полная концентрация всех электронов (заряд $-e$, масса m_e) в этой среде; в твердом теле, например в стеклах, концентрация $N \sim 10^{24} \text{ см}^{-3}$ и плазменная частота $\nu_p \sim 10^{16}$ Гц, чему отвечает длина волны $\lambda_p = c/\nu_p \sim 3 \cdot 10^{-6} \text{ см} = 300 \text{ \AA}$ или энергия фотонов $h\nu_p \sim 30\text{--}50$ эВ. В очень легких веществах (например, в графите) частота ν_p несколько меньше. Другими словами, речь идет о далекой ультрафиолетовой части спектра, в которой очень сильно поглощение и практически весьма трудно и неудобно работать. Но для ультрарелятивистской частицы спектр переходного излучения заходит уже в рентгеновскую область, причем фотоны излучаются в основном вперед — в направлении скорости частицы. Такое излучение (и тем более фотоны с еще большей энергией) достаточно свободно проходит через пластинку, а также может довольно эффективно регистрироваться различными рентгеновскими счетчиками. Полная интенсивность излучения от одной границы при этом равна (заряд частицы равен q)

$$U = \frac{2\pi q^2 \nu_{\max}}{3c} = \frac{2\pi q^2 \nu_p E}{3m_e c^3}.$$

Отсюда ясно, что число излучаемых фотонов (равное энергии E , деленной на энергию фотона $h\nu_p \lesssim h\nu_{\max}$) при $|q| = |e|$, где e — заряд позитрона или протона, по-прежнему порядка $\alpha \approx 1/137$. Значит, нужно использовать стопки пластин (или вообще весьма неоднородный материал с порами, т. е. с многочисленными границами). При этом, однако, появляется другая трудность.

В случае нерелятивистской частицы излучение формируется в зоне с размерами порядка излучаемой длины волны λ . Поэтому пластинка толщиной d , большей или даже порядка λ , излучает примерно как две независимые границы раздела (полная интенсивность излучения равна удвоенной интенсивности излучения от одной границы, если усреднить по возникающим при изменении отношения λ/d осцилляциям, обязанным интерференции волн, исходящих от обеих границ). Это значит, что пластинки могут быть сравнительно тонкими (толщиной всего в несколько длин волн) и разделять их можно также тонкими промежутками, заполненными каким-либо газом (скажем, воздухом при атмосфер-

ном давлении). Но для ультрарелятивистских частиц зона формирования излучения с длиной волны λ равна

$$l_{\text{форм}} = \frac{\lambda}{2(1-v/c)} \sim \lambda \left(\frac{E}{mc^2} \right)^2,$$

так как для ультрарелятивистских частиц $\frac{1}{2(1-v/c)} \approx \frac{1}{1-\beta^2} = \left(\frac{E}{mc^2} \right)^2$. Вывод выражения для $l_{\text{ф}}$ пояснен на рис. 5. Учитывая, что характерная длина волны переходного излучения релятивистских частиц $\lambda \sim \lambda_{\text{мин}} \sim \lambda_p (mc^2/E)$, зона формирования для переходного излучения $l_{\text{форм}} = l_{\text{пер}} \sim \lambda (E/mc^2)$. В твердом теле, как мы

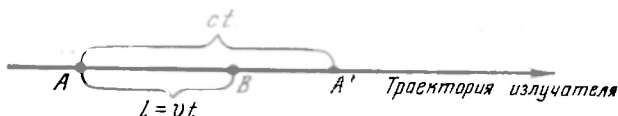


Рис. 5. Получение выражения для размера зоны формирования $l_{\text{форм}}$. Рассмотрим частицу, движущуюся со скоростью v и излучающую волны в направлении скорости. Волна, излученная в точке A , за некоторое время t , двигаясь со скоростью c , дойдет до точки A' (отличим фазовой скорости $c_{\text{ф}}$ от c здесь пренебрегаем). Но частица за то же время пройдет путь $l = vt$ и дойдет до точки B . Поэтому расстояние между B и A' равно $(c - v)t$. Если этот отрезок равен половине длины волны $\lambda/2$, излучаемые в точке B волны будут уже в противофазе с волнами, излученными в точке A . Значит, только излучение с пути AB складывается и, другими словами, именно на этом пути излучение формируется. Остается заметить, что при $v \approx c$ время $t = l/v \approx l/c$, в силу чего из равенства $(c - v)t = \lambda/2$, определяющего положение точки B , получается выражение, приведенное в тексте.

видели, $\lambda_p \sim 3 \cdot 10^{-6}$ см, и, значит, при $E/mc^2 \sim 10^3$ зона формирования $l_{\text{пер}} \sim 3 \cdot 10^{-3}$ см, т. е. все еще невелика. Но при $E/mc^2 \sim 10^7$ (для электронов $m_e c^2 \approx 0,5$ МэВ и это отвечает энергии $E \sim 5000$ ГэВ) уже $l_{\text{пер}} \sim 30$ см. Разумеется, если мы хотим работать не с самыми жесткими излучаемыми фотонами, — зона формирования еще больше. Например, в оптической части спектра даже при $E/mc^2 \sim 10^3$ зона $l_{\text{пер}} \sim 50$ см, и использование значительно более тонких пластинок не принесло бы большой выгоды по сравнению с применением одной границы раздела. Однако для доступных на ускорителях энергий при работе в рентгеновской области вполне еще можно использовать стопки пластинок и тем самым создать достаточно эффективный переходный счетчик.

Впервые вопрос о таких счетчиках, насколько я знаю, был поднят в нобелевской лекции И. М. Франка (1958 г.). Затем М. Л. Тер-Микаэлян (1961 г.) развил теорию переходных счетчиков (слоистая структура радиатора, среда со случайными неоднородностями,

учет зависимости выхода рентгеновских фотонов от энергии излучающей частицы). В теоретическом плане этим кругом вопросов занимался также ряд других авторов⁷⁾. Первый работающий переходной счетчик (он был опробован на μ -мезонах космических лучей) построен в 1963 г. и в дальнейшем изучен Ф. Р. Арутюняном с сотрудниками (Ереван). В первых опытах эффективность регистрации частиц составляла только 9%, но затем была существенно повышена. Тем временем переходными счетчиками начали заниматься и другие группы физиков — под руководством А. И. Алиханьяна (Ереван), Л. Юаня (Брукхейвен) и др. (соответствующие публикации, если не говорить о группе Ф. Р. Арутюняна, начали появляться только в 1969 г.). В дальнейшем развитие происходило быстро. Упомянем, например, результаты, опубликованные в 1974 г. М. Чери, Д. Мюллером и Т. Прайсом (Чикаго), работавшими на ускорителе SLAC с электронами и пионами с энергиями от 3 до 15 ГэВ. В этой работе переходное рентгеновское излучение от стопки майларовых пленок регистрировалось пропорциональными камерами и сцинтилляторами. Была достигнута эффективность детектирования выше 90%, причем вполне надежно разделялись электроны и пионы с одинаковой полной энергией E , а значит, с разным отношением E/mc^2 (масса пиона в 270 раз больше массы электрона).

В последние годы переходные счетчики продолжают совершенствоваться и уже применяются как при работе на ускорителях, так и в космических лучах. В частности, предполагается использовать такие счетчики на спутниках в установках для изучения первичных космических лучей. Общее заключение о том, какое место переходные счетчики займут в физике высоких энергий и космических лучей, зависит, однако, от сопоставления с другими методами и от целого ряда обстоятельств экспериментального характера. В этих вопросах автор некомпетентен и предоставляет судить о них другим. Ниже хотелось бы еще на одном примере проиллюстрировать лишь, сколь не просто придумать хороший новый счетчик частиц.

ОБ ОДНОЙ НЕУДАЧНОЙ ПОПЫТКЕ ИЗОБРЕСТИ СЧЕТЧИК ЧАСТИЦ

(замечание автобиографического характера)

В научной литературе, особенно на русском языке, не принято употреблять личные местоимения — я, мне и т. д. В целом это относится и к научно-популярной литературе, в согласии с чем автор выше тоже упоминал о себе лишь в третьем лице или исполь-

⁷⁾ См. Тер-Микаэлян М. Л. Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях.— Ереван: Изд-во АН Армянской ССР, 1969.

зовал другие принятые в таких случаях обороты речи. Однако трудно, да и странно, было бы придерживаться такого способа и в настоящем разделе статьи, носящем, можно сказать, автобиографический характер. Другое дело, нужен ли такой раздел вообще, но он написан исключительно физики ради, и речь в нем идет о моей ошибке. Поэтому, как можно надеяться, несколько личных местоимений не вызовут у читателя сильных отрицательных эмоций.

После нашей работы с И. М. Франком (1944 г.) я совершенно не занимался теорией переходного излучения — вплоть до 1972 г., когда вернулся к этому вопросу по довольно случайным причинам. Во-первых, переходные счетчики начали входить в моду

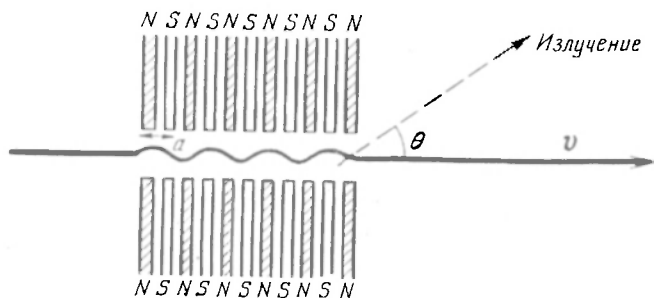


Рис. 6. Схема магнитного ондулятора.

или, во всяком случае, о них стали много говорить. Мне же такие счетчики казались слишком громоздкими и, можно сказать, сложными. Вот я и подумал, а нельзя ли изобрести какой-либо подходящий счетчик, но попроще. Во-вторых, я оказался в отпуске в неудачном месте и, перебирая вопросы, о которых можно было думать без книг и журналов, стал, в частности, изобретать счетчики, а также новые задачи, связанные с переходным излучением. В последнем случае удалось найти две реальные проблемы, упоминаемые ниже. В отношении же счетчиков я, как мне казалось, придумал «ондуляторный счетчик в среде» и вскоре даже опубликовал соответствующую заметку. А потом мне показали, что такой счетчик работать скорее всего не будет и я, видимо, придумал лишь название счетчика. Но допущенная ошибка оказалась довольно интересной, и ее понимание доставило почти такое же (впрочем, весьма скромное) удовольствие, как и «изобретение» самого счетчика. Быть может, и читателям будет интересен соответствующий пример коварства природы (исходя из такого предположения и написан настоящий раздел).

Ондулятором (или, точнее, магнитным ондулятором) часто называют систему типа изображенной на рис. 6. Частица в этом случае проходит между периодически расположенными магнитными полюсами с разной полярностью ($NS NS NS \dots$). В результате она совершает колебания с частотой $\nu_0 = v/a$ и ее обертонами (здесь a — период магнитной структуры и, следовательно, магнитного поля, а v — скорость частицы, которая, по предположению, лишь незначительно возмущается ондулятором). Поскольку частица ускоряется, она будет излучать, причем в силу эффекта Доплера под углом θ излучаются волны с частотой (обертонами пренебрегаем) $\nu = \nu_0 / \left(1 - \frac{v}{c} \cos \theta\right)$. Для ультрарелятивистских частиц излучение происходит в основном вперед (угол $\theta \sim mc^2/E$) на частоте $\nu \sim \nu_{\max} = \nu_0 / (1 - v/c) \approx 2\nu_0 (E/mc^2)^2$ с интенсивностью, также пропорциональной $(E/mc^2)^2$. Отсюда ясно, что излучение в ондуляторе можно применить для измерения отношения E/mc^2 , к чему мы и стремимся. Однако по абсолютной величине соответствующая интенсивность излучения в реально осуществимых условиях и для не очень высоких энергий весьма мала и ондуляторный счетчик в вакууме далеко не всегда может представлять интерес. Счетчик, который я пытался предложить, отличается от описанного тем, что ондулятор заполняется прозрачной средой с показателем преломления $n(\nu)$. Тогда колеблющийся заряд излучает волны с частотами $\nu = \nu_0 / \left|1 - \frac{v}{c} n(\nu) \cos \theta\right|$. При этом вблизи черенковского конуса, для которого $1 - \frac{v}{c} n(\nu) \cos \theta = 0$, частоты ν формально стремятся к бесконечности. Но фактически для достаточно высоких частот (например, в ультрафиолетовой части спектра) показатель преломления n уменьшается и, главное, появляется сильное поглощение. Поэтому излучение будет происходить на весьма больших по сравнению с ν_0 , но конечных частотах и для углов, близких к черенковскому углу. При этом интенсивность излучения в ряде случаев на много порядков выше, чем в вакууме, и соизмерима с интенсивностью черенковского излучения. Последняя же вполне достаточна для регистрации. Но если черенковское излучение в ультрарелятивистском случае от энергии не зависит, ондуляторное излучение зависит от энергии, причем в среде его интенсивность падает с ростом энергии. Тем не менее в широком интервале энергий ондуляторное излучение, если говорить об его интенсивности, можно было бы регистрировать без большого труда. При этом для отделения ондуляторного излучения от черенковского (оба типа излучения распространяются в направлении черенковского конуса или вблизи него) я думал использовать распределение интенсивности по образующим конуса: для черенковского излучения в изотропной среде эта ин-

тенсивность одинакова для всех образующих, т. е. на всем конусе. Интенсивность же ондуляторного излучения неравномерно распределена по конусу — она зависит от угла между нормалью к волне и магнитным полем в ондуляторе.

