

# Часть I

---

## 1

### **КАКИЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ И АСТРОФИЗИКИ ПРЕДСТАВЛЯЮТСЯ ОСОБЕННО ВАЖНЫМИ И ИНТЕРЕСНЫМИ В НАЧАЛЕ XXI ВЕКА? <sup>1</sup>**

#### **1. Введение**

Скорость развития науки в наше время поражает. Буквально в продолжении одной-двух человеческих жизней произошли гигантские изменения в физике, астрономии, биологии, да и во многих других областях. Читатели могут проследить сказанное даже на примере своей семьи. Так, мой отец, родившийся в 1863 г., был младшим современником Максвелла (1831–1879 гг.). Мне самому было уже 16 лет, когда в 1932 г. были открыты нейтрон и позитрон. А ведь до этого были известны только электрон, протон и фотон! Как-то нелегко осознать, что электрон, рентгеновские лучи и радиоактивность открыты лишь около ста лет назад, а квантовая теория зародилась только в 1900 году. Вместе с тем сто лет — это так мало не только по сравнению с примерно 3 миллиардами лет с тех пор, когда на Земле зародилась жизнь, но и с возрастом современного вида людей (*homo sapiens*), составляющим порядка 50 тысяч лет! Полезно вспомнить и то, что первые великие физики — Аристотель (384–322 гг. до н.э.) и Архимед (около 287–212 гг. до н.э.) отделены от нас более чем двумя тысячелетиями. Но в дальнейшем наука прогрессировала сравнительно медленно, и не последнюю роль здесь играл религиозный догматизм. Лишь со времен Галилея (1564–1642 гг.) и Кеплера (1571–1630 гг.) физика стала развиваться все ускоряющимися темпами. Но, кстати сказать, даже Кеплер считал, что существует сфера неподвижных звезд, которая «состоит из льда или кристалла». Общеизвестна и борьба Галилея за утверждение гелиоцентрических представлений, за что он в 1633 г. был осужден инквизицией. Какой путь пройден с тех пор всего за 300–400 лет! Его итог — известная нам современная наука. Она уже освободилась от религиозных пут и церковь сегодня, по крайней мере, не отрицает роль науки [4]\*). Правда, антинаучные настроения и рас-

---

\*) Ссылки [1–3] сделаны в примечании 1 и ниже.

пространение лженауки (в особенности, астрологии) и в наши дни имеют место, в частности, в России. Однако лишь победа тоталитаризма (большевизма-коммунизма, фашизма) может радикально помешать прогрессу в науке в результате возникновения явлений типа лысенковщины. Будем надеяться, что до этого не дойдет. Так или иначе, можно рассчитывать на то, что в XXI веке наука будет развиваться не менее быстро, чем в ушедшем XX столетии. Трудность на этом пути, быть может, даже главная трудность, как мне кажется, связана с гигантским увеличением накопленного материала, объема информации. Физика так разрослась и дифференцировалась, что за деревьями трудно разглядеть лес, трудно охватить мысленным взором картину современной физики как целого.

Между тем такая картина существует и, несмотря на все отвлечения, у физики имеется стержень. Таким стержнем являются фундаментальные понятия и законы, сформулированные в теоретической физике. Содержание последней ярко отражено в Курсе Ландау–Лифшица–Питаевского (ЛЛП). Последний из этих авторов продолжает дело своих предшественников. Курс в дополненном виде переиздается, хотя, к сожалению, недостаточно быстро. Курс ЛЛП, как и многочисленная другая учебная и монографическая литература, образует ту базу, на которой основывается работа во всех разделах физики и в близких направлениях. Однако все эти книги не могут отражать последнего слова в науке, по ним трудно, если не невозможно, чувствовать биение пульса научной жизни. Такой цели, как известно, служат семинары. Я сам руковожу в ФИАНе одним из таких семинаров уже больше 40 лет. Он проводится еженедельно (по средам) и продолжается два часа. Типичная повестка дня: новости из текущей литературы, а затем два (или реже один) доклада на самые различные физические и околофизические темы. 1500-е заседание семинара было проведено 24 мая 1996 г. в форме, близкой к «капустнику», оно отражено в журнале «Природа» [5]. 1600-е заседание состоялось 13 января 1999 г. На семинаре сейчас бывает в среднем около 100 человек — это научные сотрудники из ФИАНа и других институтов, а также немногие студенты МФТИ. С некоторым удивлением должен заметить, что подобных семинаров широкого профиля, по-видимому, проводится довольно мало. Преобладают узко профессиональные семинары или, особенно за границей, так называемые коллоквиумы. Последние длятся один час и посвящены только одному обзорному докладу. Зато за границей распространены содержащие много новостей журналы *Nature*, *Physics Today*, *Physics World*, *Contemporary Physics* и некоторые другие. К сожалению, у нас в России все эти журналы сейчас сравнительно мало доступны, особенно без запоздания. Думаю, что «Успехи физических наук» достаточно доступны и приносят немалую пользу.

Однако, как я давно считаю, всего этого мало, и я пропагандирую «проект» (как сейчас стало модно говорить), отраженный в названии настоящей статьи. Речь идет о составлении некоторого списка проблем, представляющихся в данное время наиболее важными и интересными. Эти проблемы должны в первую очередь обсуждаться или комментироваться в специальных лекциях или статьях. Формула «все об одном и кое-что обо всем» весьма привлекательна, но уже нереальна — за всем не угонишься. Вместе с тем некоторые темы, вопросы, проблемы как-то выделены по различным причинам. Здесь может играть роль важность темы для судеб человечества (выражаясь высокопарно) вроде проблемы управляемого ядерного синтеза с целью получения энергии. Выделены, конечно, и вопросы, касающиеся самого фундамента физики, ее переднего фронта (эта область часто именовалась и именуется физикой элементарных частиц). Несомненно, особое внимание привлекают и некоторые вопросы астрономии, которую сейчас, как и во времена Галилея, Кеплера и Ньютона, трудно (да и не нужно) отделять от физики. Вот такой список (разумеется, меняющийся со временем) и составляет, по моему убеждению, некий «физический минимум». Это темы, о которых каждый физик должен иметь некоторое представление, знать, о чем идет речь. Быть может, менее тривиально мнение, что достичь подобной цели во все не так уж трудно, не так уж на это нужно потратить много времени и сил. Но для этого необходимы известные усилия не только со стороны «обучающихся», но и со стороны «старших товарищей». Именно, нужно отобрать темы для «физминимума», составить соответствующий «список» и прокомментировать его, пояснить, наполнить содержанием. Это я и попытался сделать на кафедре «Проблемы физики и астрофизики» МФТИ, организованной в 1968 г. Для этой цели читались специальные дополнительные лекции (всего их было прочитано около 70, прекратились они «по техническим причинам»; см. [2, с. 229]). Для этой же цели в 1970 г. была написана статья [1], носившая почти такое же название, как и настоящая. В дальнейшем статья неоднократно переиздавалась (конечно, с изменениями), ее последний вариант открывает книгу [2], изданную в 1995 г. За прошедшие с тех пор несколько лет не так уж много появилось нового. Такой недостаток можно компенсировать. Хуже другое — за 30 лет все мое изложение в какой-то мере морально устарело. Трудно это четко сформулировать, но такова судьба всех статей и книг подобного типа. К стати сказать, в юности для меня большую роль сыграла такая книга — это книга О. Д. Хвольсона «Физика наших дней (новые понятия современной физики в общедоступном изложении)», опубликованная в 1932 г. четвертым «просмотренным и дополненным» изданием [6]. Она, как мне сейчас представляется, уже тогда

несколько устарела, если говорить о самом новом (тогда — о квантовой механике). А О. Д. Хвольсон (1852–1934 гг.) был в то время даже немного моложе, чем я в настоящее время. В общем, если бы я даже захотел сейчас написать нужную (на мой взгляд) книгу заново, то не смог бы этого сделать. Но, как известно, «лучшее — враг хорошего» и в надежде, быть может иллюзорной, что мой «проект» все же, если не «хорош», то полезен, пишу настоящую статью. Ниже предлагается «список 2001 года» тех проблем, которые представляются «особенно важными и интересными». Как я полагаю, каждый физик должен быть знаком с этим «физминимумом» — знать, пусть и весьма поверхностно, о чем идет речь в отношении каждого из перечисленных вопросов.

Нужно ли подчеркивать, что выделение «особенно важных и интересных» вопросов ни в какой мере не эквивалентно объявлению массы других физических вопросов неважными или неинтересными? Это же очевидно, но привычка к перестраховке побуждает все же сделать еще пару замечаний. «Особенно важные» проблемы выделяются не тем, что другие не важны, а тем, что на обсуждаемый период времени находятся в фокусе внимания, в какой-то мере находятся на главных направлениях. Завтра эти проблемы могут оказаться уже в тылу, на смену им придут другие. Выделение «особенно важных» проблем, конечно, субъективно, возможны и нужны различные взгляды на этот счет. Однако я решительно хотел бы отметить упрек в том, что выделение производится мной под диктовку собственных научных интересов, собственной активной работы в физике. Так, больше всего мне в моей научной деятельности были и остаются дороги вопросы, связанные с излучением равномерно движущихся источников [7] (см. статью 2 в настоящем сборнике), но их в «списке» не было и нет. К сожалению, пришлось сталкиваться с осуждением «списка» по той причине, что там нет темы, интересующей критикующего. Вспоминаю в этой связи, как мой старший друг А. Л. Минц (1895–1974 гг.) после появления статьи [1] сказал мне: «Если бы Вы написали эту статью до избрания академиком, то никогда не стали бы им». Возможно, что он был прав, но все же я верю в большую широту взглядов коллег.

## **2. Список «особенно важных и интересных проблем» 2001 г.**

Как говорится в известной поговорке: «Чтобы узнать, каков пудинг, — нужно его есть» (The proof of the pudding is in the eating). Поэтому перейду к делу и предъявлю «список», о котором упоминалось.

1. Управляемый ядерный синтез.
2. Высокотемпературная и комнатотемпературная сверхпроводимость.

3. Металлический водород. Другие экзотические вещества.
4. Двумерная электронная жидкость (аномальный эффект Холла и некоторые другие эффекты).
5. Некоторые вопросы физики твердого тела (гетероструктуры в полупроводниках, квантовые ямы и точки, переходы металл-диэлектрик, волны зарядовой и спиновой плотности, мезоскопика).
6. Фазовые переходы второго рода и родственные им. Некоторые примеры таких переходов. Охлаждение (в частности, лазерное) до сверхнизких температур. Бозе-эйнштейновская конденсация в газах.
7. Физика поверхности. Кластеры.
8. Жидкие кристаллы. Сегнетоэлектрики.
9. Фуллерены. Нанотрубки.
10. Поведение вещества в сверхсильных магнитных полях.
11. Нелинейная физика. Турбулентность. Солитоны. Хаос. Странные аттракторы.
12. Разеры, гразеры, сверхмощные лазеры.
13. Сверхтяжелые элементы. Экзотические ядра.
14. Спектр масс. Кварки и глюоны. Квантовая хромодинамика. Кварк-глюонная плазма.
15. Единая теория слабого и электромагнитного взаимодействия.  $W^\pm$ - и  $Z^0$ -бозоны. Лептоны.
16. Стандартная модель. Великое объединение. Суперобъединение. Распад протона. Масса нейтрино. Магнитные монополи.
17. Фундаментальная длина. Взаимодействие частиц при высоких и сверхвысоких энергиях. Коллайдеры.
18. Несохранение CP-инвариантности.
19. Нелинейные явления в вакууме и в сверхсильных электромагнитных полях. Фазовые переходы в вакууме.
20. Струны. М-теория.
21. Экспериментальная проверка общей теории относительности.
22. Гравитационные волны, их детектирование.
23. Космологическая проблема. Инфляция.  $\Lambda$ -член и «квинт-эссенция». Связь между космологией и физикой высоких энергий.
24. Нейтронные звезды и пульсары. Сверхновые звезды.
25. Черные дыры. Космические струны (?).
26. Квазары и ядра галактик. Образование галактик.
27. Проблема темной материи (скрытой массы) и ее детектирования.
28. Происхождение космических лучей со сверхвысокой энергией.
29. Гамма-всплески. Гиперновые.
30. Нейтринная физика и астрономия. Нейтринные осцилляции.