Казалось бы, все в порядке (интенсивность ондуляторного излучения была вычислена правильно) и «ондуляторный счетчик в среде» должен работать. Но он не будет работать, по крайней мере так, как это описано, по следующей причине. Дело в том, что нельзя рассматривать черепковское и ондуляторное излучение независимо друг от друга: движется ведь один и тот же заряд, одновременно излучающий все волны. При этом оказывается, что ондуляторное излучение как бы черпается из черепковского, т. е. их суммарная интенсивность в первом приближении не изменяется и остается равной интенсивности черепковского излучения, не зависящей от энергии. Это значит, что просто по распределению интенсивности по конусу (без высокого углового разрешения) отделить излучение обоих типов нельзя! Что же касается углового распределения и частотного спектра, некоторые отличия имеются, но они уже весьма трудно различимы и вряд ли поддаются достаточно простому и эффективному использованию (то же относится к случаю использования в ондуляторе оптически анизотропной среды) для измерения энергии частиц либо определения их массы или, точнее, отношения E/mc^2 . Этот пример неудачной попытки изобрести счетчик нового типа и, главное, несомненные недостатки ряда других известных предложений на этот счет повышают вероятность того, что переходные счетчики займут заметное место в арсенале методов физики высоких энергий.

ЕЩЕ РАЗ О ПЕРЕХОДНОМ ИЗЛУЧЕНИИ

Как в теории, так и в эксперименте внимание к переходному излучению концентрируется на случае плоской границы раздела двух сред, на пластинках и стопках пластинок. Но как ясно из физики явления и как уже упоминалось, переходное излучение будет возникать и в целом ряде других случаев. Так, если частица (источник) — будь то заряд или электрический диполь (и, конечно, любой другой электрический или магнитный мультиполь) — пролетает с постоянной скоростью через или вблизи каких-либо неоднородностей, металлических или диэлектрических, возникает какое-то переходное излучение.

Это легко понять, учитывая, что при прохождении через «неоднородность» поле частицы в вакууме или любой прозрачной среде, окружающей неоднородность, будет изменяться во времени, аналогично тому, как это имеет место при ускорении частицы (но с учетом ускорения также и ее «изображений»). То же произойдет и при пролете мимо неоднородности, но в пределах зоны формиро-

вания излучения, т. е. на расстояниях порядка длины волны (для релятивистских частиц это расстояние может сильно возрасти, но только в направлении, близком к направлению скорости частицы)

Последнее замечание относится, конечно, не только к переходному излучению. В частности, черепковское излучение возникает и в том случае, когда частица движется не в самой прозрачной среде, а в проделанном в ней канале, в щели или просто вблизи среды (но, повторяем, на расстояниях, меньших или порядка длины волны рассматриваемого излучения, так как при дальнейшем увеличении расстояния интенсивность излучения очень быстро уменьшается).

Другой интересный пример переходного излучения возникает в нестационарной среде — среде, свойства которой изменяются во времени. Здесь тоже возможны разные варианты, не говоря уже о средах, изменяющихся и во времени, и в пространстве, об одновременном появлении излучения разных типов и т. д. Но мы, естественно, остановимся лишь на простейшем и в каком-то смысле самом важном примере. Именно, рассмотрим однородную прозрачную среду с показателем преломления $n_1(v)$, в которой равномерно движется заряд. Пусть теперь свойства среды резко (в пределе — скачком) изменятся, так что показатель преломления станет равным $n_2(v)$. Добиться такого результата в принципе не так уж трудно — для этого достаточно резко повысить давление (в результате повышается плотность среды, а в силу этого и показатель преломления) или наложить на среду сильное электрическое поле. Легко видеть, что в результате изменения n во времени также появится переходное излучение. Действительно, для появления излучения, как мы уже объясняли, нужно, чтобы свойства среды изменялись вдоль траектории заряда или, в более общем виде, чтобы вдоль этой траектории изменялся параметр $vn(v)/c$. Но именно это и происходит в обсуждаемом сейчас случае: до скачка в показателе преломления n источник двигался в среде с $n = n_1(v)$, а после скачка — в среде с $n = n_2(v)$. Поэтому момент скачка играет роль, близкую (но, как показывает расчет, отнюдь не тождественную) к роли границы раздела двух сред.

Отметим также, что переходные эффекты отнюдь не сводятся только к появлению излучения. При переходе из одной среды в другую электромагнитное поле заряда, увлекаемое им вместе с собой, изменяется, и поэтому можно сказать, что изменяется масса частицы (по крайней мере часть этой массы имеет электромагнитное происхождение и зависит от проницаемости среды). Поэтому, даже в предположении о строгом постоянстве скорости частицы, при изменении $n(v)$ меняется ее полная и кинетическая энергия. Кроме того, в процессе излучения и изменения массы

(например, при пересечении границы раздела двух сред) на частицу действует сила радиационной реакции — электрическое поле, создаваемое самой частицей в точке ее пребывания. В результате баланс энергии соблюдается только при учете всех этих факторов — изменения кинетической энергии, реакции излучения и самого переходного излучения⁸).

ПЕРЕХОДНОЕ РАССЕЯНИЕ

Пусть в прозрачной среде распространяется «волна проницаемости», т. е. диэлектрическая проницаемость среды ϵ меняется, скажем, по синусоидальному закону, и бежит в среде с некоторой скоростью v_e . Примером может служить акустическая волна (волна сжатия), в которой изменяется плотность среды, а поэтому и ϵ . Поскольку в прозрачной среде $\epsilon = n^2$, волна проницаемости представляет собой одновременно и волну показателя преломления n . Поэтому (и в свете изложенного ранее) совершенно очевидно, что заряд, движущийся с постоянной скоростью «сквозь» волну проницаемости, будет испускать переходное излучение. Если волну проницаемости «остановить», т. е. рассматривать статическое волнообразное изменение ϵ , такое переходное излучение вполне аналогично возникающему в стопке пластинок. (Переходное излучение в стопке пластинок и вообще в периодической среде обладает рядом специфических черт, что можно подчеркнуть, называя его резонансным переходным излучением.) С другой стороны, для бегущей волны проницаемости переходное излучение аналогично известным процессам рассеяния волн одного типа с их трансформацией в волны другого типа.

В данном случае можно сказать, что волна проницаемости рассеивается на заряде с превращением (конечно, частичным) в электромагнитные волны (такой процесс мы называем переходным рассеянием).

Если для движущегося заряда можно, таким образом, примерно с равным правом говорить как о резонансном переходном излучении, так и о переходном рассеянии, для покоящегося заряда именно представление о рассеянии выступает на передний план. Собственно, сначала может вообще возникнуть сомнение, будет ли покоящийся (закрепленный) заряд рассеивать волны проницаемости. Легко понять, однако, что такое рассеяние должно возникать, хотя его природа и не имеет прямого отношения к механизму переходного излучения (поэтому термин переходное рассеяние, которым мы будем пользоваться и для неподвижного заряда, возникает лишь по аналогии со случаем переходного рас-

⁸ См. Гинзбург В. Л., Цытович В. Н. — ЖЭТФ, 1973, т. 65, с. 132, а также УФН, 1978, т. 126, с. 553 и цитированную там литературу.

сеяния на движущемся заряде). Действительно, неподвижный заряд создает вокруг себя некоторую статическую поляризацию среды, но, конечно, никакого электромагнитного излучения не испускает. Однако при падении на заряд волны проницаемости в среде вблизи заряда возникает также соответствующая переменная поляризация (она изменяется, очевидно, с частотой волны проницаемости). А значит, возникнет и рассеянная (исходящая из области вблизи заряда) электромагнитная волна (рис. 7).

Любопытно, что такой эффект в случае плазмы, по сути дела, был известен и ранее, хотя его природа и оставалась не вполне ясной. Последнее объясняется, видимо, тем, что в плазме заряды не закреплены, а могут почти свободно двигаться. Поэтому под действием так называемых плазменных волн — продольных волн, могущих распространяться в плазме, — заряды колеблются и

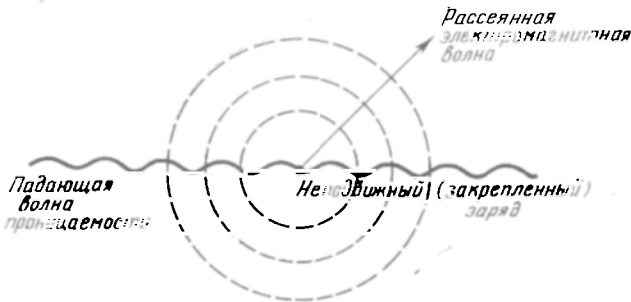


Рис. 7. Переходное рассеяние.

возникает рассеяние электромагнитных волн, обусловленное колебательным движением, скажем, электронов. Но одновременно будет происходить и переходное рассеяние. При этом волны обоих типов (от обычного и от переходного рассеяния) интерферируют, что еще больше усложняет картину. В результате при рассеянии плазменных волн на покоящихся (без учета действия волны) электронах полная интенсивность рассеянных электромагнитных (поперечных) волн равна лишь одной четверти от интенсивности обычного рассеяния на свободных электронах. При рассеянии же на введенном в плазму позитроне интенсивность будет в $\frac{3}{4}$ раза выше, чем при рассеянии на свободном позитроне (или электроне). При рассеянии на ионах обычное рассеяние ничтожно из-за большой массы иона (интенсивность обычного рассеяния, связанного с колебаниями частицы в поле падающей волны, обратно пропорциональна квадрату массы рассеивающей частицы). Переходное же рассеяние вообще не зависит от массы частицы и поэтому на однозарядном ионе такое же, как на электроне (если не учитывать его

движения). Отсюда ясно, что рассеяние плазменных (продольных) волн на ионах — почти чисто переходное.

Автор не был бы удивлен, если бы переходное рассеяние представило интерес не только в плазме, но, например, при рассеянии акустических или, особенно, ударных волн в каких-либо других средах, содержащих вкрапленные заряды (ионы) или области, поляризованные внешним статическим электрическим полем. В особом рассмотрении нуждается случай, когда рассеивающий заряд находится вблизи поверхности тела.

Аналогом переходного рассеяния может служить трансформация гравитационных волн в электромагнитные, происходящая уже в вакууме при наличии заряда или вообще какого-либо внешнего источника электромагнитного поля. Эта аналогия, кстати, сразу же пришла в голову, когда в одном американском журнале в 1973 г. появилась статья, в которой возникновение электромагнитного излучения от неподвижного заряда, находящегося в переменном гравитационном поле, рассматривалось как не имеющее «классического аналога».

Конкретно, в этой работе заряд считался помещенным в центре масс двойной звезды и поэтому оставался неподвижным. Электромагнитное же излучение возникает в связи с тем, что с точки зрения общей теории относительности электромагнитное поле порождает гравитационное и, наоборот, гравитационное поле влияет на электромагнитное. Поэтому вращающиеся массы (звезды) делают статическое сферически-симметричное поле заряда в пустоте (и в отсутствие гравитации) уже не статическим и не сферически-симметричным. Ситуацию вполне можно описать (и это давно известно), считая, что гравитационное поле влияет на диэлектрическую проницаемость вакуума. С точки зрения влияния на электромагнитные явления это эквивалентно влиянию на проницаемость некоторой среды. Коротко говоря, излучение электромагнитных волн зарядом, покоящимся в центре инерции двойной звезды, аналогично излучению заряда, закрепленного в среде, которая возмущается в результате движения других зарядов.

Гравитационная волна представляет собой переменное во времени и в пространстве возмущение гравитационного поля и при падении на заряд или любую область с некоторым электромагнитным полем будет вызывать в этой области как бы изменение диэлектрической проницаемости. Таким образом, гравитационная волна уже в вакууме играет такую же роль, как волна проницаемости в среде. В результате вблизи источника статического электромагнитного поля появится переменная электрическая (или магнитная) поляризация и образуется расходящаяся (рассеянная) электромагнитная волна. Этот эффект, как и электромагнитное переходное рассеяние, мы рассмотрели вместе с В. Н. Цы-

товичем⁹⁾. Рассчитан был, в частности, коэффициент трансформации гравитационной волны в электромагнитную на заряде и на магнитном моменте (рис. 8). Последний случай был интересен с точки зрения возможных астрофизических приложений, поскольку большим магнитным моментом обладает ряд звезд и, в частности, он имеется у пульсаров.

Коэффициент трансформации, однако, невелик и в этом случае, а главное, гравитационные волны, испускаемые во всех реальных ситуациях (тесные двойные звезды, несимметричный коллапс звезды, столкновение двух звезд и т. п.), являются слабыми (имеются в виду расходящиеся волны, рассматриваемые на расстояниях до рассеивающих их намагниченных звезд). Утверждение о слабости гравитационной волны означает, что гравитационное возму-

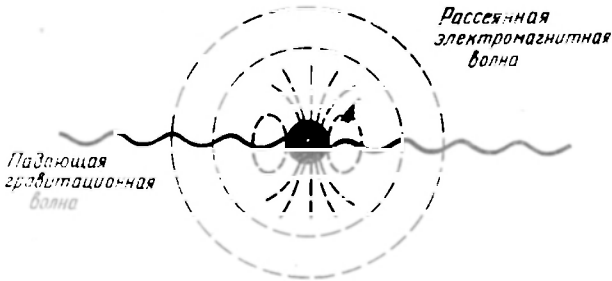


Рис. 8. Аналог переходного рассеяния — рассеяние гравитационной волны на магнитной звезде (в центре); при этом гравитационная волна превращается в электромагнитную.

щение в волне ничтожно мало по сравнению с единицей — условной мерой гравитационного поля в пространстве без гравитационных волн. В конечном счете слабость встречающихся в природе гравитационных волн обусловлена крайней слабостью гравитационного взаимодействия по сравнению, скажем, с электромагнитным (например, гравитационное притяжение между протоном и электроном примерно в $3 \cdot 10^{39}$ раз меньше электростатического притяжения между этими же частицами). Поэтому гравитационные волны пока и не удалось зарегистрировать, хотя, по всей вероятности, в будущем это станет возможным и приведет к рождению еще одного метода в астрономии, а именно к появлению астрономии гравитационных волн. Но это уже другая тема, здесь же хотелось лишь обратить внимание на гравитационно-электромагнитный аналог переходного рассеяния волн гравитационности в среде.

⁹⁾ Гинзбург В. Л., Цытович В. Н. — ЖЭТФ, 1973, т. 65, с. 1818; Радиофизика, 1975, т. 18, с. 173; УФН, 1978, т. 126, с. 553.

Имеются и другие аналоги. Например, в твердом теле продольные звуковые волны должны давать рассеянные поперечные акустические волны на статических деформациях. Впрочем, такая задача, насколько нам известно, детальнее не рассматривалась. Вообще, переходное рассеяние и аналогичные эффекты еще далеко не полностью исследованы.

**ПЕРЕХОДНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ
И ПЕРЕХОДНОЕ РАССЕЯНИЕ
В ВАКУУМЕ ПРИ НАЛИЧИИ СИЛЬНОГО
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ**

В качестве иллюстрации или комментария к последнему замечанию упомяну о лишь недавно рассмотренных электромагнитных переходном излучении и переходном рассеянии, которые могут возникать в вакууме и при отсутствии гравитационного поля, но для достаточно сильных электромагнитных полей¹⁰⁾. Дело в том, что электродинамика вакуума, согласно квантовой теории поля, является нелинейной. Это значит, например, что при наличии двух источников поля (скажем, двух зарядов) суммарное поле не равно сумме полей от каждого из источников в отдельности. Другими словами, нарушается принцип суперпозиции, столь характерный для линейной электродинамики и вообще линейных систем. Нелинейность вакуума связана физически с возможностью рождения электронно-позитронных пар (а при больших энергиях и в более сильных полях с рождением также пар других частиц, в первую очередь μ^\pm -мезонов, π^\pm -мезонов и т. д.). Правда, реальная пара e^\pm (электрон e^- и позитрон e^+) может быть порождена только частицей (в том числе фотоном), имеющей энергию, превосходящую $2m_e c^2 \approx 1$ МэВ. Однако даже при меньших энергиях рождаются и вновь исчезают «виртуальные» пары, поскольку в квантовой теории закон сохранения энергии относится лишь к окончательным продуктам реакции (в данном случае — реакции рождения пары частиц), а не к промежуточным состояниям. Существование виртуальных пар приводит к поляризации вакуума внешним полем подобно тому, как поляризация атомарной среды полем внешнего заряда или распространяющейся электромагнитной волной связана с перераспределением зарядов в атомах под влиянием поля заряда или поля волны. Коротко говоря, в достаточно сильном электромагнитном поле вакуум поляризуется, ведет себя как среда. Точнее, поляризация вакуума происходит в любом поле, но в слабом поле она ничтожно мала, причем характерная напряженность сильного электрического (E) или магнитного (B)

¹⁰⁾ См. Гинабург В. Л. и Цытович В. Н. — ЖЭТФ, 1978, т. 74, с. 1621; ФН, 1978, т. 426, с. 553.

поля равна

$$E_c = \frac{m^2 c^3}{e \hbar} = 4,4 \cdot 10^{13} \text{ ед. СГСЭ} = 1,32 \cdot 10^{13} \text{ В/м,}$$

$$B_c = \frac{m^2 c^3}{e \hbar} = 4,4 \cdot 10^{13} \text{ Гс.}$$

В полях E или B , сравнимых с E_c или B_c , нелинейность вакуума является уже довольно сильной, в слабых же полях (т. е. при $E \ll E_c$ и $B \ll B_c$) нелинейные эффекты определяются значениями параметров $(E/E_c)^2$ и $(B/B_c)^2$. Даже в поле $B \sim 10^6$ Гс, еще достижимом в лабораторных условиях, отношение $(B/B_c)^2 \sim 10^{-16}$. В очень сильном по лабораторным масштабам поле $E \sim 10^9$ В/м отношение $(E/E_c)^2 \sim 10^{-18}$. Поэтому, разумеется, в «обычных» условиях нелинейностью вакуума действительно можно пренебречь. Этим и объясняется тот факт, что о нелинейности вакуума до недавнего времени не так уж часто упоминали (если не говорить о физике элементарных частиц), хотя само ее существование стало в принципе ясно еще в начале 30-х годов. Сейчас положение несколько изменилось. Достаточно сказать, что вблизи пульсаров — намагниченных нейтронных звезд (пульсары были открыты в 1967 — 1968 гг.) напряженность магнитного поля вполне может достигать значения $B \sim 5 \cdot 10^{12}$ Гс, когда $(B/B_c)^2 \sim 10^{-2}$. Что касается электрического поля, то оно может быть сравнимо с E_c в достаточной близости от тяжелых атомных ядер. Соответствующие нелинейные эффекты в настоящее время обсуждаются и в известных пределах доступны исследованию.

В свете сказанного не только ясна физически, но и представляет интерес возможность появления уже в вакууме как переходного излучения, так и переходного рассеяния.

Частица, движущаяся в вакууме с постоянной, заданной скоростью, в неоднородном электромагнитном поле при учете нелинейности вакуума движется как бы в неоднородной среде и, следовательно, должно иметь место переходное излучение. Если же мы рассмотрим закрепленный заряд (фактически речь может идти о достаточно тяжелом атомном ядре, а формально о заряде с бесконечно большой массой), на который падает электромагнитная волна, то и в вакууме происходит переходное рассеяние. Собственно, такой процесс рассеяния фотонов на неподвижном заряде (кулоновском центре) рассматривался уже давно, но в условиях, когда частота рассеянных фотонов (воли) равна частоте падающих (так называемое дельбрюксовское рассеяние). В этом случае, однако, рассеяние происходит в основном на малых расстояниях от рассеивающего заряда, когда для количественного анализа процесса необходим довольно громоздкий квантовоэлектродинамический расчет. Если же рассмотреть рассеяние с удвоением частоты (при этом, на квантовом языке, два падающих фотона превраща-

ются в один рассеянный), то роль играют длинные волны и процесс вполне аналогичен классическому переходному рассеянию на заряде в среде. То же справедливо в отношении рассеяния волны на заряде, происходящего хотя и без изменения частоты, но в присутствии сильного внешнего магнитного поля. В общем можно сказать, что «идеология» и «язык», основанные на представлениях о переходном излучении и о переходном рассеянии, имеют широкое физическое значение, помогают понять разнообразный круг явлений.

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Наибольшее внимание в физике всегда привлекали и привлекают вопросы и проблемы, требующие для своего решения выхода за пределы уже известных представлений или, во всяком случае, выдвижения новых глубоких идей. Сегодня к числу таких вопросов относятся понимание строения и взаимодействия различных частиц, например протона, а также многие другие проблемы, которые связаны с физикой высоких энергий, релятивистской квантовой теорией и т. п. Хотя известная выделенность этой области физики, где сами принципы еще не установлены и господствует подлинная таинственность, совершенно несомненна, но правда и то, что это обстоятельство не дает еще никаких оснований рассматривать всю остальную физику как собрание задач второго сорта. Например, микротерию сверхпроводимости не удавалось построить целые десятилетия, вплоть до 1957 г., хотя и не было никаких сомнений в том, что для решения этой задачи достаточно нерелятивистской квантовой механики, созданной еще в двадцатые годы. Впрочем, микротерия сверхпроводимости, как и теория фазовых переходов, отличается особой идейной и технической трудностью. Этого нельзя, однако, сказать об излучении частиц при сверхсветовой их скорости, о работе мазеров и лазеров, нелинейной оптике, теории полупроводников и о многих других вопросах. Тем не менее понадобились долгие годы, прежде чем были найдены решения относящихся к этим областям задач, хотя соответствующий физический фундамент был заложен очень давно. Переходное излучение и переходное рассеяние также представляют собой, пусть и более скромные, примеры такого же типа.

Казалось бы, изучить некоторые из этих эффектов можно было чуть ли не сто лет назад, и уж, во всяком случае, в начале нашего века. Но тот факт, что этого не произошло, не может быть в целом случайностью, а объясняется тем, что раньше «плоды еще не созрели». Например, нельзя или трудно было провести соответствующие эксперименты. А сколько таких «плодов» из области классической физики или, во всяком случае, физики с уже освоенными

принципами еще и сегодня незрело или даже вполне съедобно, но прячется в густой листве? Опыт прошлого, в том числе совсем близкого к нашим дням, свидетельствует, что еще немало нового и интересного может быть найдено и в электродинамике (включая оптику), и в области нерелятивистской квантовой механики, и в общей теории относительности.

Большинство физиков сочтут, вероятно, эти замечания совершенно тривиальными, с чем я вполне согласен. Но они сделаны, чтобы в подлинном блеске и сиянии физики высоких энергий и связанных с ней фундаментальных проблем вся остальная физика не показалась тем, кто с ней мало знаком, каким-то потухающим светилом.

О сверхсветовых источниках излучения

Скорость света в вакууме $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с является предельной, самой большой скоростью, встречающейся в природе. Так можно было бы сформулировать «в нулевом приближении» вывод, следующий из теории относительности и подтвержденный на опыте. Давным давно известно, однако, что уже «в первом приближении» приведенное утверждение неверно или, во всяком случае, нуждается в уточнении. Простейший пример — фазовая скорость света $c_f = c/n$, которая может быть сколь угодно велика при $n \rightarrow 0$ (среды с показателем преломления $n < 1$, разумеется, вполне реальны — достаточно вспомнить о плазме, где в определенных условиях $n = \sqrt{1 - \omega_p^2/\omega^2}$, $\omega_p^2 = 4\pi e^2 N/m$). В связи с этим и некоторыми другими примерами уточняют, что меньше скорости света должна быть скорость сигналов, возмущений, частиц, источников излучения и т. д., а не, скажем, скорость «перемещения» постоянной фазы (т. е. фазовая скорость). Но и такие утверждения нуждаются в уточнении, а неверно понятые ведут к парадоксам и противоречиям. Скорость сигнала (дуга волн, светового импульса), например, считается обычно равной групповой скорости

$$v_{гр} = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c}{d(n\omega)/d\omega}$$

(ограничиваемся сейчас, исключительно для простоты, случаем изотропной среды, где $k = \omega n(\omega)/c$ и скорость $v_{гр}$ направлена по волновому вектору k). Но эта скорость $v_{гр}$ вполне может оказаться превосходящей c , например, в области аномальной дисперсии, где $dn/d\omega < 0$. Разрешение такого кажущегося противоречия было достигнуто уже много десятилетий назад [1] на основе анализа распространения сигнала в диспергирующей среде. Дело в том, что понятие о групповой скорости $v_{гр} = d\omega/dk$ имеет точный смысл, вообще говоря, лишь при пренебрежении расплыванием (деформацией) сигнала и его поглощением (подробнее см. [1 — 4]). Поэтому, в частности, в области ярко выраженной ано-

мальной дисперсии, где всегда имеется поглощение, скорость основной части сигнала отлична от $v_{гр}$. Далее, как можно показать, скорость переднего фронта сигнала строго равна c . Если не говорить о вычислении поля за фронтом (область «предвестника»), то сам сделанный вывод о скорости фронта ясен и без вычислений. В самом деле, разложение поля сигнала (дуга волн) в интеграл Фурье всегда будет содержать также весьма высокие частоты. Но при $\omega \rightarrow \infty$ (а практически уже в рентгеновской области) показатель преломления $n \rightarrow 1$, так как частицы среды не успевают реагировать на поле волны. Такие высокие частоты и образуют «предвестник» сигнала, движущийся со скоростью c . Другое дело, что для сигналов со сравнительно низкой несущей частотой ω_0 энергия, заключенная в «предвестнике», ничтожно мала. Основная часть, или «тело», сигнала при пренебрежении поглощением обычно движется как раз с групповой скоростью $v_{гр} = d\omega/dk$, но в тех случаях, когда $d\omega/dk > c$ (хотя и не только в них), сигнал сильно деформируется, понятие о групповой скорости становится неприменимым и, во всяком случае, передачи энергии со скоростью, большей c , не происходит.

Как мы специально подчеркивали, сказанное давно и хорошо известно. Но любопытно, что какое-то гипнотическое влияние утверждения о невозможности превзойти скорость света в вакууме c продолжает существовать и в наше время.