Выделение именно 30 проблем (точнее, пунктов в списке), конечно, крайне условно. Да и некоторые из них можно было бы разделить. В [1] было 17 проблем, в [2] их было уже 23. В заметке [8] перечислены 24 проблемы. В письмах, поступивших в *Physics Today* по поводу этой заметки, высказывалось мнение [9], что в список нужно было бы поместить также образование звезд, атомную и молекулярную физику (я, правда, не знаю, что конкретно имеется в виду), вопрос о некоторых очень точных измерениях. Пришлось мне познакомиться и с другими предложениями дополнить «список». Некоторые из них учтены, но другие (например, касающиеся квантовых компьютеров, «оптики» атомных пучков, полупроводниковых приборов и т. д.) пришлось оставить без внимания.

Несомненно, любой «список» не догма, что-то можно выбрасывать, что-то дополнять в зависимости от интересов лекторов и авторов соответствующих статей. Более интересен вопрос об эволюции «списка» со временем, ибо это отражает процесс развития физики. В «списке» 1970–1971 гг. [1] кваркам было уделено лишь три строчки при перечислении различных попыток объяснить спектр масс. Это не свидетельствовало о моей проницательности, что признано в [2]. Однако ведь тогда (в 1970 г.) кваркам было всего лет 5–6 (в смысле возраста соответствующей гипотезы), и судьба представлений о кварках была действительно не ясна. Сейчас ситуация, конечно, совершенно иная. Правда, самый тяжелый  $t$ -кварк был обнаружен лишь в 1994 г. (его масса, по данным на 1999 г., составляет  $m_t = 176 \pm 6$  ГэВ). В списке [1] нет, естественно, фуллеренов, открытых в 1985 г. [10], нет гамма-всплесков (первое упоминание об их обнаружении было опубликовано в 1973 г.; см. [2] и ниже). Высокотемпературные сверхпроводники были синтезированы в 1986–1987 гг., но в списке [1], тем не менее, эта проблема рассматривалась довольно подробно, ибо она обсуждается начиная с 1964 г. Вообще, за 30 лет в физике сделано немало, но, по моему мнению, не так уж и много появилось существенно нового. Во всяком случае, «списки» в [1, 2] и вышеприведенный в какой-то мере характеризуют развитие и состояние физической и астрофизической проблематики с 1970–1971 гг. и по настоящее время.

### 3. Некоторые комментарии (макрофизика)

В [2] статья, близкая по названию к настоящей, занимает 155 страниц. В ней по каждой проблеме «списка» сделаны пояснения. Поступить здесь так же невозможно. Поэтому я ограничусь отдельными, иногда отрывочными замечаниями и коммен-

тариями \*). Их основная цель — отразить развитие за последние 4–5 лет, т. е. после [2].

Проблема управляемого ядерного синтеза (номер 1 в «списке») все еще не решена, хотя ей уже, как раз, 50 лет. Я помню, как работа в этом направлении в СССР зародилась в 1950 г. А. Д. Сахаров и И. Е. Тамм рассказали мне об идее магнитного термоядерного реактора, и я был рад заняться этой проблемой, ибо в разработке водородной бомбы мне тогда делать уже, практически, было нечего (обо всем этом рассказано в настоящем сборнике в статье 17, с. 354). Работа эта считалась сверхсекретной (гриф «строго секретно, особая папка»). Кстати сказать, я тогда и долгое время впоследствии думал, что интерес к «термояду» был в СССР обусловлен желанием создать неиссякаемый источник энергии. Однако, как мне уже в недавнее время рассказал И. Н. Головин, термоядерный реактор в то время интересовал «кого надо» в основном вовсе по другой причине — как источник нейтронов ( $n$ ) для производства трития ( $t$ ) (очевидно, с помощью реакции  ${}^6\text{Li} + n \rightarrow t + {}^4\text{He} + 4,6 \text{ МэВ}$ ). Так или иначе, проект считался столь секретным и важным, что меня (то ли в конце 1951 г., то ли в начале 1952 г.) от него отстранили — просто-напросто перестали выдавать в 1-м отделе рабочие тетради и собственные отчеты по этой работе. Такова была вершина моей «специальности». К счастью, уже в хрущевские времена И. В. Курчатов и его коллеги поняли, что проблему термояда быстро решить нельзя, и в 1956 г. она была рассекречена. В качестве реакции на пережитое я в 1962 г. опубликовал свои термоядерные отчеты [11], хотя нисколько не претендую на то, что сделал в этой области что-либо существенное.

За границей работы над термоядом также начинались (примерно в тот же период), в основном, как секретные, и их рассекречивание в СССР (совершенно нетривиальное для нашей страны по тем временам) сыграло большую положительную роль — обсуждение проблемы стало объектом международных конференций и сотрудничества. Но вот прошло уже 50 лет, а работающий (дающий энергию) термоядерный реактор еще не создан и, вероятно, этого момента придется ждать еще лет 15, а может быть, и больше (см. [2, § 1]; последний известный мне общедоступный обзор на эту тему — статья [12]; ссылки на советские работы см. в [13]). Работа над термоядерным синтезом ведется во всем мире и довольно

---

\*) Практически по каждому пункту можно было бы привести большое число ссылок на литературу. Но это представляется здесь явно неуместным. К тому же возникла бы проблема приоритета, касаться которой особенно не хотелось бы. Ниже я старался свести число ссылок к минимуму, иногда они носят случайный характер; предпочтение отдавалось, естественно, ссылкам на УФН, а также на *Physics Today*.

широким фронтом. Особенно продвинута и является фаворитом система токамак. Уже несколько лет разрабатывается международный проект ITER (International Termonuclear Experimental Reactor). Это гигантский токамак стоимостью около 10 миллиардов долларов, который предполагалось построить к 2005 г. в качестве подлинного прообраза термоядерного реактора будущего. Однако сейчас, когда конструирование в основном закончено, возникли трудности финансового характера. Кроме того, некоторые физики считают целесообразным раньше обдумывать альтернативные конструкции и проекты меньшего масштаба (см. [12] и, например, [14]). Дискуссия на этот счет ведется на страницах *Physics Today* и других журналов, но представляется неуместным останавливаться на ней в настоящей статье. В общем, сомнений в возможности создать реальный термоядерный реактор уже нет, и центр тяжести проблемы, насколько я понимаю, переместился в инженерную и экономическую области. Однако столь гигантская и уникальная установка, как ITER, или какая-то конкурирующая с ней, сохраняют, конечно, свой интерес для физики.

Что касается альтернативных путей синтеза легких ядер для получения энергии, то надежды на возможности «холодного термояда» (например, в электролитических элементах) оставлены [133], а мюонный катализ очень изящен (и, как я считаю, должен освещаться в Курсе общей физики), но представляется нереальным источником энергии, по крайней мере, без комбинации с делением урана и т. п. Существуют также проекты использования ускорителей с различными ухищрениями, но об успехах в этом направлении я не знаю. Наконец, возможен инерционный ядерный синтез и, конкретно, «лазерный термояд». Строятся гигантские соответствующие установки, но о них мало известно в силу засекреченности — на них, видимо, надеются имитировать термоядерные взрывы. Впрочем, возможно, что я просто не знаю ситуацию. Так или иначе, проблема инерционного синтеза явно важна и интересна.

Проблема управляемого ядерного синтеза теперь уже скорее техническая, чем физическая. И, во всяком случае, здесь нет какой-то таинственности, характерной для ряда нерешенных физических задач. Поэтому существует мнение, что проблему ядерного синтеза можно в наш «список» не вносить. Речь, однако, идет об очень важном вопросе, но все же еще не решенном. Поэтому я бы убрал эту проблему из «списка» лишь после того, как заработает первый эффективный термоядерный реактор.

Теперь о высокотемпературной и комнатнотемпературной сверхпроводимости (кратко ВТСП и КТСП, проблема 2). Человеку, далекому от физики твердого тела, может показаться, что проблему ВТСП пора из «списка» выбросить. В 1970 г. [1] ВТСП еще не были созданы, их получение было мечтой, насчет которой некоторые



ехидничали. Но ведь в 1986–1987 гг. такие материалы созданы, пусть они по инерции фигурируют в [2], но не пора ли перевести их в категорию огромного числа других веществ, изучаемых физиками и химиками? На деле это совершенно не так. Достаточно сказать, что механизм сверхпроводимости в купратах (наивысшая температура  $T_c = 135$  К достигнута для  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+x}$  без давления; под довольно большим давлением для этого купрата уже  $T_c \approx 164$  К) остается неясным [15–17]. Нет сомнений, у меня во всяком случае, что очень существенную роль играет электрон-фононное взаимодействие с сильной связью, но этого мало. Нужно еще «что-то», быть может, какое-то экситонное или спиновое взаимодействие. В общем, вопрос открыт, несмотря на огромные усилия, затраченные на изучение ВТСП (за 10 лет на эту тему появилось около 50 000 публикаций). Но главный вопрос в этой области, конечно, тесно связанный с предыдущим, это возможность создания КТСП. Ничему такая возможность не противоречит [15] (см. статьи 6 и 7 в настоящем сборнике), но и быть уверенным в успехе нельзя. Положение здесь вполне аналогично имевшему место до 1986–1987 гг. в отношении ВТСП.

В списке [2, § 2] фигурировала также проблема сверхдиамагнетизма — возможности создания равновесного несверхпроводящего диамагнетика с магнитной восприимчивостью  $\chi$ , близкой к  $\chi = -1/4\pi$  (как известно, формально можно считать, что для сверхпроводников, как раз,  $\chi = -1/4\pi$ ). На опыте известны диамагнетики с  $\chi = -(10^{-4} - 10^{-6})$ . Сверхдиамагнетиками можно назвать материалы с  $\chi = -(0,1/4\pi - 0,01/4\pi)$ . Не знаю, почему бы они не могли существовать, но ничего дельного по этому поводу сообщить не могу.

Металлический водород (проблема 3) еще не создан даже под давлением около 3 миллионов атмосфер (речь идет о низкой температуре). Однако исследование молекулярного водорода под большим давлением выявило у этого вещества целый ряд неожиданных и интересных особенностей [18, 141]. Далее, при сжатии ударными волнами и температуре около 3000 К обнаружен, по видимому, переход в металлическую (т.е. хорошо проводящую) жидкую фазу.

При высоком давлении обнаружены также своеобразные особенности у воды (точнее, у  $\text{H}_2\text{O}$ ) и ряда других веществ [18]. Помимо металлического водорода к числу «экзотических» веществ можно отнести фуллерены. Недавно, кроме «обычного» фуллерена  $\text{C}_{60}$ , начал исследоваться фуллерен  $\text{C}_{36}$ , быть может, обладающий при допировании очень высокой температурой сверхпроводящего перехода [19]. Примеры экзотических веществ можно преумножать.