Примером может служить широко распространенное мнение о невозможности наблюдать эффект Вавилова — Черепкова и аномальный эффект Доплера в вакууме или средах с $n < 1$ (в частности, для поперечных волн в изотропной плазме). Другой пример связан с продолжающейся дискуссией о расстоянии до квазаров. Определить это расстояние действительно не легко, ибо единственный известный прямой метод в таких случаях связан с измерением красного смещения спектральных линий. Считая это смещение космологическим (связанным с расширением Вселенной), мы получаем соответствующее расстояние, но противники такой интерпретации опираются на отсутствие независимого доказательства космологической природы красного смещения для квазаров. В космологической природе красного смещения для квазаров сейчас трудно или даже невозможно сомневаться, но не в этом сейчас дело. Интересно, что в качестве аргумента против использования космологического расстояния до квазаров в литературе упоминались данные об изменениях структуры квазаров (радиоисточников), происходящих со скоростью $u > c$. Схематизируя, представим себе источник излучения (скажем, радиоизлучения), угловой размер которого возрастает со временем с угловой скоростью $\Omega = d\varphi/dt$. Именно угол φ , под которым виден источник с Земли, и угловая скорость Ω являются наблюдаемыми величинами. Если расстояние до источника равно R , то

скорость изменения границ источника на небесной сфере $u_{\perp} = \Omega R$. Как раз эта перпендикулярная лучу зрения скорость иногда оказывается превосходящей скорость c при использовании космологического расстояния R (см. [5]). Исходя из предположения, что обязательно $u < c$, и делалось заключение об относительной близости квазаров (в этом случае красное смещение в их спектрах могло бы обуславливаться гравитационным эффектом или большой скоростью квазара относительно находящегося вблизи него галактик).



Рис. 1. К вычислению «кажущейся» (наблюдаемой) скорости расширяющейся оболочки.

Фактически, однако, наблюдаемая «кажущаяся» скорость $u_{\perp} = \Omega R$ может быть сколь угодно большой и никакие ограничения на R отсюда без дальнейшего не следуют. Действительно, полностью опираясь на теорию относительности и отвлекаясь от всяких гипотетических (и, по всей вероятности, недопустимых) возможностей движения объектов со скоростью $v > c$ (тахiony и т. п.), мы вместе с тем не имеем оснований отождествлять скорость объекта v и упомянутую скорость u_{\perp} . Рассмотрим, например, какой-то экран (им может быть оболочка сверхновой звезды, оболочка квазара и т. п.), освещаемый источником излучения и видимый (наблюдаемый) в рассеянном излучении или излучении люминесценции. Совершенно ясно тогда, что экран может «вспыхнуть» одновременно во всех точках, а в этом случае скорость $u_{\perp} \rightarrow \infty$. Освещая экран заданным образом, начиная с какой-то его точки, можно получить и любое другое значение «скорости» расширения светящегося участка экрана. Менее тривиальным примером получения «кажущихся» сверхсветовых скоростей u может служить наблюдаемая скорость расширения некоторой оболочки.

Так, пусть наблюдается снаружи поверхность некоторой сферической оболочки (скажем, продуктов взрыва), движущейся со скоростью v . Взрыв пусть произошел в точке O (рис. 1) в момент t_0' , а сигнал принимается в точке наблюдения P в момент $t = 0$. Очевидно, $t_0' = -R/c$, где R — расстояние между точками O и P , а влиянием среды на распространение сигнала (свет, радиоволны) считается возможным пренебречь. Найдем теперь геометрическое место точек («видимую» оболочку), от которых излучение достигает наблюдателя в какой-то момент $t > 0$. Точки на этой «видимой» оболочке характеризуем их расстоянием r от точки O и углом ϑ между r и линией OP (см. рис. 1). Время излучения t' , отвечающее точке (r, ϑ) , и время наблюдения t связаны

соотношением

$$t' = t - \frac{R'}{c} \approx t - \frac{R}{c} + \frac{r}{c} \cos \vartheta,$$

где $\bar{R}' = \bar{R} - r \cos \vartheta$, поскольку предполагается, что $\bar{R} \gg r$. С другой стороны, $t' - t'_0 = t' + R/c = r/v$, так как путь r оболочка проходит со скоростью v . Комбинируя оба выписанных выражения для t' , получаем

$$r = \frac{vt}{1 - \frac{v}{c} \cos \vartheta}. \quad (1)$$

Множитель $[1 - (v/c) \cos \vartheta]^{-1}$ здесь такой же, как в формуле для эффекта Доплера, и имеет ту же природу — он связан с конечностью скорости распространения света c . Вследствие конечности скорости света, в обсуждаемом случае в момент наблюдения t свет (радиоволны) приходит в точку наблюдения от точек оболочки, которым соответствует разное время $t' - t'_0$, прошедшее после момента взрыва $t'_0 = -R/c$. Ситуация здесь аналогична имеющей место при наблюдении (фотографировании) быстро движущегося объекта, когда также нужно различать форму объекта в момент его наблюдения (прихода лучей) в данном месте и форму объекта при данном времени излучения, соответствующем, скажем, одновременным событиям в рассматриваемой (лабораторной) системе отсчета (см., например, [6, 7]). Возвращаясь к расширяющейся оболочке, найдем «кажущуюся» (видимую) скорость ее расширения в направлении, перпендикулярном к лучу зрения. Очевидно (см. (1)),

$$u_{\perp} = \frac{dr}{dt} \sin \vartheta = \frac{v \sin \vartheta}{1 - \frac{v}{c} \cos \vartheta}, \quad \Omega = \frac{d\vartheta}{dt} = \frac{u_{\perp}}{R}. \quad (2)$$

Скорость u_{\perp} максимальна при $du_{\perp}/d\vartheta = 0$ для некоторого угла $\vartheta_{\max} = \arccos(v/c)$, причем

$$u_{\perp \max} = \frac{v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad \Omega_{\max} = \frac{v}{R \sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (3)$$

Сама скорость

$$u = \frac{dr}{dt} = \frac{v}{1 - \frac{v}{c} \cos \vartheta}$$

максимальна при $\vartheta = 0$, причем $u_{\max} = v/(1 - v/c)$. Ясно, что кажущаяся скорость $u_{\perp \max}$ может быть больше c , хотя скорость оболочки $v < c$. Правда, это имеет место, только если скорость v достаточно велика, т. е. эффект является релятивистским.

Может ли не только кажущаяся (в указанном смысле), но и реальная скорость источника излучения превосходить скорость

света? На этот вопрос также следует дать положительный ответ. В качестве доказательства достаточно, собственно, привести пример бегущего по удаленному экрану «зайчика» от вращающегося источника. Скорость «зайчика» равна

$$v = \Omega R, \quad (4)$$

где Ω — угловая скорость источника («маяка») и R — расстояние от источника до экрана. Модель маяка является сейчас об-

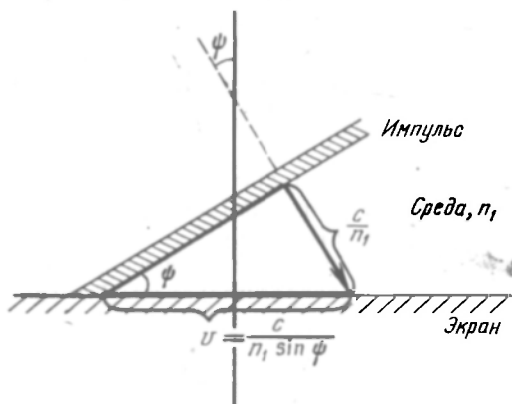


Рис. 2. Падение импульса на плоский экран.

щепринятой для пульсаров, причем в этом случае скорость зайчика на Земле для всех известных пульсаров превосходит скорость света c . Для наиболее известного пульсара PSR0532 в Крабовидной туманности $\Omega \approx 200 \text{ с}^{-1}$ и $R \approx 6 \cdot 10^{21} \text{ см}$ (1500 нс), откуда $v = \Omega R \approx 1.2 \cdot 10^{22} \text{ см/с}$ (!) Если вращать луч лазера или электронный пучок с угловой скоростью $\Omega = 10^5 \text{ с}^{-1}$, то $v = \Omega R > c$ уже для расстояний $R > 3 \text{ км}$.

Самой простой в известном отношении моделью или примером движения со сверхсветовой скоростью может служить световой импульс из плоских волн, наклонно падающий на некоторую плоскую границу раздела (экран) [8]. Если угол падения волны на экран обозначить через ψ (очевидно, ψ есть угол между волновым вектором k в импульсе и нормалью к экрану; рис. 2), то сечение импульса экраном (т. е. световое пятно на экране — зайчик) перемещается по этому экрану со скоростью

$$v = \frac{c}{n_1 \sin \psi}, \quad (5)$$

где $n_1 > 1$ — показатель преломления среды над экраном, которая для простоты считается недиспергирующей (по сути дела для нас существенно лишь, что скорость светового импульса счи-

тается равной c/n_1). Очевидно, скорость светового пятна (или, точнее, полоски) при уменьшении угла падения ψ всегда можно сделать больше c , а в вакууме она вообще превышает c при всех углах ψ , так как в этом случае

$$v = \frac{c}{\sin \psi}. \quad (6)$$

Роль светового импульса может, конечно, играть поток электронов, движущихся нормально к фронту потока со скоростью $u < c$; тогда

$$v = \frac{u}{\sin \psi}, \quad (7)$$

и сверхсветовая скорость пятна также всегда в принципе достижима. Более того, скорость v во всех случаях (5) — (7) можно сделать сколь угодно большой — при приближении к нормальному падению (при $\psi \rightarrow 0$) скорость $v \rightarrow \infty$. Последнее вполне понятно, так как при нормальном падении импульс пересекает экран одновременно по всей его поверхности. Механическим аналогом импульса, падающего на экран, служат ножницы (роль зайчика в этом случае играет точка пересечения образующих ножницы двух лезвий).

Для вращающегося источника, упомянутого выше, как и для пересекающего экран импульса, большая скорость зайчика достигается за счет уменьшения угла между поверхностью постоянной фазы (волновым фронтом) и экраном. В самом деле, рассматривая для простоты цилиндрический источник в вакууме, вращающийся с угловой скоростью Ω , запишем поле в волновой зоне в виде *)

$$E = \sum_{s=1}^{\infty} E_s \frac{1}{\sqrt{r}} \exp is \left(\frac{\Omega}{c} r + \varphi - \Omega t \right). \quad (8)$$

Поверхность постоянной фазы определяется уравнением

$$\frac{\Omega}{c} r + \varphi - \Omega t = \text{const}, \quad (9)$$

или

$$r = \text{const} + c \left(t - \frac{\varphi}{\Omega} \right). \quad (10)$$

Уравнение (10) есть уравнение спирали. На удаленном цилиндрическом экране радиуса R поверхность равной фазы пере-

*) Эта формула дает решение скалярной задачи. Функция E удовлетворяет волновому уравнению при $r > r_0$ и граничному условию $E = f(\varphi - \Omega t)$ на поверхности цилиндра $r = r_0$. Таким образом, в системе координат, вращающейся вокруг оси z со скоростью Ω , поле является статическим.

секается с экраном по образующей цилиндра, для которой

$$R = \text{const} + c \left(t - \frac{\varphi_0}{\Omega} \right), \quad (11)$$

причем угол φ_0 , определяющий рассматриваемую образующую, меняется со временем по закону $d\varphi_0/dt = \Omega$. Иными словами, линия пересечения («зайчик») бежит по экрану со скоростью

$$v = R \frac{d\varphi_0}{dt} = \Omega R. \quad (12)$$

Таким образом, мы более формально получили очевидный (или, во всяком случае, хорошо известный) результат (4). Существенно, что угол ψ между поверхностью равной фазы и экраном определяется из условия (рис. 3)

$$\text{tg } \psi = - \frac{dr}{R d\varphi} = \frac{c}{\Omega R} = \frac{c}{v}. \quad (13)$$

Для малых углов ψ , разумеется, $\text{tg } \psi \approx \sin \psi \approx \psi$ и $v \approx c / \sin \psi$ в согласии с (6). Другими словами, как и отмечалось выше, большая скорость зайчика обусловлена (например, при $v \gg c$) малостью угла ψ между волновым фронтом и экраном.

Выше фактически не делалось предположений о природе рассматриваемого поля, и лишь (да и то для простоты) скорость его распространения считалась равной c . Отсюда ясно, что зайчики со

Рис. 3. «Зайчик» от вращающегося источника (маяка) на удаленном сферическом или цилиндрическом экране.

скоростью $v > c$ можно получить не только в случае электромагнитных волн, но и для гравитационных волн. Пользуясь лучевой трактовкой, приходим к возможности иметь зайчики произвольной скорости как для нейтрино (скорость c), так и для любых других частиц (скорость $u < c$)^{*}. То обстоятельство, что появление скорости $v > c$ для зайчиков не противоречит теории относительности, не может вызывать и тени сомнений. Достаточно сказать, что этот результат получается для вполне реальных примеров, например при падении импульса света или электронов на экран (см. рис. 2). В качестве дополнения все же

^{*} При испускании вращающимся источником частиц со скоростью u траектория частиц такова: $r = r_0 + u(t - t_0)$, $\varphi = \Omega t_0$, откуда $r = r_0 + u(t - \varphi/\Omega)$, причем t_0 — момент испускания.