Нобелевская премия по физике за 1998 год присуждена за открытие и объяснение дробного квантового эффекта Холла. Кстати сказать, за открытие целочисленного квантового холл-эффекта тоже была присуждена Нобелевская премия (в 1985 г.). Я упоминаю здесь и ниже о присуждении Нобелевских премий не из какого-то особого, иногда наблюдающегося чрезмерного уважения к этим премиям. Как и всякое дело рук человеческих, присуждение наград не следует абсолютизировать. В большинстве случаев даже лучшие награды несколько условны, да и бывают ошибки (см., например, [20, 21]). Вместе с тем, Нобелевские премии по физике в целом заслужили высокий авторитет и являются вехами, фиксирующими прогресс в физике.

Дробный квантовый холл-эффект был открыт в 1982 г. (целочисленный квантовый холл-эффект обнаружен в 1980 г.). Квантовый холл-эффект наблюдается при протекании тока в двумерном электронном «газе» (фактически, конечно, в жидкости, ибо взаимодействие между электронами существенно, особенно для дробного эффекта). Разумеется, «система» (двумерный проводящий слой на поверхности кремния) находится в перпендикулярном ему магнитном поле, как и при обычном эффекте Холла. Ограничусь здесь ссылками [22, 23] и замечанием, что неожиданной и особенно интересной особенностью дробного квантового холл-эффекта является существование квазичастиц с дробными зарядами  $e^* = (1/3)e$  ( $e$  — заряд электрона) и другими дробными зарядами (см. также [142, 143]). Нужно отметить, что двумерный электронный газ (или, вообще говоря, жидкость) интересен не только при исследовании холл-эффекта, но и в других случаях и условиях [24, 25].

Проблема 5 (некоторые вопросы физики твердого тела) сейчас буквально безбрежна. Я лишь наметил (в скобках) возможные темы и, если бы читал лекцию, остановился бы на гетероструктурах (включая сюда «квантовые точки») и на мезоскопике. Просто несколько лучше знаком с этими вопросами, чем с другими из той же области. Ограничусь ссылкой на целый выпуск УФН [24], посвященный этой тематике. Сошлюсь и на последнюю замеченную статью о переходах металл–диэлектрик [26]. Выбрать наиболее интересное нелегко, в этом, как раз, и нужно помочь читателям и слушателям.

В отношении проблемы 6 (фазовые переходы и т. д.) хочу добавить к [2, § 5] следующее. Открытие низкотемпературных сверхтекучих фаз <sup>3</sup>He отмечено Нобелевской премией по физике за 1996 г. [27]. Особое внимание за последние три года привлекает к себе бозе-эйнштейновская конденсация (БЭК) газов. Это, несомненно, очень интересные работы, но «бум», который с ними оказался связан, по моему мнению, в значительной мере обусловлен незна-

нием истории. Еще в 1925 г. Эйнштейн обратил внимание на БЭК [28], и сейчас этот вопрос, естественно, освещается в учебниках (см., например, [29, § 62]). Длительное время, правда, на БЭК не обращали внимания и иногда даже сомневались в ее реальности. Но эти времена давно прошли, особенно после 1938 г., когда Ф. Лондон связал БЭК со сверхтекучестью  $^4\text{He}$  [30]. Разумеется, гелий II — это жидкость, и БЭК проявляется, так сказать, не в чистом виде. Стремление наблюдать БЭК в разреженном газе вполне понятно и оправдано, но несерьезно видеть в этом открытие чего-то неожиданного и принципиально нового в физике (см. аналогичное замечание в [31]). Другое дело, что наблюдение БЭК в газах Rb, Na, Li и, наконец, в H, осуществленное в 1995 г. и позже, является очень большим достижением экспериментальной физики. Оно стало возможно только в результате развития методов охлаждения газов до сверхнизких температур и удержания их в ловушках (за это, кстати, была присуждена Нобелевская премия по физике за 1997 г. [32]). Осуществление БЭК в газах повлекло за собой поток теоретических работ (см. обзоры [33, 34]; новые статьи непрерывно появляются, в частности, в *Physical Review Letters* \*). В бозе-эйнштейновском конденсате атомы находятся в когерентном состоянии и можно наблюдать интерференционные явления, что привело к появлению понятия об «атомном лазере» (см., например, [35, 36]). Весьма интересна и БЭК в двумерном газе [127].

Темы 7 и 8 весьма широкие, я за ними не слежу и поэтому не могу выделить что-то новое и важное. Разве что хочется отметить повышенный и вполне оправданный интерес к кластерам из различных атомов и молекул (речь идет об образованиях, содержащих небольшое число частиц [134]). Нужно отметить также исследования жидких кристаллов и одновременно сегнетоэлектриков (или, по английской терминологии, ферроэлектриков). Сошлюсь лишь на последнюю известную мне работу по данному вопросу [37]. Привлекает к себе внимание также изучение тонких сегнетоэлектрических пленок [38].

О фуллеренах (проблема 9) уже вскользь упоминалось (см. также [10, 19]), и вместе с углеродными нанотрубками (nanotubes) [39] эта область исследований находится в цвету.

О веществе в сверхсильных магнитных полях (конкретно, в коре нейтронных звезд), а также о моделировании соответствующих эффектов в полупроводниках (проблема 10) не знаю ничего нового. Подобное замечание не должно обескураживать или вы-

---

\*) Этот журнал превратился сейчас в самый престижный в области физики. Он выходит еженедельно, причем в каждом номере помещается около 60 статей, занимающих (за редкими исключениями) не более 4-х страниц каждая. Например, в томе 81, охватывающем 2-е полугодие 1998 г., около 6000 страниц.

зывать такой вопрос: зачем же тогда помещать эти проблемы в «список»? Во-первых, в [2, § 8] я попытался пояснить физическую сущность этой задачи и почему она, на мой взгляд, имеет некую прелесть для физика; повторяться здесь нет особых оснований и, главное, места. Во-вторых, понимание важности вопроса вовсе не обязательно связано с достаточным знакомством с его состоянием на сегодняшний день. Вся моя «программа», как раз, и имеет цель стимулировать интерес и побудить специалистов освещать состояние проблемы неспециалистам в доступных статьях и лекциях.

В отношении нелинейной физики (проблемы 11 в «списке») ситуация иная, чем в предыдущем случае. Материала очень много, в *Physical Review Letters* статьи появляются в каждом номере, там имеется даже специальный раздел, частично посвященный нелинейной динамике. Но, кроме того, нелинейная физика и, в частности, проблемы, перечисленные под номером 11, находят отражение и в других разделах журнала; в сумме нелинейной физике посвящено до 10–20% всего материала (см., например, [40]). Вообще, нужно, быть может, лишний раз подчеркнуть в дополнение к [2, § 10], что внимание к нелинейной физике все усиливается и усиливается. В значительной мере это связано с тем, что использование современной вычислительной техники позволяет анализировать задачи, об исследовании которых раньше можно было только мечтать.

Недаром XX век иногда называли не только атомным веком, но и лазерным веком. Совершенствование лазеров и расширение области их применения идет полным ходом. Но тема 12 — это не лазеры вообще, а раньше всего — сверхмощные лазеры. Так, уже достигнута интенсивность (плотность мощности)  $I \sim (10^{20} - 10^{21}) \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$ . При такой интенсивности напряженность электрического поля порядка  $10^{12} \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$ , т.е. оно на два порядка сильнее поля протона на основном уровне атома водорода. Магнитное поле достигает  $10^9 - 10^{10} \text{ Э}$  [41]. При этом используются очень короткие импульсы длительностью до  $10^{-15} \text{ с}$  (т.е. до фемтосекунды). Использование таких импульсов открывает целый ряд возможностей, в частности, для получения гармоник, лежащих уже в рентгеновском диапазоне и, соответственно, рентгеновских импульсов с длительностью в аттосекунды ( $1 \text{ а} = 10^{-18} \text{ с}$ ) [41, 42]. Родственная проблема — создание и использование лазеров и гразеров — аналогов лазеров, соответственно, в рентгеновском и гамма-диапазонах. Прогресса в этой области можно ожидать при использовании идеи о создании лазеров без инверсии [144].

Проблема 13 — из области ядерной физики. Это, конечно, большая область, плохо мне знакомая. Поэтому я выделил только два вопроса. Во-первых, это далекие трансурановые элементы в связи

с надеждами на то, что отдельные изотопы в силу оболочечных эффектов живут долго (в качестве такого изотопа в литературе указывалось на ядро с  $Z = 114$  и с числом нейтронов  $N = 184$ , т.е. с массовым числом  $A = Z + N = 298$ ). Известные трансурановые элементы с  $Z < 114$  живут лишь секунды или доли секунды. Появившиеся в литературе (см. [2, § 11]) указания на существование в космических лучах долгоживущих (речь идет о миллионах лет) трансурановых ядер пока подтверждены не были. В начале 1999 г. появилось сообщение [124] о том, что в Дубне синтезирован 114-й элемент с массовым числом 289, живущий около 30 секунд. Поэтому возникла надежда на то, что элемент  ${}_{298}^{114}$ , действительно, окажется очень долгоживущим. Во-вторых, упомянуты «экзотические» ядра. Это ядра из нуклонов и антинуклонов, какие-то гипотетические ядра с повышенной плотностью, не говоря уже о ядрах несферической формы и с некоторыми другими особенностями. Сюда же примыкает проблема кварковой материи и кварк-глюонной плазмы (см., например, [43, 135–137, 145] и указанную там литературу).

#### 4. Некоторые комментарии (микрофизика)

Проблемы с 14-й по 20-ю относятся к области, которую именуем микрофизикой, хотя ее правильнее всего, по-видимому, называть физикой элементарных частиц. Одно время, правда, это название стало как-то редко употребляться, поскольку устарело. Имеется в виду тот факт, что на определенном этапе элементарными считались, в частности, нуклоны и мезоны. Сейчас же известно, что они состоят (правда, в несколько условном смысле) из кварков и антикварков. Высказывались предположения, что и кварки «состоят» из каких-то частиц (преонов и т.д.). Однако на сегодняшний день для подобных гипотез нет никаких оснований, а «матрешка» — деление вещества на все более «мелкие» части — должна же когда-то исчерпаться. Так или иначе, на сегодняшний день мы считаем неделимыми, и в этом смысле элементарными, кварки — их, не считая антикварки, 6 «ароматов» (flavours): u (up), d (down), c (charm), s (strangeness), t (top) и b (bottom); антикварки обозначаются с помощью черточки сверху ( $\bar{u}$  и т.д.). Далее, элементарны лептоны: электрон и позитрон ( $e^-$  и  $e^+$ ),  $\mu^\pm$ ,  $\tau^\pm$ , соответствующие нейтрино  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ . Наконец, элементарными являются 4 векторных бозона (фотон  $\gamma$ , глюон g,  $Z^0$ ,  $W^\pm$ ). Детальнее о состоянии физики элементарных частиц, в целом, писать здесь не буду, ибо могу сослаться, помимо [2], на обзор Л.Б.Окуня «Современное состояние физики элементарных частиц», опубликованный в УФН в 1998 г. [44] (см. также [146, 159]). Все, что там написано, я включаю в «физический минимум».