отметим, что применение скорости света для синхронизации часов, обычно используемое при изложении теории относительности, во-первых, является не единственным, а лишь одним из возможных методов. Во-вторых, такой метод действительно в большинстве случаев наиболее удобен и целесообразен не в связи с тем, что скорость света является максимально возможной, а

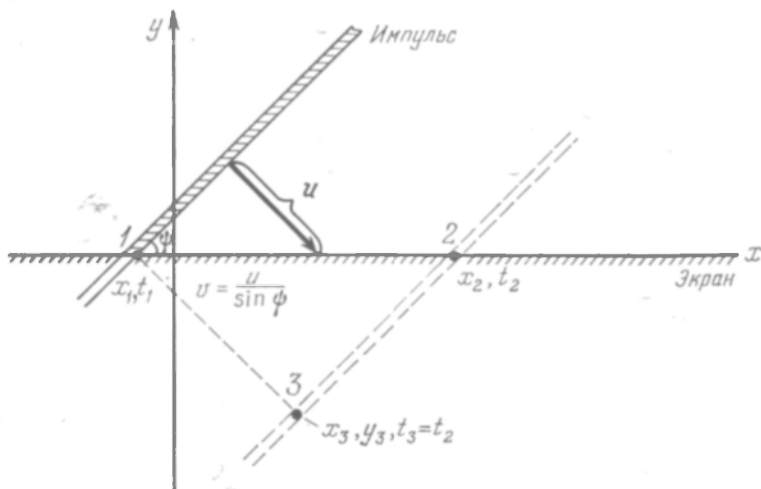


Рис. 4. Пересечение импульсом плоского экрана.

потому, что эта скорость универсальна — одинакова во всех инерциальных системах отсчета (разумеется, при условии выбора во всех системах одинаковых масштабов и часов). Наконец, когда все же говорят о скорости света в вакууме c как о максимально возможной, то имеют в виду скорость передачи возмущений, взаимодействий или «сигналов». Подобное утверждение действительно справедливо (по крайней мере, в рамках теории относительности и всей известной нам физики). Световые и иные пятна и зайчики, о которых мы говорили, хотя и могут двигаться со скоростью $v > c$, но никак не нарушают сделанного утверждения, т. е. их нельзя использовать для передачи сигнала со скоростью $v > c$. В самом деле, рассмотрим импульс (света, электронов), сечение которого экраном (зайчик) движется по экрану вдоль оси x со скоростью $v > c$ и достигает точек 1 и 2 с координатами x_1 и x_2 соответственно в моменты t_1 и t_2 (рис. 4). Очевидно, $x_2 = x_1 + v(t_2 - t_1)$ и при $v = u/\sin\psi > c$ события 1 и 2 разделены пространственноподобным интервалом, т. е. $(x_2 - x_1)^2 > c^2(t_2 - t_1)^2$. Возмущение («зарубка»), которое в точке 1 «наносится» на движущийся импульс, в момент t_2 окажется в точке

z с координатами $x_3 = x_1 + u \sin \psi (t_2 - t_1)$, $y_3 = u \cos \psi (t_2 - t_1)$, причем $(x_3 - x_1)^2 + y_3^2 = u^2 (t_2 - t_1)^2 \leq c^2 (t_2 - t_1)^2$. В точку же 2 это возмущение не попадает. Тем не менее, сверхсветовая скорость пятна (зайчика) ни в какой мере не является кажущейся, она столь же реальна, как и любая другая скорость макроскопического образования или тела.

Подчеркнем также, что сверхсветовые скорости зайчиков имеют другую природу, чем кажущиеся скорости типа $u_{\perp \max}$

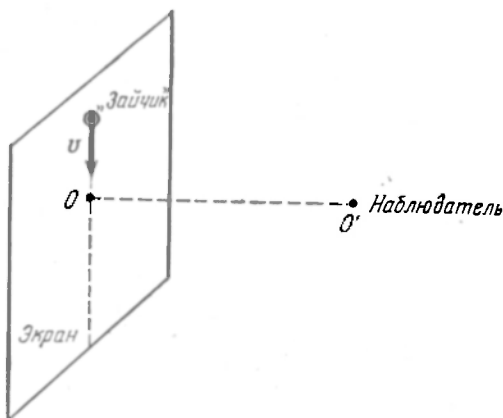


Рис. 5. Наблюдение «зайчика» на экране.

(см. (3)); скорость $u_{\perp \max}$ может превосходить c в связи с тем, что речь идет о наблюдении в данный момент t сигналов, испущенных неодновременно (см. выше). При этом важно запаздывание, обусловленное конечностью скорости распространения света. Учет запаздывания существенно сказывается, конечно, и на поведении зайчиков при их наблюдении в какой-либо точке. В качестве простейшего примера ограничимся здесь случаем светового зайчика, бегущего с постоянной скоростью v по плоскому экрану и наблюдаемому в точке O' (рис. 5). Под наблюдением здесь понимается прием света, испускаемого зайчиком в результате шероховатости экрана (т. е. в результате рассеяния) или вследствие люминесценции экрана при его освещении. Если $v \leq c$, то зайчик будет наблюдаться «обычным» образом, как бегущее по экрану сверху вниз пятно. Допустим теперь, что $v \rightarrow \infty$, т. е. весь след зайчика прочерчивается мгновенно. Тогда зайчик раньше всего будет замечен в точке O , ближайшей к O' (прямая OO' перпендикулярна к экрану). Затем наблюдатель увидит, очевидно, два зайчика, разбегающиеся от точки O в противоположных направлениях. При $c < v < \infty$ определенное время также могут наблюдаться два зайчика (см. также [7а]).

Вопрос о сверхсветовых источниках тесно связан с обсуждением эффекта Вавилова — Черепкова и эффекта Доплера. Дело в том, что простейшим является движение источника с постоянной скоростью (точнее, равномерное и прямолинейное движение в инерциальной системе координат, в которой при наличии среды эта среда покоится). В таких условиях для источника, обладающего некоторой собственной частотой ω_{00} , наблюдается эффект Доплера. Если же собственная частота равна нулю, как это имеет место для движущегося заряда или мультиполя, то может иметь место излучение Вавилова — Черепкова. Необходимым условием для существования этого излучения является, однако, требование, чтобы скорость источника v превосходила или, точнее, была не меньше фазовой скорости света c_Φ для излучаемых волн. В этих волнах волновой вектор k составляет со скоростью v угол θ_0 , причем

$$\cos \theta_0 = \frac{c_\Phi}{v}. \quad (14)$$

Разумеется, упомянутое условие существования излучения

$$v \geq c_\Phi \quad (15)$$

непосредственно следует из (14).

В акустике излучение источника, движущегося со скоростью, большей скорости звука, давно известно (волны Маха); то же можно сказать о различных волнах на поверхности жидкости. В электродинамике излучение равномерно движущегося источника (например, движущегося заряда) как раз и представляет собой эффект Вавилова — Черепкова, открытый только в 1934 г. Теория этого эффекта, построенная в 1937 г. Таммом и Франком [9], приводит, естественно, к условию излучения (14), а для энергии, испускаемой зарядом q в единицу времени, дает выражение

$$\frac{dW}{dt} = \frac{q^2 v}{c^2} \int_{c/n(\omega) v \leq 1} \left(1 - \frac{c^2}{n^2(\omega) v^2}\right) \omega d\omega, \quad (16)$$

где $n(\omega)$ — показатель преломления на частоте ω для рассматриваемой прозрачной изотропной среды (как известно, фазовая скорость волн $c_\Phi = c/n(\omega)$).

Поскольку условие излучения (14) справедливо для волн любой природы, ясно, что оно носит кинематический (интерференционный) характер. Действительно, согласно принципу Гюйгенса, каждая точка среды на пути излучателя служит источником вторичных волн. Огибающая этих волн имеет характер конуса, раствор которого определяется углом $\theta_0 = \arccos(c_\Phi/v)$ (см. рис. 6, на котором расстояние OO' равно v — пути, пройденным источником за единицу времени; за это же время волновой фронт проходит путь $c_\Phi = c/n$). Известно, что именно использование прин-

ципа Гюйгенса и привело к получению условия (14) для черепковского излучения [10]. Разумеется, соответствующее условие интерференции автоматически учитывается при электродинамическом расчете, в котором используются выражения для поля излучения [9]. Условие излучения (14) или, конкретно, условие черепковского излучения

$$\cos \theta_0 = \frac{c}{n(\omega) v} \quad (17)$$

можно получить и другими способами: как условие резонанса $kv - \frac{\omega}{c} n(\omega) v \cos \theta = \omega$ между действующей «силой», связанной с наличием источника, и осцилляторами поля [11, 12], а также из

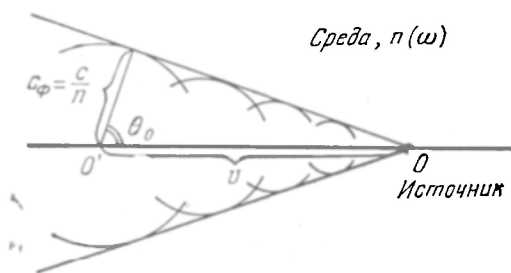


Рис. 6. Образование черенковского конуса.

законов сохранения энергии и импульса (в последнем случае удобна квантовая формулировка) [13, 12]. Условие (14) (или (17)) сохраняется не только в случае безграничной среды, но и при движении источника в каналах, в щелях, а также параллельно границе раздела двух сред. В анизотропной среде это условие относится к каждой из нормальных волн, причем показатель преломления для нормальной волны $n_l(\omega)$ зависит также от углов между скоростью v и, например, осями кристалла. Что касается интенсивности излучения, то она может вычисляться разными методами [9—13] и, главное, зависит от характера источника, причем формула (16) относится только к случаю заряда, движущегося в безграничной изотропной среде. Ряд выражений для интенсивности излучения для диполей и других мультиполей, а также при наличии границ можно найти в [12 — 16].

Из условия излучения (17) или из (15) ясно, что эффект Вавилова — Черепкова возможен, лишь если

$$v \geq \frac{c}{n(\omega)} = c_{\Phi}, \quad (15a)$$

т. е., как это уже подчеркивалось, для появления излучения необходимо, чтобы скорость источника была не менее скорости

света. То же условие необходимо для появления аномального эффекта Доплера, для которого

$$\frac{vn(\omega)}{c} \cos \theta > 1. \quad (18)$$

Собственно, неравенство (18) является определением аномального эффекта Доплера, при котором волны излучаются внутри черепковского конуса, т. е. с волновым вектором k , составляющим со скоростью источника v угол $\theta < \theta_0 = \arccos(c/n(\omega)v)$. Сказанное очевидно из формулы для эффекта Доплера в среде [8, 12]

$$\omega = \frac{\omega_{00} \sqrt{1 - v^2/c^2}}{\left| 1 - \frac{v}{c} n(\omega) \cos \theta \right|}, \quad (19)$$

где ω_{00} — частота в системе отсчета, связанной с источником, а частота ω и угол θ относятся к «лабораторной» системе отсчета (в этой системе источник имеет скорость v).

Из условия (15а) обычно делают вывод, что излучение Вавилова — Черепкова и аномальный эффект Доплера возможны лишь в средах с положительным показателем преломления

$$n(\omega) > 1. \quad (20)$$

Подобное ограничение весьма существенно. Достаточно сказать, что в изотропной плазме в широко используемом приближении (см., например, [2, 12])

$$n(\omega) = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}}, \quad \omega_p^2 = \frac{4\pi e^2 N}{m}. \quad (21)$$

Поэтому считается, что в такой плазме черепковское излучение поперечных волн (именно для этих волн $c_\phi = c/n(\omega) > c$) невозможно.

Требование (20) в качестве условия, допускающего появление излучения Вавилова — Черепкова и аномального эффекта Доплера, связано с предположением, что скорость источника меньше скорости света в вакууме, т. е.

$$v < c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/с}. \quad (22)$$

Именно в силу такого требования была в свое время признана не относящейся к реальности, а затем на долгие годы забыта работа Зоммерфельда, еще в 1904 г. пришедшего к выводу о наличии излучения у электрона, движущегося в вакууме равномерно, но со скоростью $v > c$ (см. [17]) *. Фактически Зоммерфельд рассмотрел таким образом «эффект Вавилова — Черепкова» в недиспер-

*) Еще раньше замечания о возможности существования излучения при движении со сверхсветовой скоростью делались Хевисайдом [18] и Кельвином [19].

гирующей среде — вакууме. Соответствующий расчет формально корректен, поскольку уравнения электромагнитного поля и, в частности, уравнение

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \rho \mathbf{v} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (23)$$

справедливы и при $v > c$. Не нарушается при этом и релятивистская инвариантность теории — в противоположность довольно распространенному ошибочному мнению. Действительно, как подчеркивалось Эйнштейном еще в 1907 г. (см. [20], а также [21, 22]), условие $v < c$ для скорости материального «тела» или какого-то «действия» связано не с вопросом о релятивистской инвариантности, а с требованием причинности: ни в одной системе отсчета следствие не должно опережать причину.