Сделаю, однако, ряд замечаний и добавлений. Одна из самых актуальных задач (в [44] она даже именуется задачей № 1) физики элементарных частиц — поиски и, как все надеются, обнаружение хиггса — скалярного хиггс-бозона со спином 0. По оценкам, масса хиггса меньше 1000 ГэВ, но скорее даже меньше 200 ГэВ. Поиски ведутся и будут вестись на имеющихся и реконструируемых ускорителях (в ЦЕРНе и Фермилабе). Главная же надежда физики высоких энергий (возможно, и при поисках хиггса) — это ускоритель ЛНС (Large Hadron Collider), строящийся в ЦЕРНе. В нем будет достигнута энергия в 14 ТэВ (в системе центра масс сталкивающихся нуклонов), но только, видимо, в 2005 г. Другая важнейшая задача (№ 2, согласно [44]) — поиски суперсимметричных частиц (см. [158] и ниже). Нельзя не отметить исследование проблемы СР-несохранения и, в силу справедливости СРТ-инвариантности (совместных пространственной инверсии Р, зарядового сопряжения С и обращения знака времени Т), также и несохранения Т-инвариантности (неинвариантность при замене знака времени  $t \rightarrow -t$ ). Разумеется, это фундаментальный вопрос, в частности, с точки зрения объяснения необратимости физических процессов (см. раздел 6). СР-несохранение было обнаружено в 1964 г. на примере распада мезона  $K_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ . Кстати, это открытие в 1980 г. было отмечено Нобелевской премией по физике. Вместе с тем, известные процессы с СР-несохранением довольно мало вероятны (по сравнению с процессами, сохраняющими СР-инвариантность). Исследование процессов с СР-несохранением продолжается, их природа неясна. Недавно обнаружен еще один процесс, идущий с СР-несохранением, но также относительно маловероятный [45]. Наконец, идут поиски СР-несохранения при распаде В-мезонов [46]. Распад протона пока не обнаружен. По данным [125] среднее время жизни протона, если определить его по реакции  $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ , больше  $1,6 \cdot 10^{33}$  года. О массе нейтрино, упоминаемой в числе прочих «разделов» проблемы 16, будет сказано ниже при обсуждении проблемы 30 (нейтринная физика и астрономия).

Остановлюсь здесь на проблеме 17 и, более конкретно, фундаментальной длине. «Элементарщики», как иногда называют специализирующихся в области физики элементарных частиц, вероятно, пренебрежительно пожмут плечами — что это еще за проблема? Возможно, что если бы я начал составлять свой «список» сегодня, я тоже не упомянул бы о такой проблеме, звучавшей «во весь голос» лишь много лет назад и отмеченной в [1], а затем и в [2]. Только в конце 40-х годов были развиты способы (метод перенормировок и т. д.; см., например, [47]), позволившие без ограничений использовать квантовую электродинамику. До этого при расчетах встречались расходящиеся выражения и для

получения конечных результатов приходилось проводить «обрезание» на некоторой максимальной энергии  $E_{f_0}$  или отвечающей ей длине  $l_{f_0} = \hbar c/E_{f_0}$  (здесь  $\hbar = 1,055 \cdot 10^{27}$  эрг · с — квантовая постоянная). Чаще всего встречалось значение  $l_{f_0} \sim 10^{17}$  см и  $E_{f_0} = \hbar c/l_{f_0} \sim 3$  эрг  $\sim 10^{12}$  эВ = 1 ТэВ. Примерно такие же значения отвечают наибольшим энергиям (в системе центра масс) и наименьшим «прицельным параметрам», достигнутым на современных ускорителях. При этом «все в порядке» — известная физика, например квантовая электродинамика, хорошо «работает». Отсюда можно заключить, что до расстояний  $l_{f_0} \sim 10^{-17}$  см (чаще, правда, указывают длину в  $10^{-16}$  см) и времен  $t_{f_0} \sim l_{f_0}/c \sim 10^{-27}$  с существующие пространственно-временные представления справедливы. А что происходит в меньших масштабах? Такой вопрос в сочетании с имевшимися затруднениями теории и привел к гипотезе о существовании некоторой фундаментальной длины  $l_f$  и времени  $t_f \sim l_f/c$ , при которых вступает в строй «новая физика» и, конкретно, какие-то необычные пространственно-временные представления («зернистое пространство-время» и т. п.). Сегодня нет никаких оснований для введения длины  $l_f \sim 10^{-17}$  см (см., однако, ниже). С другой стороны, в физике известна и играет важную роль некоторая другая фундаментальная длина, а именно планковская, или гравитационная длина  $l_g = \sqrt{G\hbar/c^3} = 1,6 \cdot 10^{-33}$  см (здесь  $G = 6,67 \cdot 10^{-8}$  см · (г · с<sup>2</sup>)<sup>-1</sup> — гравитационная постоянная); ей отвечают время  $t_g = l_g/c \sim 10^{-43}$  с и энергия  $E_g = \hbar c/l_g \sim 10^{19}$  ГэВ. Нередко фигурирует и планковская масса  $m_g = E_g/c^2 \sim \sqrt{\hbar c/G} \sim 10^{-5}$  г. Физический смысл длины  $l_g$  заключается в том, что при меньших масштабах уже нельзя пользоваться классической релятивистской теорией гравитации и, в частности, общей теорией относительности (ОТО), построение которой было завершено Эйнштейном в 1915 г. \*). Дело в том, что при  $l \sim l_g$ , и подавно при масштабах  $l < l_g$ , уже велики квантовые флуктуации метрики  $g_{ik}$ . Поэтому здесь нужно использовать квантовую теорию гравитации, еще не созданную в сколько-нибудь законченной форме. Итак, длина  $l_g$  — это явно некоторая фундаментальная длина, ограничивающая классические представления о пространстве-времени. Но можно ли утверждать, что эти представления не «отказывают» еще раньше при некоторой фундаментальной длине  $l_f > l_g$ ? Как ска-

---

\*) В ОТО гравитационное поле полностью описывается метрическим тензором  $g_{ik}$ . Кроме того,  $g_{ik}$  подчиняются вполне определенным уравнениям (см., например, [48]). Существует немало других классических релятивистских теорий гравитации, в которых фигурируют помимо  $g_{ik}$  и другие переменные (например, некоторое скалярное поле  $\varphi$ ), появляются более высокие производные и т. д.

зано, явно  $l_f < l_{f_0} \sim 10^{-17}$  см, но ведь это значение  $l_{f_0}$  на целых 16 порядков больше  $l_g$ . Физики привыкли к экстраполяциям гигантского масштаба, например, к предположению о тождественности законов и различных данных, полученных на Земле и во всей Вселенной или, во всяком случае, в колоссальных пространственно-временных областях. Примером подобной очень далеко идущей экстраполяции является и гипотеза о том, что на всем интервале между  $l \sim l_{f_0} \sim 10^{-17}$  см и  $l \sim l_g \sim 10^{-33}$  см никакой иной фундаментальной длины  $l_f$  не существует. Такая гипотеза сейчас естественна, но не доказана. О последнем следует помнить, в силу чего я и упоминаю об этой проблеме в «списке»<sup>2</sup>. По существу же дела можно отметить, что «атака на длину» ведется с двух сторон. Со стороны сравнительно низких энергий — это строительство новых ускорителей (коллайдеров) и в первую очередь уже упомянутого ЛНС (см. [44, 49] и гл. 11 и 12 в [50]). На нем, как упоминалось, будет достигнута энергия (в системе центра масс)  $E_c = 14$  ТэВ, что отвечает длине  $l = \hbar c/E_c = 1,4 \cdot 10^{-18}$  см. В космических лучах зарегистрированы частицы с максимальной энергией  $E = 3 \cdot 10^{20}$  эВ (в лабораторной системе отсчета; протон с такой энергией при столкновении с покоящимся нуклоном в системе центра масс имеет энергию  $E_c \sim 800$  ТэВ и  $l_c \sim 10^{-20}$  см). Однако таких частиц крайне мало и непосредственно использовать их в физике высоких энергий невозможно [51, 52]. Длины, сопоставимые с  $l_g$ , фигурируют лишь в космологии (и, в принципе, внутри горизонта событий черных дыр). В физике элементарных частиц довольно широко оперируют с энергиями  $E_0 \sim 10^{16}$  ГэВ, фигурирующими в еще незавершенной теории Великого объединения — объединения электрослабого и сильного взаимодействий. Длина  $l_0 = \hbar c/E_0 \sim 10^{-30}$  см и все же на три порядка больше  $l_g$ . Что происходит в области масштабов между  $l_0$  и  $l_g$ , по-видимому, сказать совсем трудно. Быть может, здесь и притаилась какая-то фундаментальная длина  $l_f$ , такая, что  $l_g < l_f < l_0$ ? Конечно, на сегодняшний день такое предположение — это чистая спекуляция.

Кстати, о терминологии. Теория сильного взаимодействия именуется квантовой хромодинамикой. Как уже было сказано, схема, объединяющая электромагнитное, слабое и сильное взаимодействия, называется Великим объединением. Вместе с тем, реально используемая современная теория элементарных частиц, состоящая из теории электрослабого взаимодействия и квантовой хромодинамики, называется стандартной моделью (standart model). Наконец, теории, в которых Великое объединение (до конца еще не созданное) обобщается таким образом, что включает еще и гравитацию, называют суперобъединением. Такого удовлетворительного суперобъединения построить еще не удалось. Обсуждаемая



ниже теория суперструн претендует на роль суперобъединения, но цель пока что еще не достигнута.

В отношении совокупности проблем 19 можно утверждать, что они очень актуальны, но я не знаю, что добавить по сравнению со сказанным в [2, § 17]. Вероятно, упустил какие-то новости, достойные упоминания (укажу лишь на статью [53], посвященную фазовым переходам в ранней Вселенной). Между прочим, в [2, § 7] я цитирую замечание, сделанное Эйнштейном еще в 1920 г. [54]: «...общая теория относительности наделяет пространство физическими свойствами, таким образом, в этом смысле эфир существует...». Квантовая теория «наделила пространство» еще виртуальными парами различных фермионов и нулевыми колебаниями электромагнитного и других бозе-полей. Казалось бы, это всем известно. Тем не менее *Physics Today* — орган Американского физического общества и еще 9 аналогичных обществ открывается в 1999 г. статьей «The persistence of ether», посвященной рассуждениям о физическом вакууме, именуемом эфиром [55].

До того, как перейти к проблемам астрофизического типа и близким к ним (номера 21–30 в «списке»), остановлюсь на проблеме 20: струны и М-теория. Это, можно сказать, фронтное направление в теоретической физике на сегодняшний день. Кстати, вместо термина «струны» часто употребляют название суперструны (*superstrings*), во-первых, чтобы не было путаницы с космическими струнами (см. ниже о проблеме 25) и, во-вторых, чтобы подчеркнуть использование представления о суперсимметрии (см. [158]). В суперсимметричной теории каждой частице отвечает (содержится в уравнениях) ее партнер с другой статистикой, например, фотону (бозону со спином единица) отвечает фотино (фермион со спином  $1/2$ ) и т. д. Нужно сразу отметить, что суперсимметричные партнеры (частицы) еще не обнаружены. Их масса, по видимому, не меньше 100–1000 ГэВ. Поиски этих частиц — одна из основных задач экспериментальной физики высоких энергий как на существующих или реконструируемых ускорителях, так и на ЛНС.

Теоретическая физика еще не может ответить на целый ряд вопросов, например: как построить квантовую теорию гравитации и объединить ее с теорией других взаимодействий? почему существует, по-видимому, только 6 типов (ароматов) кварков и 6 лептонов? почему масса электронного нейтрино очень мала? почему  $\mu$ - и  $\tau$ -лептоны отличаются по своей массе от электрона именно в известное из эксперимента число раз? как определить из теории постоянную тонкой структуры  $\alpha = e^2/\hbar c \approx 1/137$  и ряд других постоянных и т. д. Другими словами, как ни грандиозны и впечатляющи достижения физики, нерешенных фундаментальных проблем предостаточно. Теория струн еще не ответила на подобные

вопросы, но обещает успехи в нужном направлении. Поскольку я не могу сослаться на достаточно доступную статью о струнах на русском языке, я было собрался здесь кое-что пояснить по существу. Однако оказалось, что не смогу сделать этого на должном уровне в кратком виде и только пересказывал бы известные мне популярные обзоры [56–59] и [50, гл. 13]. Сделаю лишь ряд замечаний.

В квантовой механике и в квантовой теории поля элементарные частицы считаются точечными. В теории струн элементарные частицы — это колебания одномерных объектов (струн), имеющих характерные размеры  $l_s \sim l_g \sim 10^{-33}$  см (или, скажем,  $l_s \sim 100l_g$ ). Струны могут быть конечной длины (некоторый «отрезок») или в виде колечек. Струны рассматриваются не в 4-мерном («обычном») пространстве, а в многомерных пространствах, скажем, с 10-ю или 11-ю измерениями. Теория суперсимметрична. Замена точечных частиц неточечными — это далеко не новая идея, ее основная трудность — релятивистская формулировка. В качестве примера позволю себе сослаться на работу И. Е. Тамма и свою [60] (см. также [61]). Никаких успехов на этом пути до теории струн достигнуто не было. Идея многомерных пространств, т. е. введения 5-го и большего числа измерений еще значительно старше (теория Калуцы–Кляйна [62, 63]; см. [64, с. 296]), но также до теории струн не привела к каким-либо физическим результатам. Впрочем, и в теории струн можно упомянуть главным образом о «физнадеждах», как любил говорить Л. Д. Ландау, а не о результатах. Но что называть результатами? Ведь математические построения и обнаружение различных свойств симметрии — тоже результаты. Что же касается физики, то ответа на какой-нибудь вопрос типа перечисленных выше теория струн еще не дала. Это не помешало физикам, исследующим струны, говорить уже не только о «первой суперструнной революции» (1984–1985 гг.), но уже и о «второй суперструнной революции» (1994–?) [57]\*). Употреблялась в применении к теории струн и не слишком скромная терминология — «теория всего» («Theory of Everything»). Нужно отметить и тот факт, что теория струн не так уж молода; согласно [50, гл. 13], ей уже 30 лет, да и после «первой суперструнной революции» прошло около 15 лет, а ясных физических результатов еще

---

\*) В широко известной и популярной на Западе книге Куна «Структура научных революций» [65] ее автор пишет: «Для меня революция представляет собой вид изменения, включающий определенный вид реконструкции предписаний, которым руководствуется группа. Но оно не обязательно должно быть большим изменением или казаться революционным тем, кто находится вне отдельного (замкнутого) сообщества, состоящего, быть может, не более чем из 25 человек» ([65, с. 227]). Если пользоваться подобным определением революции (свое мнение о нем я уже имел возможность высказать; см. [2, с. 159]), то в большинстве областей физики революции происходят чуть ли не через каждые несколько лет.

нет. В этой связи стоит напомнить, что подлинная революция в физике — создание квантовой механики, в основном де Бройлем, Шрёдингером, Гейзенбергом, Дираком и Бором — продолжалась не более 5–6 лет (1924–1930 гг.). Общую теорию относительности Эйнштейн создавал 8 лет (1907–1915 гг.). Но этим замечаниям я не придаю особого значения. Стоящие перед теоретической физикой задачи и вопросы, о которых идет речь, крайне сложны и глубоки, и сколько еще потребуется времени, чтобы найти ответы, — неизвестно. Чувствуется, что теория суперструн — это нечто глубокое и развивающееся. Сами ее авторы претендуют на понимание лишь некоторых предельных случаев и говорят только о намеках на некоторую более общую теорию, которую называют М-теорией. При этом буква М выбрана в связи с тем, что эту будущую теорию называют магической или мистической (magic or mysterious) [56]. Теория суперструн сильно укрепила бы свои позиции в случае обнаружения суперсимметричных частиц, хотя имеются и другие пути ее проверки [59].

### 5. Некоторые комментарии (астрофизика)

К астрофизике относим проблемы 21–30, что в некоторых случаях весьма условно. В частности, и даже в особенности, это относится к вопросу об экспериментальной проверке ОТО — общей теории относительности (проблема 21). Логичнее было бы ставить вопрос об анализе релятивистских эффектов в гравитации (см., например, [66]). Однако, учитывая как фактически существующую ситуацию, так и историю соответствующих исследований, правильнее иметь в виду именно проверку ОТО — простейшей релятивистской теории гравитации\*). Эффекты ОТО в пределах Солнечной системы весьма малы (наибольшие эффекты порядка  $|\varphi|/c^2$ , где  $\varphi$  — ньютоновский гравитационный потенциал; даже на поверхности Солнца  $|\varphi|/c^2 = GM_{\odot}/(r_{\odot}c^2) = 2,12 \cdot 10^{-6}$ ). Именно поэтому проверка, с успехом начатая в 1919 г. и продолжающаяся до сих пор, не приводит к точностям, к которым мы привыкли в атомной физике. По данным, сообщенным на 19th Texas Symposium «Relativistic astrophysics and cosmology» (декабрь 1998 г.), для отклонения радиоволн Солнцем отношение наблюдаемой величины к вычисленной согласно ОТО составляет  $0,99997 \pm 0,00016$ . Такое же отношение для поворота перигелия Меркурия равно  $1,000 \pm 0,001$ . В общем, ОТО проверена в слабом гравитационном поле, когда  $|\varphi|/c^2 \ll 1$ , с погрешностью до согой доли процента; при этом никаких отклонений от ОТО не обнаружено. Дальнейшая проверка

\*) Логически простейшей релятивистской теорией гравитации является теория, в которой гравитационное поле описывается некоторым скаляром, а не метрическим тензором  $g_{ik}$ , как в ОТО. Но скалярная теория заведомо противоречит опыту (например, в этой теории световые лучи Солнцем совсем не отклоняются).

даже в слабом поле (например, с учетом членов  $\varphi^2/c^4$ ) вполне осмыслена, но как-то не вызывает энтузиазма — уж очень маловероятно заметить такие отклонения от ОТО, а эксперименты очень сложны. Тем не менее целый ряд проектов на этот счет имеется и будет, по-видимому, осуществляться. Особо стоит вопрос о проверке принципа эквивалентности; его справедливость подтверждена с точностью  $10^{-12}$ , но это не новый результат [66].

В связи с обсуждением отклонения световых лучей в поле Солнца есть повод для небезынтересных замечаний исторического характера. Вообще-то, по моему мнению, вопросы приоритета не должны занимать видное место в лекциях и статьях, программа которых излагается здесь. Дело в том, что часто подобные вопросы весьма запутаны и решаются в литературе довольно случайным образом. Некоторые утверждения при этом носят характер *adapted by repetition only* (т. е. принятых только в результате многократного повторения). Предпринимать же по каждой теме историческое исследование — дело хлопотное, да и отвлекает от физической сути дела. Вместе с тем, некоторые исторические курсы помогают пониманию, не говоря уже об обязанности отдать дань первооткрывателям. Отклонения световых лучей в гравитационном поле хороший тому пример. Намек на такой эффект имеется уже у Ньютона. В рамках корпускулярной теории света и в предположении о равенстве или даже пропорциональности тяжелой и инертной массы наличие отклонения очевидно. Расчет для отклонения светового луча в поле Солнца был произведен Золднером еще в 1801 г. Угол отклонения оказался равным

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

где  $R$  — прицельный параметр (наименьшее расстояние между лучом и центром Солнца) и  $r_g = 2GM/c^2$  — гравитационный радиус ( $r_{g\odot} = 3 \cdot 10^5$  см, поскольку масса Солнца  $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33}$  г).

Эйнштейн, очевидно, не зная об этом результате, еще в первой публикации на пути создания ОТО (в 1907 г.) указал на отклонение лучей, а в 1911 г. получил выражение (1) на основе еще незавершенной ОТО — учитывалось лишь изменение компоненты  $g_{00} = 1 + 2\varphi/c^2$ . После создания ОТО в 1915 г. в том же году был получен окончательный результат

$$\alpha = \frac{4GM_{\odot}}{c^2 R} = \frac{2r_{g\odot}}{R} = 1'',725 \frac{r_{\odot}}{R}, \quad (2)$$

где  $r_{\odot} = 7 \cdot 10^{10}$  см — радиус фотосферы Солнца. Отличие (2) от (1) связано с учетом того, что изменяются и компоненты метрического тензора  $g_{11} = g_{22} = -(1 - 2\varphi/c^2)$ . Выражения (1) и (2)

отличаются ровно в два раза, но классический расчет непоследователен (речь идет о применении классической механики к корпускуле, движущейся со скоростью света), и поэтому отношение 2 случайно. Отклонение световых лучей в поле Солнца впервые было наблюдеено в 1919 г. и подтвердило выражение ОТО (2), хотя и с небольшой точностью. О дальнейших уточнениях сказано выше (ссылки здесь не приводятся, их можно найти в [66, 67]).

В астрофизике отклонение лучей в поле тяжести все шире используется при наблюдении «линзирования», т. е. фокусировки электромагнитных волн под действием гравитационного поля, в применении как к галактикам (они линзируют свет и радиоволны квазаров и других галактик), так и к звездам (микролинзирование более удаленных звезд) [67]. Разумеется, речь при этом не идет о проверке ОТО (точность измерений сравнительно невелика), а об ее использовании. Замечу, что эффект линзирования с его характерными чертами впервые, насколько известно, был рассмотрен Хвольсоном в 1924 г. [68] и Эйнштейном в 1936 г. [69]. Возникающий при линзировании характерный конус называют конусом Эйнштейна или Эйнштейна–Хвольсона. Разумеется, правильно лишь последнее название. Когда-то наблюдать гравитационные линзы считалось практически невозможным (см., например, [69]). Однако в 1979 г. было обнаружено линзирование одного из квазаров. В настоящее время наблюдение линзирования и микролинзирования — довольно широко используемый астрономический метод (см. также [148]). В частности, данные о линзировании позволяют определить постоянную Хаббла  $H_0$ . Результат находится в согласии с другими данными, которые приводятся ниже.

По настоящему актуальна проверка ОТО в сильных полях — для нейтронных звезд (на их поверхности  $|\varphi|/c^2 \sim 0,1-0,3$ ) и вблизи черных дыр и, вообще, для черных дыр. Так, недавно предложен метод [70] проверки ОТО в сильном поле по колебаниям излучения в двойной звезде, одна из компонент которой является нейтронной звездой. Хотя черные дыры и можно было вообразить себе в дорелятивистской физике, но по сути дела — это замечательный релятивистский объект. О черных дырах еще пойдет речь ниже, но уже здесь можно отметить, что их обнаружение подтверждает ОТО. Однако, насколько я себе представляю ситуацию, нельзя утверждать, что известное о черных дырах подтверждает именно ОТО, а не некоторые отличающиеся от нее релятивистские теории гравитации.

Существенной проверкой ОТО (вплоть до членов порядка  $(v/c)^5$ ) является исследование двойного пульсара PSR 1916+16. Оно показало, что потеря энергии двумя движущимися нейтронными звездами, образующими двойную систему, находится в полном согласии с ОТО при учете гравитационного излучения (интенсивность

которого была вычислена Эйнштейном в 1918 г.). За эту работу была присуждена Нобелевская премия по физике за 1993 г. [71].

Упомянутая сейчас работа не оставляет сомнений в существовании гравитационных волн. Впрочем, ни один грамотный физик не мог в этом сомневаться и ранее (другое дело, что количественное соответствие ОТО заранее гарантировать было нельзя). Но имеется другая проблема (она фигурирует в списке под номером 22) — прием гравитационных волн, приходящих из космоса. Задача технически очень сложна, для ее решения строятся гигантские установки. Так, система LIGO (Laser interferometer gravitational-wave observatory, США) состоит из двух далеко разнесенных «антенн» длиной 4 км каждая. В этой установке можно будет заметить происходящее под действием приходящей гравитационной волны смещение зеркал на  $10^{-16}$  см, а в дальнейшем и меньшие смещения. В ближайшие годы LIGO и аналогичные установки, строящиеся в Европе и Японии, вступят в строй. Так будет положено начало гравитационно-волновой астрономии (подробнее см. [72]). Для известной ориентации замечу, что радиоастрономия родилась в 1931 г., а начала интенсивно развиваться после 1945 г. Галактическая рентгеновская астрономия возникла в 1962 г. Гамма-астрономия и нейтринная астрономия еще моложе. С развитием гравитационно-волновой астрономии будет освоен последний известный «канал», по которому мы можем получать астрофизическую информацию. Как и в других случаях, весьма важны будут совместные (одновременные) измерения в различных «каналах». Речь может идти, например, об исследовании образования сверхмассивных черных дыр совместно в нейтринном, гравитационно-волновом и гамма «каналах» [73]. Подробнее о приеме гравитационных волн писать здесь не буду, отсылая к [2, § 20] и, главное, к [72] и цитируемой там литературе.