Из релятивистского выражения для массы $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ и уравнения движения $d(mv)/dt = F$ ясно, правда, что никакое тело (частица) не может быть ускорено до скорости $v \geq c$. Но и это само по себе еще не закрывает возможности существования гипотетических частиц, получивших название тахионов и всегда движущихся со скоростью $v > c$. Тахионы можно было бы считать частицами с мнимой массой покоя $m^* = im$, энергией $E = \sqrt{m^{*2}c^4 + c^2p^2} = \sqrt{-m^2c^4 + c^2p^2}$, импульсом $p = m^*v/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ и скоростью $v = dE/dp = c^2p/E = c^2p/\sqrt{-m^2c^4 + c^2p^2}$. Очевидно, для тахионов импульс p является вещественным, если $v > c$ и, следовательно, $p > mc$; скорость тахионов $v \rightarrow c$ при $p \rightarrow \infty$ и, наоборот, $v \rightarrow \infty$ при $p \rightarrow mc$. Величина $E^2 - c^2p^2 = m^{*2}c^4 = -m^2c^4$ остается инвариантной при преобразованиях Лоренца, и возможность существования тахионов «закрывают», в частности, из условия причинности [20, 23]. Впрочем, быть может, не все еще согласятся с тем, что существование тахионов невозможно, хотя нам такой вывод и представляется достаточно надежным. Подчеркнем поэтому, что тахионы, во всяком случае, не обнаружены и, таким образом, условие $v \leq c$ для всех известных частиц заведомо отвечает действительности.

Тем не менее столь же несомненно, как мы видели выше, что источники электромагнитных (да и всяких других) волн могут двигаться со скоростями $v > c$. Более того, существование сверхсветовых скоростей и упомянутого типа сверхсветовых источников (так для краткости мы будем в дальнейшем называть источники, движущиеся со скоростью $v > c$) *) давно и хорошо известно.

*) Сверхсветовыми источниками, вообще говоря, называют источники, движущиеся со скоростью $v > c_\phi = c/n$. Такая терминология разумна, но, называя в настоящей статье сверхсветовыми лишь источники, скорость которых $v > c$, мы вряд ли внесем путаницу, особенно после того, как это оговорено.

В тени долго оставалось лишь то обстоятельство, что такие источники в рамках макроскопической теории и всего макроскопического подхода «ничем не хуже» досветовых источников. Макроскопичность здесь понимается в том смысле, что сверхсветовой источник не является одной точечной (сколь угодно малой) частицей, а всегда должен быть связан с совокупностью таких (микроскопических) частиц *). Более того, в сколько-нибудь реальной постановке задачи число частиц, ответственных за движение сверхсветового источника (зайчика), оказывается очень большим. Адекватным теоретическим аппаратом для рассмотрения излучения сверхсветовых источников служит обычная теория поля и конкретно уравнение (23), где плотность тока $j = \rho v$ может в принципе изменяться и перемещаться с любыми частотой и скоростью. В свете сказанного представляется естественным вывод о том, что излучение Вавилова — Черепкова, аномальный эффект Доплера и, собственно, все особенности, возникающие при движении источника со скоростью $v > c/n$, могут иметь место и в вакууме ($n = 1$), и в среде с $n < 1$. Любопытно, что на это обстоятельство было обращено внимание лишь сравнительно недавно [24 — 26].

Рассмотрим заряженную нить, падающую со скоростью u под углом ψ к границе некоторой прозрачной среды с показателем преломления $n(\omega)$. Другими словами, мы имеем ситуацию, схематически изображенную на рис. 7 и аналогичную представленной на рис. 2. До пересечения границы среды составляющие нить заряды (скажем, электроны или протоны) движутся равномерно. Но после пересечения границы заряды тормозятся, в силу чего появляется некоторый ток (поляризация), бегающий со скоростью $v = u/\sin \psi$, отвечающей скорости перемещения сечения нити границей среды. Такой ток появляется и без учета торможения

*) Макроскопичность, о которой здесь идет речь, довольно относительно и значительно «слабее» условий, связанных с переходом к макроскопической электродинамике от уравнений микроскопической электродинамики (или, по старой терминологии, от уравнений электронной теории). В самом деле, из уравнений электродинамики следует лишь уравнение непрерывности, а в остальном движение зарядов может быть задано «извне» (совместимо ли такое движение с используемым уравнением движения — другой вопрос). Отсюда ясно, что уже в рамках электронной теории можно непротиворечивым образом считать плотность тока $j = \rho v$ в широких пределах произвольной и, в частности, полагать $v > c$. В этом смысле упоминавшиеся расчеты Зоммерфельда [17], в которых рассматривалось излучение заряда, движущегося со скоростью $v > c$, были вполне корректны. Правда, Зоммерфельд имел в виду движение одного заряда, когда в действительности $v < c$ (см. выше). Таким образом, в своих работах 1904 — 1905 гг. [17] Зоммерфельд в известной мере предвосхитил теорию эффекта Вавилова — Черепкова. Весьма любопытно, что более 30 лет, вплоть до работы Тамма и Франка [9] никто не догадался в задаче об излучении равномерно движущегося источника либо заменить скорость c на фазовую скорость $c_\phi = c/n$, либо рассматривать источник типа пятна, движущийся со скоростью $v > c$.

зарядов в силу переходного эффекта (изменения параметров среды на пути заряда), приводящего к испусканию переходного излучения. Наглядно можно представлять себе дело так, что, достигая среды, заряды останавливаются, а затем, например, нейтрализуются токами в среде. В результате по поверхности среды бежит со скоростью v некоторый заряд q . Будем для простоты считать, что нить имеет квадратное сечение (сторона квадрата d) и состоит из зарядов e с концентрацией N . Тогда площадь сечения нити границей среды, т. е. площадь зайчика, равна $S = d^2/\sin \psi$, и на

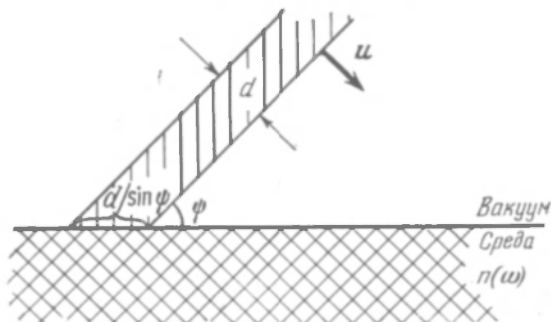


Рис. 7. Падение заряженной нити на экран.

эту площадь приходится заряд $q = eNd^3 \operatorname{ctg} \psi$ (границу среды за единицу времени пересекает заряд $eNd^2v \cos \psi$, на единицу длины вдоль скорости приходится заряд $eNd^2 \cos \psi$, и, следовательно, длине зайчика $d/\sin \psi$ отвечает как раз заряд q). Решение задачи об излучении заряда, движущегося на границе вакуума и среды, известно [14]. Результат для излучаемой энергии можно записать в виде

$$\frac{dW}{dt} = \frac{q^2 v}{c^2} \int \left(1 - \frac{c^2}{n^2(\omega) v^2}\right) F \omega d\omega. \quad (24)$$

Очевидно, при $F = 1$ эта формула переходит в выражение (16) для однородной среды. Фактор $F(\omega, \dots)$ учитывает влияние границы, размер источника и т. д. Из общих соображений можно думать, что и для сверхсветового источника с $v > c$ применима та же формула, причем фактор $F = F(\omega, \psi, d, \dots)$, а также зависит от распределения заряда в вакууме *).

*) Точнее было бы записать правую часть выражения (24) в виде суммы двух членов

$$\int \left(1 - \frac{c^2}{v^2}\right) F_1 \omega d\omega + \int \left(1 - \frac{c^2}{n^2(\omega) v^2}\right) F_2 \omega d\omega,$$

где первый член отвечает мощности излучения в вакууме, а второй член — мощности излучения в среде. Однако до тех пор, пока фактор F не конкретизируется, выражение (24) носит символический характер и поэтому может быть сохранено.

Конкретизировать вид фактора F можно лишь в результате точного расчета, а также, конечно, использования вполне определенной модели источника. Это будет сделано ниже. Сейчас же заметим, что в любом случае интегрирование в (24) проводится по области частот, удовлетворяющих черепковскому условию (17). При этом в вакууме, разумеется, нужно положить $n = 1$ (выше предполагалось, что среда граничит с вакуумом). Поэтому при $v > c$ в вакууме (над средой) излучение возникает всегда, если

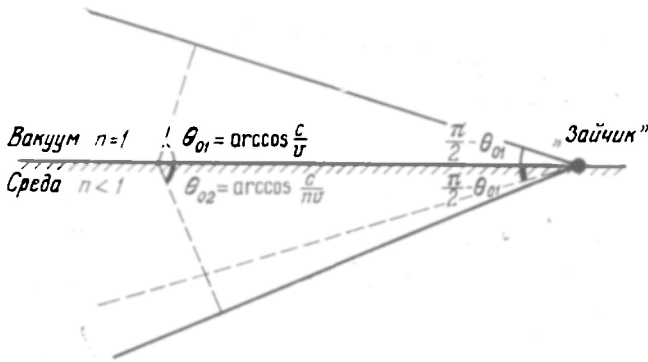


Рис. 8. Черенковское излучение «зайчика».

только $F \neq 0$. Практически же фактор F заведомо должен быть весьма мал для волн с длиной $\lambda = 2\pi c/\omega$, меньшей проекции размеров зайчика на направление волнового вектора k . В среде при $v > c$ и $n(\omega) > 1$ ситуация такая же, но при $n(\omega) < 1$ роль обрезającego фактора может играть также условие $v > c_{\text{ф}} = c/n$ — излучение в среде возможно только при его соблюдении. В общем случае можно также утверждать, что излучение характеризуется углом $\theta_{01} = \arccos(c/v)$ в вакууме и углом $\theta_{02} = \arccos(c/nv)$ в среде (угол θ есть угол между k и v ; рис. 8). Поскольку скорость переднего фронта электромагнитных волн в любой среде и при учете дисперсии равна c , излучение сверхсветового источника в среде характеризуется не только углом θ_{02} , но и углом $\theta_{01} = \arccos(c/v)$, который в этом случае определяет раствор конуса, соответствующего переднему фронту волны. Если говорить об основной части излучения, а не о переднем фронте, то аналогичная ситуация имеет место и для эффекта Вавилова — Черепкова в диспергирующей среде, в которой групповая скорость $v_{\text{гр}} = d\omega/dk = c/[d(\omega n)/d\omega]$ меньше фазовой скорости $c_{\text{ф}} = c/n(\omega)$. Здесь нет поэтому особой необходимости специально обсуждать эту сторону проблемы (см. [9, 27]).

Остановимся теперь на точном решении задачи о падении нити на идеально проводящую плоскость. Геометрия задачи

такая же, как на рис. 7, но среда с показателем преломления $n(\omega)$ заменена идеальным проводником. Попадая на проводник (пересекая его границу), заряд для внешнего наблюдателя исчезает, т. е. если говорить о механизме излучения, то мы имеем дело с переходным излучением; нас, однако, интересует результат интерференции такого излучения от движущейся нити, причем заранее известно, что результирующее излучение будет направлено под углом $\theta_{01} = \arccos(c/v)$. Поле нити в вакууме представляет собой сумму полей самой нити и ее изображения, т. е. генерируется током с плотностью

$$\begin{aligned} j &= Q\delta(z) u_1 \delta(b_1 r - ut), & y > 0, \\ j &= -Q\delta(z) u_2 \delta(b_2 r - ut), & y < 0. \end{aligned} \quad (25)$$

Здесь Q — заряд единицы длины нити, $u_1 = ub_1$ и $u_2 = ub_2$ — скорости нити и ее изображения ($b_1 = b_2 = 1$, $b_{1x} = b_{2x}$, $b_{1y} = -b_{2y}$, $\dot{v}_{1z} = \dot{v}_{2z} = \dot{v}$; нить лежит в плоскости x, y и, для простоты, считается бесконечно тонкой, поэтому и появляются δ -функции). Компонента Фурье плотности тока равна

$$\begin{aligned} j(\omega) &= \frac{1}{2\pi} \int j \exp(i\omega t) dt = \\ &= \frac{Q\delta(z)}{2\pi} \left[b_1 \exp\left(i \frac{\omega}{u} b_1 r\right) - b_2 \exp\left(i \frac{\omega}{u} b_2 r\right) \right]. \end{aligned}$$

На больших расстояниях от экрана для фурье-компоненты векторного потенциала имеем (напряженность магнитного поля $H = \text{rot } A$)

$$\begin{aligned} A_\omega &= \frac{\exp(ikR)}{cR} \int j_\omega(r') \exp(-ikr') dr' = \\ &= i \frac{Q \exp(ikR)}{cR} \left(\frac{b_1}{\frac{\omega}{u} \dot{v}_{1y} - \dot{v}} - \frac{b_2}{\frac{\omega}{u} \dot{v}_{2y} - \dot{v}} \right) \delta\left(\frac{\omega}{u} b_{1x} - k_x\right), \end{aligned} \quad (26)$$

где $k = \omega s/c = ks$ — волновой вектор излучаемой волны (очевидно, $s^2 = 1$, $k = \omega/c$). Далее, легко найти магнитное поле $H_\omega = -i[kA_\omega]$, а затем интеграл

$$\begin{aligned} \frac{c}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H^2 dt &= \frac{c}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} dt \int_{-\infty}^{+\infty} d\omega \int_{-\infty}^{+\infty} d\omega' H_\omega H_{\omega'} \exp[i(\omega + \omega')t] = \\ &= \frac{1}{2} c \int_{-\infty}^{+\infty} d\omega \int_{-\infty}^{+\infty} d\omega' H_\omega H_{\omega'} \delta(\omega + \omega') = \\ &= \frac{1}{2} c \int_{-\infty}^{+\infty} |H_\omega|^2 d\omega = c \int_0^{\infty} |H_\omega|^2 d\omega, \end{aligned}$$

Будем считать ось x , по которой бежит зайчик, полярной осью, и пусть волновой вектор излучения $\mathbf{k} = \omega \mathbf{s}/c$ составляет с полярной осью угол θ ; азимутальный угол обозначим через φ (рис. 9), причем в вакууме $-\pi/2 \leq \varphi \leq \pi/2$.

Из формулы (26) видно, что A_ω пропорционально дельта-функции от аргумента $(\omega/u)b_{1x} - k_x$. Очевидно, что и магнитное поле \mathbf{H}_ω будет пропорционально дельта-функции, а энергия излучения — квадрату дельта-функции. Интеграл от квадрата дельта-функ-

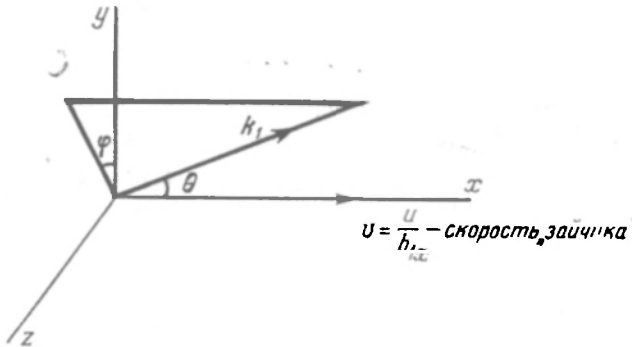


Рис. 9. К расчету черенковского излучения «зайчика».

ции расходится, что указывает на бесконечную энергию излучения. Эта бесконечность физически легко объяснима — мы считаем, что нить пересекает экран в течение бесконечно большого времени. Чтобы получить конечный результат, можно рассмотреть движение нити в течение большого, хотя и конечного времени T . Очевидно, энергия излучения будет пропорциональна T . К тому же результату приводит следующая формальная процедура. Запишем

$$\delta^2 \left(\frac{\omega}{u} b_{1x} - k_x \right) = \frac{u}{b_{1x}} \delta \left(\omega - \frac{k_x u}{b_{1x}} \right) \delta \left(\frac{\omega}{u} b_{1x} - k_x \right).$$

Теперь первый сомножитель разложим в интеграл Фурье

$$\delta \left(\frac{\omega}{u} b_{1x} - k_x \right) = \frac{u}{2\pi b_{1x}} \delta \left(\frac{\omega}{u} b_{1x} - k_x \right) \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[i \left(\omega - \frac{k_x u}{b_{1x}} \right) t \right] dt.$$

Из-за наличия в этом произведении дельта-функции мы можем показатель в экспоненте под интегралом положить равным нулю, в силу чего имеем

$$\delta^2 \left(\frac{\omega}{u} b_{1x} - k_x \right) = \frac{vT}{2\pi} \delta \left(\frac{\omega}{u} b_{1x} - k_x \right),$$

где T — полное время движения нити и $v = u/b_{1x}$ — скорость источника (зайчика). Действуя таким образом, получаем для энергии, излученной в телесный угол $d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$ в интервале частот $d\omega$ за единицу времени, следующее выражение:

$$\frac{dW_{\omega}(\theta, \varphi)}{dt} = \frac{1}{T} c |H_{\omega}|^2 R^2 \sin \theta d\theta d\varphi d\omega = \\ = \frac{Q^2 v}{2\pi\omega} \left(\frac{|s\mathbf{b}_1|}{\frac{c}{u} b_{1y} - s_y} - \frac{|s\mathbf{b}_2|}{\frac{c}{u} b_{1y} + s_y} \right)^2 \delta \left(\frac{c}{v} - s_x \right) \sin \theta d\theta d\varphi d\omega.$$

В результате наличия соответствующей дельта-функции отсюда ясно, что происходит излучение волн только с волновым вектором \mathbf{k} , удовлетворяющим условию $s_x = \cos \theta = c/v = \cos \theta_{01}$, как это и должно быть. После интегрирования по θ находим

$$\frac{dW_{\omega}(\varphi)}{dt} = \frac{Q^2}{2\pi\omega} \left(\frac{|s\mathbf{b}_1|}{\frac{c}{u} b_{1y} - s_y} - \frac{|s\mathbf{b}_2|}{\frac{c}{u} b_{1y} + s_y} \right)^2 d\varphi d\omega, \\ \mathbf{s} = \{ \cos \theta_{01}, \sin \theta_{01} \cos \varphi, \sin \theta_{01} \sin \varphi \}, \\ \mathbf{b}_1 = \{ \sin \psi, -\cos \psi, 0 \}, \quad \mathbf{b}_2 = \{ \sin \psi, \cos \psi, 0 \}, \quad (27) \\ \cos \theta_{01} = c/v, \quad v = u/\sin \psi,$$

где ψ — угол между скоростью частиц u и осью x .

Наконец, получаем

$$\frac{dW}{dt} = \frac{2Q^2 v}{\pi} \frac{c^2}{u^2} \int_0^{\infty} \frac{d\omega}{\omega} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \{ \dots \} d\varphi, \quad (28) \\ \{ \dots \} = \frac{(1 - c^2/v^2)^2 - (1 - c^2/v^2)(1 - u^4/c^2v^2) \cos^2 \varphi}{[(c^2/u^2) \cos^2 \psi - (1 - c^2/v^2) \cos^2 \varphi]^2}.$$

Заряд q , движущийся в однородной среде, как ясно из (16), излучал бы «на интервал» $d\omega d\varphi$ с мощностью

$$\frac{dW_{\omega}(\varphi)}{dt} = \frac{\tilde{r}^2 c}{2\pi c^2} \left(1 - \frac{c^2}{v^2} \right) \omega d\varphi d\omega,$$

где положено $n = 1$. Сравнивая это выражение с (27), мы видим, что нить эквивалентна заряду

$$q = Q \left| \frac{|s\mathbf{b}_1|}{\frac{c}{u} b_{1y} - s_y} - \frac{|s\mathbf{b}_2|}{\frac{c}{u} b_{1y} + s_y} \right| \frac{c}{\omega} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{c^2}{v^2}}}. \quad (29)$$

Поскольку Q есть заряд единицы длины нити, то множитель при Q в (29) представляет собой эффективную длину нити, ответственную за излучение в направлении \mathbf{k} . Эта длина есть не что иное, как длина формирования переходного излучения в направлении \mathbf{k} . Интегралы (27), (28) расходятся при $\omega \rightarrow 0$, что просто связано с предположением о бесконечной протяженности нити. Мощность

излучения падает с ростом ω , очевидно, в силу происходящего при этом уменьшения длины формирования переходного излучения. В других задачах аналогичного типа частотная зависимость может быть иной (см. ниже).

Как отмечалось, механизмом излучения отдельных частиц или нити как целого при пересечении границы проводника можно считать переходное излучение. Однако с таким же успехом (и конечным результатом) можно предполагать, что происходит тормозное излучение в результате мгновенной остановки зарядов и их изображений на границе (в случае идеального проводника обе эти возможности неразличимы при вычислении поля в вакууме *). Вообще, механизм «элементарного акта» излучения, приводящего в конечном счете к черенковскому эффекту, в известном отношении несуществен — характер черенковского излучения (в первую очередь речь идет об условии $\cos \theta_0 = c/n(\omega)v$) определяется интерференцией волн, испускаемых вдоль пути источника. Сказанное находится, разумеется, в полном соответствии с принципом Гюйгенса. Таким образом, рассмотренное излучение заряженной нити, падающей на экран, представляет собой именно эффект Вавилова — Черенкова при $v > c$ и к тому же возникающий в вакууме (правда, наличие какой-то границы со средой здесь необходимо). Интенсивность излучения и его угловое распределение по φ будут изменяться в зависимости от свойств сред 1 и 2 (разумеется, для наблюдения черенковского излучения по крайней мере одна из этих сред должна быть прозрачной; выше сред 1 мы считали вакуумом). Для анизотропной среды показатель преломления $n(\omega)$ в условии (17) нужно брать для каждой нормальной волны в отдельности, причем значение n зависит также от углов с осями симметрии (осями кристалла, направлением внешнего магнитного поля и т. д.). Особо отметим излучение волн в волноводах. В общем, здесь возникает большое число задач, аналогичных тем, которые встречаются в теории черенковского излучения при $v < c$ (см. [12 — 14]). Очевидно также, что рассматриваемые источники (зайчики) излучают и в досветовом режиме, т. е. когда $c/n < v < c$. Такие источники представляют интерес и при рассмотрении возбуждения, например, поверхностных волн разных типов в результате эффекта Вавилова — Черенкова или переходного излучения на неоднородной поверхности (в последнем случае требование $v > c/n$, конечно, отпадает). Сказанное справедливо и в случае волн неэлектромагнитной природы; в качестве примера укажем на возможность генерации второго звука в гелии-II движущимся источником (скажем, движущимся по поверхности гелия лучом лазера).

*) Об этом и о самом переходном излучении см. предыдущую статью в настоящем сборнике, а также, например, гл. 7 в [12].

Излучение сверхсветового источника ни в коей мере не сводится к эффекту Вавилова — Черепкова. Так, уже при равномерном движении, но с «модуляцией» источника некоторой частотой ω_0 будет наблюдаться излучение с доплеровской частотой $\omega = \omega_0 / \left| 1 - \frac{v}{c} n(\omega) \cos \theta \right|$ (см. (19), где $\omega_{00} \sqrt{1 - v^2/c^2} = \omega_0$). Модуляцию можно осуществить разными способами — дополнительным качанием луча, изменением его плотности (вдоль луча), нанесением «решетки» (периодических неоднородностей) на экран и т. д. Наконец, особенности сверхсветового излучения с $v > c$, как и в случае $c/n < v < c$, появляются и при неравномерном движении источника. Примером может служить синхротронное (или, лучше, квазисинхротронное) излучение, возникающее при движении источника по окружности. Такой случай реализуется, когда частицы или фотоны, испускаемые вращающимся источником, падают на сферический или цилиндрический экран. Более конкретная модель такова [25]: вращающийся источник (скажем, пульсар) испускает направленный поток γ -лучей, которые падают на «экран», состоящий из более или менее плотного вещества (плазмы) и находящийся на расстоянии R от источника. Падая на экран, γ -лучи рассеиваются на электронах, которые в силу отдачи приобретают импульс и поэтому создают некоторую радиальную поляризацию, «бегущую» по экрану со скоростью $v - \Omega R$. В результате по экрану бежит ток с плотностью

$$\mathbf{j} = \frac{\partial}{\partial t} [p(t) \delta(\mathbf{r} - \mathbf{R}(t))], \quad (30)$$

$$\mathbf{p}(t) = p \{\cos \Omega t, \sin \Omega t, 0\},$$

$$\mathbf{R}(t) = R \{\cos \Omega t, \sin \Omega t, 0\},$$

где p — электрический дипольный момент, отвечающий созданной поляризации, которая считается точечной; последнее возможно, если рассматривать излучение с длиной волны λ , значительно превосходящей размеры источника l .

Возникающее излучение при $v = \Omega R > c$ по своему характеру аналогично синхротронному излучению в среде при условиях, когда $v > c/n$ (см. [12], гл. 6); полная излучаемая мощность равна

$$\frac{dW}{dt} \approx \frac{p^2 (1 + v^2/c^2)}{2v^3} \int_{\Omega \ll \omega \ll c/v} \omega^3 d\omega. \quad (31)$$

Интеграл обрезается на высоких частотах в связи с конечными размерами диполя, что не было учтено в (30), (31); кстати, в расчете [25] дипольный момент \mathbf{p} в (30) считался направленным не по радиусу, а по оси z (т. е. полагалось $\mathbf{p} = p\{0, 0, 1\}$), что в формуле (31), вероятно, сказывается лишь на численном коэффициенте. В моделях пульсаров бегущее со скоростью $v > c$ воз-

мущение в плазме может создаваться также магнитодипольным излучением или потоками частиц, исходящими от пульсара.

В связи с развитием лазерной техники приобретает особый интерес возможность создания сверхсветового источника с помощью света. Использование вращающегося луча не так уж легко даже при применении лазера, если требовать, чтобы напряженность поля в зайчике при $v = \Omega R > c$ была достаточно большой. Поэтому проще осуществить падение импульса на экран — границу раздела (см. выше рис. 2 и формулы (5), (6)). Если экран

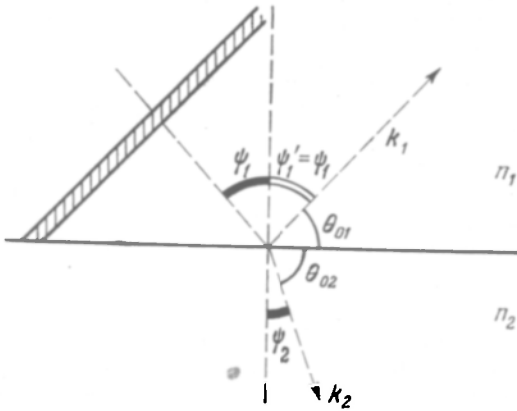


Рис. 10. Отражение и преломление светового импульса на границе раздела двух сред.