Совокупность проблем, указанных в списке под номером 23, это, пожалуй, самое главное в астрофизике. Сюда отнесена и космология (не все согласятся с такой классификацией, но суть дела от этого не меняется). Несомненно, космологическая проблема — великая проблема. Внимание она привлекала к себе всегда: ведь системы Птолемея и Коперника — это тоже космологические теории. В рамках физики XIX века космология в теоретическом плане создавалась в работах Эйнштейна (1917 г.), Фридмана (1922 и 1924 гг.), Леметра (1927 г.) и затем многих других. Но до конца 40-х годов все наблюдения, существенные с космологической точки зрения, велись в оптическом диапазоне. Поэтому открыт был лишь закон красного смещения, и тем самым установлено расширение Метагалактики (работы Хаббла, которые обычно датируются 1929 годом, хотя красное смещение наблюдалось и ранее, и не только Хабблом). Космологическое красное смещение

справедливо связали с релятивистской моделью расширяющейся Вселенной Фридмана, но энергичное развитие космологии началось только после того, как в 1965 г. было открыто реликтовое тепловое радиоизлучение с температурой  $T_r = 2,7$  К. В настоящее время именно измерения в радиодиапазоне играют наиболее важную роль среди наблюдений, имеющих космологическое значение. Сколько-нибудь подробно останавливаться здесь на достижениях и современной ситуации в области космологии нет возможности, тем более, что картина быстро изменяется, и лишь специалист может это сделать (см. ряд статей в [149]). Ограничусь замечанием о том, что в 1981 г. фридмановская модель была развита таким образом, что на самых ранних этапах эволюции (вблизи сингулярности, имеющейся в классических моделях, в частности, основанных на ОТО) расширение Вселенной происходило несравненно быстрее, чем во фридмановских моделях («раздувание» или инфляция — inflation). Инфляция происходит лишь на временном интервале  $\Delta t \sim 10^{-35}$  вблизи сингулярности (напомню, что планковское время  $t_g \sim 10^{-43}$  с и, таким образом, инфляционная стадия еще может рассматриваться классически, ибо квантовые эффекты сильны, по-видимому, лишь при  $t \sim t_g$ ). После инфляции Вселенная развивается по фридмановской модели (во всяком случае таково наиболее распространенное мнение). Важнейшим параметром этой изотропной и однородной модели является плотность «материи»  $\rho$  или, что удобнее, отношение этой плотности  $\Omega = \rho/\rho_c$ , где  $\rho_c$  — плотность, отвечающая предельной модели (модели Эйнштейна–де Ситтера), в которой пространственная метрика является евклидовой, и расширение происходит неограниченно долго. Для этой модели  $\Omega = \Omega_c = 1$ . При этом

$$\rho_c = 3H^2/(8\pi G), \quad (3)$$

где постоянная Хаббла  $H$  фигурирует в законе Хаббла

$$v = Hr, \quad (4)$$

связывающем скорость космологического расширения  $v$  (удаления от нас) с расстоянием  $r$  до соответствующего объекта, скажем, цефеиды в какой-то галактике. Величина  $H$  изменяется со временем; в нашу эпоху  $H = H_0$ . Измерением  $H$  занимаются все время после установления закона Хаббла в 1929 г. (Хаббл считал, что  $H_0 \approx 500$  км · с<sup>-1</sup> · Мпс<sup>-1</sup>). Сейчас различными способами пришли к значению  $H_0 \approx 55 - 70$  км · с<sup>-1</sup> · Мпс<sup>-1</sup> (так, сравнительно недавно приводилось [74] значение  $H_0 = 64 \pm 13$  км · с<sup>-1</sup> · Мпс<sup>-1</sup>). При  $H_0 = 64$  — критическая плотность

$$\rho_{c0} = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \simeq 8 \cdot 10^{-30} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}. \quad (5)$$

Заметим, что из соображений размерности планковская плотность

$$\rho_{\text{г}} \sim \frac{c^3}{\hbar G^2} \sim \frac{\hbar}{cl_{\text{г}}^4} \approx 5 \cdot 10^{93} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}. \quad (6)$$

Вероятно,  $\rho_{\text{г}}$  — это максимальная плотность вблизи сингулярности, в которой по классической теории  $\rho \rightarrow \infty$ . Таким образом, эволюция Вселенной или, точнее, той ее области, которая нам доступна, изменяется до нашего времени (если сейчас  $\rho \sim \rho_{\text{с0}}$ ) на 123 порядка (разумеется, последней цифре здесь значения придавать нельзя).

Одной из основных, а может быть и главной, задачей в космологии является определение величины  $\Omega = \rho/\rho_{\text{с}}$ . Если  $\Omega > 1$ , то расширение Вселенной прекратится и сменится сжатием (закрытая модель; речь идет о фридмановских моделях). Если  $\Omega < 1$  — модель открытия, т. е. расширение безгранично. Простейшая модель с  $\Omega = 1$ , как уже упоминалось, — открытая с евклидовой пространственной метрикой. Для нахождения  $\Omega$  достаточно знать  $\rho_{\text{с0}}$ , но измерение этой величины или определение  $\Omega$  другими методами весьма сложное дело. Отсылаю к книгам по космологии (к сожалению, современная такая книга на русском языке отсутствует; сейчас могу сослаться лишь на книги [75, 76]; см. также [149–151]). Важный результат, известный уже довольно давно, заключается в том, что в  $\Omega$  (или, что то же, в  $\rho$ ) вносит вклад не только «обычное» барионное вещество (и, конечно, электроны), но еще что-то, не вносящее вклада в наблюдаемое свечение звезд и газа. Это «что-то» называют скрытой или темной массой (dark matter). О ней речь ниже. Но, по-видимому, вклад в  $\Omega$  вносит еще некоторая «вакуумная материя», связанная с  $\Lambda$ -членом.

На этом  $\Lambda$ -члене, обсуждаемом с 1917 г., нужно остановиться. Именно в 1917 г. Эйнштейн, обратившись к космологической проблеме в рамках ОТО, рассмотрел статическую модель [77, 152]. При этом он пришел к заключению, что решение существует только в случае использования уравнений ОТО с  $\Lambda$ -членом, имеющих вид

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

Обозначения здесь обычные и напоминать их не буду (см., например, [48, § 95]). В своих предшествующих работах Эйнштейн  $\Lambda$ -член не вводил (т. е., формально говоря, полагал  $\Lambda = 0$ ). Физический смысл  $\Lambda$ -члена (при  $\Lambda > 0$ ) — это некоторое отталкивание, отсутствующее в ньютоновской теории тяготения. Поскольку без  $\Lambda$ -члена ОТО переходит в слабом поле в ньютоновскую теорию, ясно, что статическое решение без  $\Lambda$ -члена невоз-



можно. Поэтому Эйнштейн и ввел  $\Lambda$ -член, кстати сказать, единственное возможное обобщение ОТО, удовлетворяющее требованиям, положенным в основу вывода уравнений (7). Однако после работы Фридмана (1922 г.) и обнаружения расширения Вселенной (условно в 1929 г.) стало ясно, что статическая модель не имеет отношения к реальности и необходимость в  $\Lambda$ -члене отпала. Более того, Эйнштейн счел введение  $\Lambda$ -члена «неудовлетворительным с теоретической точки зрения» [78] и отбросил его. Паули, в примечании к своей известной книге, изданной на английском языке в 1958 г., «целиком присоединился к точке зрения Эйнштейна» (см. [64, с. 287]). Л. Д. Ландау даже слышать не хотел о  $\Lambda$ -члене, но добиться от него причины такой позиции мне не удалось. Эйнштейна и Паули я, естественно, спросить не мог\*). Как уже было отмечено выше, введение  $\Lambda$ -члена с логической и математической точек зрения вполне допустимо. Почему же великие физики так восставали против этого? По всей вероятности, они понимали, что введение  $\Lambda$ -члена эквивалентно предположению о существовании какой-то «вакуумной материи» с тензором энергии-импульса  $T_{ik}^{(v)} = (c^4\Lambda/8\pi G)g_{ik}$  (см. (7) с тензором-импульсом «обычной» материи  $T_{ik}$ ). Уравнение состояния этой «вакуумной материи», если положить  $g_{00} = 1$ ,  $g_{\alpha\alpha} = -1$ , таково:

$$\varepsilon_v = -p_v = \frac{c^4\Lambda}{8\pi G}, \quad (8)$$

т. е. при положительной плотности энергии  $\varepsilon_v > 0$  давление  $p_v < 0$ , что и отвечает отталкиванию<sup>3</sup>. Сейчас это ясно, но, по видимому, совсем не было понято в достаточно широких кругах физиков и космологов. Во всяком случае я этого не понимал и был сторонником введения  $\Lambda$ -члена лишь из упомянутых формальных соображений. Насколько знаю, впервые о «вакуумной энергии» (8) написал Глинер в 1965 г. [79]. Поскольку ЖЭТФ редактировался тогда Е. М. Лифшицем, ясно, что и он не считал работу [79] очевидной.

$\Lambda$ -член играет решающую роль на инфляционной стадии, тогда он был очень велик<sup>4</sup>. Сейчас  $\Lambda$ -член очень мал или, в принципе, даже может быть равен нулю. Вопрос о  $\Lambda$ -члене и его эволюции во времени широко обсуждался [80] и обсуждается [132, 150–152]. Из сказанного понятно желание некоторых физиков, чтобы  $\Lambda = 0$ . Но,

\*) Я как-то автоматически написал слово «естественно», подразумевая невозможность поговорить с Эйнштейном и Паули. На самом же деле эта невозможность не естественна, а противоестественна. Эйнштейн скончался в 1955 г., а Паули в 1958 г., когда мне было уже около 40. Общаться с ними я и мои тогда советские коллеги не могли в силу существования «железного занавеса». Впервые на научную конференцию за границу (в Польшу) я смог поехать только в 1962 г.

если  $\Lambda$ -член вводится на ранних стадиях и уменьшается с расширением Вселенной (уменьшение происходит в простейшей схеме скачками при фазовых переходах вакуума), то, казалось бы, нет никаких оснований считать его равным нулю в нашу эпоху<sup>4</sup>. Так или иначе, в настоящее время параметр  $\Omega$  записывают в форме

$$\Omega = \Omega_b + \Omega_d + \Omega_\Lambda, \quad (9)$$

где  $\Omega_b$  отвечает вкладу барионов (и, конечно, электронов),  $\Omega_d$  учитывает темную материю (dark matter) и  $\Omega_\Lambda$  — вклад «вакуумной энергии». В силу (3) и (8)

$$\Omega_\Lambda = \frac{\rho_v}{\rho_c} = \frac{c^2 \Lambda}{3H^2}, \quad \Lambda = \frac{3\Omega_\Lambda H^2}{c^2}. \quad (10)$$

При  $\Omega_\Lambda \sim 1$ ,  $H \sim H_0 \sim 2 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$ ,  $\Lambda_0 \sim 10^{-56} \text{ см}^{-2}$ . Согласно наблюдениям, приводятся такие оценки:  $\Omega_b \sim 0,03 \pm 0,015$ , т. е. барионов мало. Для темной материи  $\Omega_d \sim 0,3 \pm 0,1$  и, значит, если  $\Omega = 1$ , то  $\Omega_\Lambda \sim 0,7 \pm 0,1$ . Но, насколько понимаю, это еще совершенно ненадежно [132, 150]. Тем не менее, по-видимому, «вакуумная материя» заметна, это буквально «новый эфир», разумеется, находящийся в полном согласии с теорией относительности. В ближайшие годы можно с уверенностью ожидать новых успехов в области космологии.

Ранняя Вселенная оказалась тесно связанной с физикой элементарных частиц. Речь идет об области очень высоких энергий, о достижении которых иным способом не приходится и говорить. Напомню, что даже на ускорителе ЛНС будет получена (надеюсь, в 2005 г.) в системе центра масс энергия в  $1,4 \cdot 10^4$  ГэВ, в космических лучах зафиксирована энергия до  $3 \cdot 10^{11}$  ГэВ, а планковская энергия  $m_p c^2 \sim 10^{16}$  эрг  $\sim 10^{19}$  ГэВ. В теории Великого объединения фигурируют энергии до  $10^{16}$  ГэВ (частицы с массой  $m_{\text{GUT}} \sim 10^{-8}$  г). Эта область является ареной интенсивных теоретических исследований.

Обращаясь к проблеме 24 (нейтронные звезды и пульсары, сверхновые звезды), замечу прежде всего, что гипотеза о существовании нейтронных звезд, насколько знаю, была высказана в 1934 г. Существенно раньше она появиться вряд ли могла, поскольку нейтрон на эксперименте был обнаружен лишь в 1932 г. Вначале казалось, что нейтронные звезды (характерный радиус 10 км,  $M \sim M_\odot$ ) обнаружить почти невозможно. Но с созданием рентгеновской астрономии (1962 г.) появилась надежда на то, что горячие нейтронные звезды удастся заметить в рентгеновском диапазоне. Сейчас даже одиночные нейтронные звезды, не говоря уже о двойных звездах, действительно изучаются в рентгеновских лучах. Однако еще до этого в 1967–1968 гг. было открыто

радиоизлучение нейтронных звезд — пульсаров. Это (открытие) было довольно драматическим, что было освещено во многих изданиях, не хочется здесь об этом писать (см., например, [81]).

Сейчас известно около 1000 пульсаров с периодом радиоимпульсов  $P$  (это также период вращения звезды) от  $1,56 \cdot 10^{-3}$  с\* до 4,3 с. У миллисекундных пульсаров магнитное поле (на поверхности) порядка  $10^8$ – $10^9$  Э. У большинства пульсаров ( $P \sim 0,1$ – $1$  с) поле  $H \sim 10^{12}$  Э. Кстати, существование в природе столь сильных магнитных полей тоже важное открытие. В последнее время обнаружены нейтронные звезды с еще более сильными полями (magnetar'ы), достигающими по оценкам  $10^{15}$ – $10^{16}$  Э (!). Радиоизлучение эти магнетары не испускают, но наблюдаются в мягких гамма-лучах.

Гамма-вспышка такого магнетара, по-видимому, зафиксирована 27 августа 1998 г. (период всплесков излучения после вспышки 5,16 с; энергетический интервал излучения 25–150 кэВ [82]). Возвращаясь к пульсарам, нужно отметить, что создание теории их излучения оказалось твердым орешком, но в целом она построена [83]. Современный обзор о пульсарах см. в [84].

Нейтронные звезды как радиоизлучающие (пульсары), так и все остальные (одинокые, в двойных системах, магнетары) — интересные и необычные физические объекты. Их плотность лежит в пределах от  $10^{11}$  г · см<sup>-3</sup> на поверхности до  $10^{15}$  г · см<sup>-3</sup> в центре. Между тем, в атомных ядрах  $\rho = \rho_n \simeq 3 \cdot 10^{14}$  г · см<sup>-3</sup> и нет такого разнообразия плотностей. Внешняя кора нейтронной звезды, разумеется, состоит из атомных ядер, а не нейтронов. Процесс нейтронизации с углублением в недра звезды, соответствующее уравнение состояния, возможность пионизации (образования пионного конденсата) и появление кваркового вещества в центральных областях звезды, сверхтекучесть нейтронной жидкости (она составляет основную компоненту звезды), сверхпроводимость протонно-электронной жидкости, присутствующей в звезде в количестве нескольких процентов (от числа нейтронов) — таковы некоторые проблемы физики нейтронных звезд (см. также [128]). В литературе обсуждается также возможность существования звезд типа нейтронных, но состоящих из странных кварков и т. п. Особо нужно выделить вопросы, касающиеся коры: существенны ее «разломы», возникающие в силу уменьшения скорости вращения звезды из-за потерь на ее электромагнитное и корпускулярное излучение; с такими «разломами» связаны «звездотрясения», наблюдаемые по изменению частоты излучения пульсаров. Для физики пульсаров важно, конечно, и строение магнитосферы

---

\* ) Нельзя не поразиться такой звезде с массой, близкой к массе Солнца, и радиусом около 10 км, делающей 640 оборотов в секунду!

звезды. Особо нужно выделить вопрос об остывании звезды и, главное, об ее образовании. По-видимому, основной канал образования нейтронных звезд — вспышки сверхновых. Речь идет о потере устойчивости «обычной» звездой и ее взрыве. Возможный, но не обязательный продукт взрыва — нейтронная звезда. При вспышке сверхновой «варятся» более тяжелые (по сравнению с гелием и некоторыми другими ядрами) элементы, в образующихся в межзвездном газе ударных волнах и в оболочках («остатках») сверхновых ускоряются космические лучи, возникает электромагнитное излучение всех диапазонов. При самой вспышке излучаются также нейтрино. Нам повезло — в 1987 г. сравнительно близко от нас (в Большом Магеллановом Облаке, находящемся на расстоянии около 60 кпс) вспыхнула сверхновая SN 1987A. Повезло потому, что предыдущая сверхновая, наблюдавшаяся невооруженным глазом, вспыхнула в Галактике в 1604 г. (сверхновая Кеплера). Знаменитая Крабовидная туманность образовалась от сверхновой в 1054 г., внутри нее находится пульсар PSR 0531, излучающий даже в гамма-диапазоне. Нейтринное излучение впервые зарегистрировано от сверхновой SN 1987A. Полезно для ориентировки заметить, что кинетическая энергия оболочки этой сверхновой  $E_k \sim 10^{51}$  эрг, а энергвыделение в нейтрино  $E_\nu \sim 3 \cdot 10^{53}$  эрг (напомню, что  $M_\odot c^2 \sim 3 \cdot 10^{54}$  эрг). Сказанное, надеюсь, ясно свидетельствует о том, сколь интересна и содержательна проблема 24. Думаю, что одной двухчасовой лекции или обзора в 1–2 авторских листа достаточно, чтобы осветить этот круг вопросов в объеме, предусматриваемом «физминимумом».

Черные дыры и особенно космические струны — еще значительно более экзотические объекты, чем нейтронные звезды. Космические струны (не следует, конечно, их путать с суперструнами) — это некоторые (не единственные возможные) топологические «дефекты», могущие возникать при фазовых переходах в ранней Вселенной [85, 129]. Они представляют собой нити, могущие быть замкнутыми (кольца) космических масштабов и с характерной толщиной  $l_{CS} \sim l_g(m_{GUT}/m_g) \sim 10^{-29} - 10^{-30}$  см (здесь  $m_{GUT}$  — характерная масса, отвечающая Великому объединению, т.е.  $m_{GUT} \sim 10^{-8}$  г  $\sim 10^{16}$  ГэВ, в то время как  $m_g \sim 10^{-5}$  г  $\sim 10^{19}$  ГэВ). Космические струны еще не наблюдались, даже «кандидаты» на эту роль мне не известны. Поэтому я было включил космические струны в «список» рядом с черными дырами, но поставил знак вопроса. Еще раз можно повторить, что «невозможно объять необъятное», и по здравому размышлению думаю, что включать космические струны в список все же не следует (см., однако, [96, 138]).

Совсем иначе дело обстоит с черными дырами — они являются важнейшими астрономическими и физическими объектами. Не-

смотря на то, что «схватить черную дыру за руку» очень трудно, в их существовании и большой роли в космосе сегодня невозможно сомневаться. Любопытно, что черные дыры в некотором смысле были предсказаны еще в конце XVIII века Митчеллом и Лапласом. Они задались вопросом, возможен ли объект (звезда) со столь сильным полем тяготения, что свет от него уйти на бесконечность не может. В рамках ньютоновской механики и представления о свете, как о корпускулах с некоторой массой  $m$ , закон сохранения энергии при радиальном движении корпускулы со скоростью  $v$  имеет вид  $GMm/r_0 = mv_0^2/2$  (предполагается равенство инертной и тяжелой масс,  $r_0$  — радиус звезды с массой  $M$  или, точнее, расстояние от ее центра, с которого испускается на бесконечность излучение, имеющее скорость  $v_0$ ). Полагая  $v_0 = c$  — скорости света, видим, что если  $r_0 < r_g$ , то свет уйти от звезды не может, причем

$$r_g = \frac{2GM}{c^2} = 3 \frac{M}{M_\odot} \text{ км.} \quad (11)$$

Гравитационный радиус  $r_g$  оказался при таком «расчете» точно совпадающим с вычисляемым в ОТО. Разумеется, совпадение даже численного коэффициента случайно (я, во всяком случае, причины для такого совпадения не вижу). Насколько знаю, в рамках ОТО образование покоящейся (невращающейся) «черной дыры» было впервые рассмотрено только в 1939 г. [86]. В астрофизику черные дыры «вошли» лишь в 60-е годы. Сегодня черные дыры, их изучение — это целая глава ОТО и астрофизики (подробный обзор, занимающий 770 страниц, см. в [87]). Здесь можно сделать лишь несколько замечаний.