является идеально плоской границей раздела двух сред, а задача может рассматриваться в линейном приближении (слабое поле), то мы имеем дело с обычной задачей об отражении и преломлении света. Поэтому сразу ясно (и, конечно, следует из уравнений поля), что световой импульс, падающий под углом ψ_1 , отразится также под углом $\psi_1' = \psi_1$, а угол преломления ψ_2 определится из закона преломления (рис. 10)

$$\frac{\sin \psi_2}{\sin \psi_1} = \frac{n_1}{n_2}, \quad \psi_1' = \psi_1. \tag{32}$$

Любопытно, что, как было уже давно отмечено Франком [8], условия (32) совпадают с условиями появления эффекта Вавилова — Черепкова для рассматриваемого импульса, сечение которого экраном движется со скоростью $v = c/(n_1 \sin \psi_1)$ (см. (5)). В самом деле, черепковский угол в среде 1 определяется условием $\cos \theta_{01} = c/(n_1 v) = \sin \psi_1$, откуда $\psi_1' = \psi_1 = 1/2\pi - \theta_{01}$, как это и должно быть (см. рис. 10). Для среды 2 имеем $\cos \theta_{02} = c/(n_2 v) = (n_1/n_2) \sin \psi_1$, что совпадает с (32), поскольку $\cos \theta_{02} = \sin \psi_2$.

Можно буквально сказать, что мы очень долго «не знали, что говорим прозой», — сверхсветовое (и более общее при $n_1 < 1$) черепковское условие известно уже несколько столетий. Соответствие между законами отражения и преломления и черенковским условием вместе с тем естественно, поскольку все эти соотношения получаются из принципа Гюйгенса одинаковым образом. Для получения каких-либо новых результатов нужно рассмотреть задачу с учетом нелинейности для различных сред (в частности, для пьезоэлектриков).

Еще одно замечание, которое мы хотим здесь сделать, касается световых пятен и зайчиков в случае шероховатых или люминесцирующих экранов. В последнем случае излучение, исходящее от зайчика, вообще говоря, некогерентно. То же практически справедливо и для шероховатых экранов, поскольку речь идет при этом обычно о достаточно больших световых пятнах (размеры значительно больше длины волны света). Если излучение некогерентно, то интерференция невозможна и такие специфические черты, как резкая направленность черенковского излучения, пропадают.

Историческая судьба исследований излучения источников, движущихся со скоростью, большей фазовой скорости света, весьма своеобразна. Речь идет о классических эффектах, качественно ясных уже в рамках простейших оптических представлений (принцип Гюйгенса, интерференция), а количественно описываемых с помощью уравнений Максвелла. Как мы видели, элементарные законы отражения и преломления света на плоской границе раздела двух сред по сути дела совпадают с условием излучения Вавилова — Черепкова от бегущего вдоль границы источника. Черенковское условие для заряда — сверхсветового источника (скорость $v > c$) было получено в 1904 г. [17]. Тем не менее эффект Вавилова — Черенкова оказался экспериментально обнаруженным лишь в 1934 г., да и то случайно (в том смысле, что исследовался совсем другой вопрос), а создание теории [9] этого эффекта потребовало больших и довольно длительных усилий [10]. Любопытно также, что на первом этапе возможности применения эффекта Вавилова — Черепкова в физике как для измерительных целей, так и для понимания различных явлений казались весьма скромными. В действительности же эффект Вавилова — Черенкова и родственные явления сейчас широко используются, и можно сказать, что их изучение составляет целую главу физики, которой посвящено огромное число статей и ряд обзоров [12 — 18]. Казалось бы проблема, если не исчерпана, то во всяком случае уже достаточно полно и всесторонне исследована. Но и это оказалось не вполне верным, о чем свидетельствуют статьи [24 — 26, 28]. В самом деле, широко было распространено мнение (в частности, автор сам его придерживался), что эффект Вавилова —

Черенкова и аномальный эффект Доплера могут наблюдаться лишь для волн, которым отвечает показатель преломления $n(\omega) > 1$ (условие $c/n < v < c$). В согласии с этим в вакууме соответствующие явления считались невозможными. Между тем существуют сверхсветовые источники, движущиеся со скоростью $v > c$. Эти источники могут рассматриваться в широких пределах на тех же основаниях, что и «обычные» источники, движущиеся со скоростью $v < c$. Конкретно, сверхсветовые источники способны порождать излучение Вавилова — Черенкова в любой среде, в том числе в вакууме или при условии $n(\omega) < 1$. Сверхсветовые источники общего типа обладают в целом теми же особенностями, что и источники, движущиеся со скоростью $c/n < v < c$ (аномальный эффект Доплера и т. д.). С точки зрения теории излучения существенное отличие сверхсветовых источников ($v > c$) от досветовых ($v < c$) заключается в том, что сверхсветовой источник не может представлять собой отдельную «элементарную» частицу и поэтому всегда является протяженным. Именно размеры сверхсветового источника в первую очередь и определяют, особенно при излучении в вакууме, коротковолновую границу излучаемого спектра. В этой связи трудно надеяться на использование сверхсветовых источников, например, для генерации рентгеновских лучей (подобная возможность могла бы показаться соблазнительной, поскольку стремление на высоких частотах показателя $n(\omega)$ к единице, препятствующее для источников с $v < c$ использованию эффекта Вавилова — Черенкова в рентгеновской области, не играет столь критической роли при $v > c$). Мы не были бы удивлены, однако, если бы в будущем нашлись те или иные интересные применения и для сверхсветовых источников. Кроме того, сверхсветовые источники могут встретиться в астрономии. Независимо от этого изучение таких источников (с $v > c$) электромагнитных и гравитационных волн (а, возможно, и нейтрино) и вся совокупность возникающих здесь вопросов представляют, по нашему мнению, несомненный физический интерес.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Sommerfeld A.* — Ann. d. Phys., 1964, Bd. 44, S. 177.
2. *Гинзбург В. Л.* Распространение электромагнитных волн в плазме. — М.: Наука, 1967.
3. *Агранович В. М., Гинзбург В. Л.* Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов. — М.: Наука, 1979.
4. *Вайнштейн Л. А.* — УФН, 1976, т. 118, с. 339.
5. *Blanford R. D., McKee C. F., Rees M. J.* — Nature, 1977, v. 267, p. 214; см. также — Nature, 1977, v. 268, p. 405.
6. *Вайскопф В.* — УФН, 1964, т. 84, с. 183; *McGill N. C.* — Contemp. Phys., 1968, v. 9, p. 33.
7. *Угаров В. А.* Специальная теория относительности. — М.: Наука, 1977, § 3.2.

- 7а. *Болотовский Б. М., Михальчи Е. Д.*— Краткие сообщения по физике. ФИАН СССР, 1976, № 5, с. 35.
8. *Франк И. М.*— Изв. АН СССР. Сер. физ., 1942, т. 6, с. 3.
9. *Тамм И. Е., Франк И. М.*— ДАН СССР, 1937, т. 14, с. 107; см. также *Тамм И. Е.*— J. Phys., USSR, 1939, v. 1, p. 439.
10. *Франк И. М.* Проблемы теоретической физики.— Сборник памяти И. Е. Тамма.— М.: Наука, 1972, с. 350.
11. *Гинзбург В. Л.*— ДАН СССР, 1939, т. 24, с. 130.
12. *Гинзбург В. Л.* Теоретическая физика и астрофизика.— М.: Наука, 1975.
13. *Гинзбург В. Л.*— ЖЭТФ, 1940, т. 10, с. 589; УФН, 1959, т. 69, с. 537.
14. *Болотовский Б. М.*— УФН, 1957, т. 62, с. 204; 1961, т. 75, с. 295.
15. *Джелли Дж.* Черенковское излучение и его применение.— М.: ИЛ, 1960.
16. *Зрелов П. В.* Излучение Вавилова — Черепкова и его применение в физике высоких энергий.— М.: Атомиздат, 1968.
17. *Sommerfeld A.*— Gottingen Nachrichten, 1904, S. 99, 363; 1905, S. 201; *Зоммерфельд А.* Оптика.— М.: ИЛ, 1958, § 47.
18. *Heaviside O.*— Phil. Mag., 1889, v. 27, p. 324.
19. *Lord Kelvin.*— Phil. Mag., 1901, v. 2, p. 1.
20. *Einstein A.*— Ann. d. Phys., 1907, Bd. 23, S. 371; см. также *Эйнштейн А.* Собрание научных трудов.— М.: Наука, 1965, т. 1, с. 53.
21. *Паули В.* Теория относительности.— М.: Гостехиздат, 1947, § 6.
22. Эйнштейновский сборник, 1973.— М.: Наука, 1974, с. 84 — 200.
23. *Shay D., Miller K. L.*— Nuovo Cimento, 1977, v. 38A, p. 490.
24. *Гинзбург В. Л.*— ЖЭТФ, 1972, т. 62, с. 173.
25. *Эйдман В. Я.*— Радиофизика, 1972, т. 15, с. 634; Астрофизика, 1972, т. 8, с. 609.
26. *Болотовский Б. М.*— Краткие сообщения по физике. ФИАН СССР, 1972, № 7, с. 34.
- 26а. *Афанасьев С. В.*— Радиофизика, 1974, т. 17, с. 4069; 1975, т. 18, с. 1520; 1976, т. 19, с. 1523.
- 26б. *Манева Г. М.*— Радиофизика, 1976, т. 19, с. 1086; 1977, т. 20, с. 1577.
27. *Motz H., Schiff L.*— Amer. J. Phys., 1953, v. 21, p. 258. (Русский перевод в сб.: Миллиметровые и субмиллиметровые волны.— М.: ИЛ, 1959, с. 171.)
28. *Болотовский Б. М. и Гинзбург В. Л.*— УФН, 1972, т. 106, с. 577; в кн.: Эйнштейновский сборник, 1972.— М.: Наука, 1974, с. 212.

Только статья «Об экспериментальной проверке общей теории относительности» написана специально для настоящего сборника, остальные статьи публиковались ранее. В этой связи представляется необходимым сообщить некоторые библиографические данные и указать на характер внесенных в статьи изменений.

«Гелиоцентрическая система и общая теория относительности». Статья была опубликована в журнале «Вопросы философии», 1973, № 6, с. 112 и № 9, с. 95 и затем в «Эйнштейновском сборнике, 1973».—М.: Наука, 1974, с. 19. Изменения, внесенные в настоящее издание, касаются разделов 1 и 7 статьи; несколько пополнен также список литературы.

«Как устроена Вселенная и как она развивается во времени». Статья была опубликована в журнале «Наука и жизнь», 1968 г., № 1, 2, 3, в виде брошюры общества «Знание» (М., 1968 г.) и затем вошла в состав сборника: *Гинзбург В. Л.* Современная астрофизика.— М. Наука, 1970. В настоящее издание внесено довольно много, хотя и сравнительно мелких, уточнений и дополнений. Автор признателен Л. М. Озерному за замечания, сделанные им при чтении рукописи.

«Как и кто создал теорию относительности? (Опыт рецензии с предисловием и комментариями)». Статья была опубликована в журнале «Вопросы философии», 1974, № 8, с. 125 и затем в «Эйнштейновском сборнике, 1974».— М.: Наука, 1976, с. 351. Здесь статья публикуется практически без изменений по сравнению с опубликованной в «Эйнштейновском сборнике».

«Альберт Эйнштейн. Собрание научных трудов (в четырех томах)». Эта рецензия была опубликована в УФН, 1968, т. 95, с. 553 и в несколько расширенном виде в «Эйнштейновском сборнике, 1969 — 1970».— М.: Наука, 1970, с. 390. Здесь рецензия печатается практически без изменений по сравнению с публикацией в «Эйнштейновском сборнике».

«Переходное излучение и переходное рассеяние». Статья была опубликована в журнале «Природа», 1975, № 8, с. 56. В настоящее издание, помимо мелких уточнений, включен вновь написанный раздел «Переходное излучение и переходное рассеяние в вакууме при наличии сильного электромагнитного поля».

«О сверхсветовых источниках излучения». В основу статьи положен обзор В. М. Болотовского и В. Л. Гинзбурга «Эффект Вавилова — Черепкова

и эффект Доплера при движении источников со скоростью, большей скорости света в вакууме», опубликованный в УФН, 1972, т. 106, с. 577 и затем в немного дополненном виде в «Эйнштейновском сборнике, 1972». — М.: Наука, 1974, с. 212. Этот материал был также использован в главе 8 книги: *Гинзбург В. Л.* Теоретическая физика и астрофизика. М.: Наука, 1975. В настоящее издание по существу внесено лишь несколько мелких дополнений. Автор признателен Б. М. Болотовскому за разрешение использовать текст упомянутой написанной совместно с ним статьи, а также за замечания, сделанные при чтении публикуемого здесь варианта этой статьи.

Виталий Лазаревич Гинзбург
О ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ
Сборник статей

М., 1979 г., 240 стр. с илл.

Редактор *Л. П. Русакова*
Техн. редактор *С. Я. Шкляр*
Корректор *Т. А. Палькова*

ИБ № 11414

Сдано в набор 20.02.79.
Подписано к печати 30.05.79.
Т-11223. Бумага 60×90^{1/16}. Тип. № 1.
Обыкновенная гарнитура. Высокая почать.
Условн. печ. л. 15,38+0,25 форзац.
Уч.-изд. л. 16,09+0,46 форзац.
Тираж 13 000 экз. Заказ № 1643
Цена книги 1 р. 30 к.

Издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической
литературы
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15
2-я типография издательства «Наука»
121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 10.