Наблюдаются или, если быть очень осторожными, по всей вероятности наблюдаются черные дыры двух типов<sup>5</sup> — со звездными массами  $M \lesssim 100M_\odot$  и гигантские дыры в галактиках и квазарах с  $M \sim (10^6 - 10^9)M_\odot$ . Дыры со звездными массами находят в основном в результате наблюдения двойных систем. Если одна из звезд в такой двойной звезде не видна (не излучает) и в то же время ее масса  $M \gtrsim 3M_\odot$ , то по всей вероятности — это черная дыра. Дело в том, что другая возможность идентифицировать в двойной звезде невидимый компонент — это предположить, что речь идет о нейтронной звезде. Но масса нейтронных звезд не может превосходить примерно  $3M_\odot$ , при большей массе звезда коллапсирует, превращается в черную дыру. Кстати, не нужно думать, что черная дыра, сама по себе ничего не излучающая (т.е. не испускающая излучения из области  $r < r_g$ ), не может быть видимой — она может испускать излучение из области  $r > r_g$ , где находится падающее на нее или вращающееся вокруг нее вещество (аккреционный диск). В Галактике обнаружено уже

довольно много черных дыр, идентифицируемых разными способами, в основном в двойных системах по указанному признаку (масса невидимого компонента  $M > 3M_{\odot}$ ). Гигантские черные дыры находятся в ядрах галактик и квазаров. В центре Галактики имеется потенциальная яма и туда стекает вещество, постепенно теряющее свой момент количества движения. Такое вещество может образовывать звездные скопления. Судьба скоплений сложна, но довольно естественно, что во многих случаях, если не всегда, в конце концов должен происходить коллапс с образованием черной дыры. С другой стороны известно, что в центрах многих галактик видны яркие, иногда даже очень яркие ядра. К числу таких галактик с очень яркими ядрами относятся квазары, впервые обнаруженные (или, точнее, идентифицированные в качестве далеких внегалактических объектов) в 1963 г. на примере квазара 3C273. Мне не хотелось бы здесь вдаваться в историю вопроса. Достаточно сказать, что не у всех галактик и не все время существуют яркие в оптике ядра. Квазарами называют те из них, которые к тому же ярки в радиодиапазоне (QSR или QSS — quasistellar radiosources). В случае же квазизвездных объектов, не являющихся мощными радиоисточниками, говорят о QSO (quasistellar objects). Видимо, имеется некоторая путаница в терминологии, для нас неважная. Яркими ядрами галактик могут быть компактные звездные скопления или черные дыры. Отличить их можно по движению звезд вблизи ядра. Если мы имеем дело с черной дырой, то, очевидно, притягивающая масса сосредоточена в радиусе, меньшем  $r_g$ , и даже при  $M_{bh} \sim 10^9 M_{\odot}$  этот радиус  $r_g \sim 3 \cdot 10^{14}$  см, т. е. по масштабам галактики ничтожен (напомню, что астрономическая единица — расстояние от Земли до Солнца составляет  $1,5 \cdot 10^{13}$  см). Поэтому, если бы было возможно проследить движение звезд вблизи ядра до расстояний, сравнимых с  $r_g$ , то сразу все стало бы ясно. Но подобное невозможно даже в случае нашей Галактики, центр которой находится от Солнца на расстоянии около 8 кпс  $= 2,4 \cdot 10^{22}$  см. Тем не менее в этом случае удалось, используя радиоинтерферометр, убедиться в том, что источник излучения порядка астрономической единицы. Оптические наблюдения поля скоростей звезд вблизи галактического центра показали, что движение происходит вокруг массы с размерами, меньшими световой недели, т. е. с размерами меньшими  $2 \cdot 10^{16}$  см. В результате создается уверенность в том, что в центре Галактики находится именно черная дыра с массой  $M_{bh} \simeq 2,6 \cdot 10^6 M_{\odot}$  (при этом  $r_g \simeq 8 \cdot 10^{11}$  см) [88]. Для других галактик, даже близких, разрешение, конечно, хуже. Тем не менее наиболее вероятно, что и их ядра, когда они видны, являются черными дырами, а не какими-то плотными скоплениями звезд или газа. Исследования в этой области энергично продолжаются.

Помимо упомянутых черных дыр возможно существование реликтовых минидыр, образовавшихся на ранних этапах эволюции Вселенной. Для минидыр существенно, вообще говоря, сделанное в 1974 г. заключение о том, что в силу квантовых эффектов черные дыры должны все же излучать частицы всех сортов (в том числе фотоны) [89] (см. об этом [87]; последняя известная мне работа, имеющая отношение к этому вопросу, [90]). Излучение черных дыр является тепловым (т.е. таким же, как для черного тела) с температурой

$$T_{\text{bh,r}} = \frac{c^3 \hbar}{8\pi G M k_{\text{B}}} = 10^{-7} \frac{M_{\odot}}{M} [\text{K}] = 10^{-7} \frac{2 \cdot 10^{33}}{M (\text{грамм})} [\text{K}], \quad (12)$$

где  $k_{\text{B}} = 1,38 \cdot 10^{-16}$  эрг/К — постоянная Больцмана. Очевидно, даже для черной дыры с массой  $10^{-2} M_{\odot}$  (меньших самосветящихся объектов-звезд не бывает) квантовое излучение ничтожно. Но для минидыр ситуация изменяется, и минидыра с массой, меньшей примерно  $M_{\text{bh}} \sim 10^{15}$  г, не доживет до нашей эпохи (см. [2, § 22]). Излучение таких минидыр, в принципе, можно обнаружить, но никаких указаний на существование подобных объектов еще нет. Нужно иметь в виду, что минидыры могут образовываться, но насколько этот процесс эффективен, не известно. Поэтому возможно, что минидыр во Вселенной нет или их очень мало.

По сути дела, выше была затронута и проблема 26, точнее, вопрос о квазарах и ядрах галактик. Вопрос же об образовании галактик, несколько искусственно объединенный с предыдущим, составляет особую главу космологии. Ее содержание в теоретическом плане состоит в анализе динамики неоднородностей плотности и скорости вещества в расширяющейся Вселенной. На некотором этапе эти неоднородности сильно возрастают и образуются, как говорят, крупномасштабные неоднородности вещества во Вселенной. В конце этого процесса появляются галактики и их скопления. Повторяю, это целая область космологии (см., в частности, [126]). Аналогична в некотором смысле и проблема образования (синтеза) химических элементов в ходе расширения Вселенной. Это тоже интересный и важный вопрос, который вполне мог бы фигурировать в «списке», но он и так разросся, и чем-то приходится жертвовать. Выбор, конечно, отнюдь не однозначен.

Теперь остановлюсь на проблеме 27 — вопросе о темной материи. Он уже кратко обсуждался. По сути дела, это очень крупное и неожиданное открытие, история которого, насколько знаю, восходит к 1940 г. [91]. Количество светящейся материи определяется в результате наблюдений, в основном, в видимом свете. Полное же количество гравитирующей материи сказывается на динамике — движении звезд в галактиках и галактик в скоплениях. Проще и

прозрачнее всего динамика проявляется при определении кривых вращения звезд в спиральных галактиках, в частности, в нашей Галактике. Этот метод, в принципе, элементарен и был пояснен в [2 § 23]. Однако удобно коснуться его вновь, ибо, как я убежден, если что-то можно пояснить уже на школьном уровне, то это только полезно и для специалистов в далеких от астрономии областях физики. Итак, рассмотрим движение звезды с массой  $M$  по круговой орбите вокруг сферически-симметричного скопления масс. Очевидно, должно иметь место равенство

$$\frac{Mv^2}{r} = \frac{GM_0(r)}{r^2}, \quad (13)$$

где  $v$  — скорость звезды,  $r$  — радиус ее орбиты относительно галактического центра и  $M_0(r)$  — масса галактики, сосредоточенная внутри области с радиусом  $r$ ; из (13) сразу же следует третий закон Кеплера:  $\tau^2 = (4\pi^2 r^3)/GM_0$ , где  $\tau$  — период обращения звезды. Пусть, далее, масса  $M_0$  сосредоточена в области с  $r \leq r_0$ , а при  $r > r_0$  масс уже нет. Тогда, очевидно, при  $r > r_0$

$$v^2(r) = \frac{GM_0(r_0)}{r}. \quad (14)$$

Так вот, наблюдения свидетельствуют о том, что зависимость  $v(r)$  — это и есть кривые вращения, существенно отлична от закона  $v(r) = \text{const}/\sqrt{r}$  в области значений  $r > r_0$ , где светящегося вещества уже мало. Коротко говоря, вне всяких сомнений установлено, что во Вселенной имеется несветящаяся материя, проявляющаяся в силу своего гравитационного взаимодействия. Темная материя распределена отнюдь неравномерно, но присутствует везде: и в галактиках, и в межгалактическом пространстве. Так возник один из важнейших и, я бы сказал, острейших вопросов современной астрономии \*) — какова природа темной материи (dark matter), часто именованной ранее также скрытой массой? Проще всего предположить, что речь идет о нейтральном водороде, сильно ионизованном (и поэтому слабо светящемся) газе, планетах, слабо светящихся звездах — коричневых карликах, нейтронных звездах или, наконец, черных дырах. Однако все эти предположения опровергаются наблюдениями разных типов. Например, нейтральный водород фиксируется радиоастрономическим методом, горячий газ — по рентгеновскому излучению, нейтронные звезды и черные дыры тоже заметны, хотя и с трудом. Нелегко наблюдать коричневые карлики (brown dwarfs) — карликовые звезды со столь малыми массами  $M \ll M_\odot$ , что они очень слабо светятся. Однако и такие звезды обнаружены [92] и, по

---

\*) Вклад темной материи в  $\Omega$  в (9) был обозначен через  $\Omega_d$ .



всей вероятности, не вносят существенного вклада в темную материю. Анализ всех этих вопросов непрост, существуют различные мнения насчет вклада тех или иных видов барионного вещества в полную плотность материи. Выше мы указывали на оценку  $\Omega_b \lesssim 0,05$ . В общем, установившееся мнение сегодня таково: темная материя имеет, в основном, небарионную природу. Наиболее естественный кандидат — нейтрино. Однако этот вариант, скорее всего, не проходит: по-видимому, масса электронного нейтрино  $\nu_e$  недостаточно велика (по известным мне данным  $m_{\nu_e} < (3-4) \text{ эВ}$ ), а нужна масса  $m_{\nu} > 10 \text{ эВ}$ . О массах  $\nu_\mu$  и  $\nu_\tau$  речь ниже, но, видимо, и она недостаточно велика (возможная роль  $\nu_\tau$  обсуждается в [93]). Весьма популярна гипотеза, согласно которой роль темной материи играют гипотетические частицы WIMP'ы (Weakly Interacting Massive Particles) — слабо взаимодействующие частицы с массами в гигаэлектронвольты и выше (масса протона  $M_p = 0,938 \text{ ГэВ}$ ). К числу WIMP'ов относятся гипотетические (повторю это) тяжелые нестабильные нейтрино, суперсимметричные частицы — фотино, нейтралино и т. д. Имеются и другие «кандидаты» на роль темной материи (например, псевдоскалярные частицы аксионы) [130]. Нужно также упомянуть космические струны и другие «топологические дефекты». WIMP'ы надеются обнаружить по их излучению (гамма-фотонов и других частиц) при аннигиляции с соответствующими античастицами. Другой путь — наблюдение, пусть и очень редких актов соударения с частицами обычного вещества [94, 131]. Весьма изящна идея о возможности сгущения WIMP'ов в некие рыхлые квазизвезды, которые можно, в принципе, выявить при микролинзировании [95].

Происхождение космических лучей (к. л.), открытых в 1912 г., много лет оставалось загадочным. Но сейчас можно не сомневаться в том, что основными их источниками являются сверхновые звезды. Вообще, в отношении к. л. с  $E_{\text{кр}} < 10^{15} - 10^{16} \text{ эВ}$  остались, конечно, неясные моменты, но в целом картина достаточно ясна [51]. К числу же «особенно важных и интересных», по принятой в этой статье терминологии, можно отнести лишь происхождение к. л. со сверхвысокими энергиями. Так, не до конца ясна природа «излома» («колена») в энергетическом спектре к. л. при  $E_{\text{кр}} \sim 10^{15} - 10^{16} \text{ эВ}$  и, особенно, ситуация в области энергий  $E_{\text{кр}} > 10^{19} \text{ эВ}$  — такие к. л. иногда называют ультравысокоэнергичными (УНЕСР; см. [97]). Наивысшая наблюдавшаяся в к. л. энергия составляет, как уже упоминалось по другому поводу,  $E_{\text{кр}} \sim 3 \cdot 10^{20} \text{ эВ}$ . Ускорить частицы (скажем, протон) до такой энергии нелегко, но, по-видимому, возможно, особенно в активных ядрах галактик. Но при этом возникает такая трудность: частицы с ультравысокими энергиями, соударяясь с микроволновым (реликтовым) излучением (с температурой  $T_r = 2,7 \text{ К}$ ), порождают

пионы и поэтому теряют энергию, а в результате не могут дойти до нас с очень больших расстояний (эффект Грейзена, Зацепина и Кузьмина, 1966 г.). Поэтому в спектре к. л. должно возникать «обрезание» (укручение спектра); в простейшем предположении оно происходит при характерной энергии  $E_{\text{ВВ}} = 3 \cdot 10^{19}$  эВ [97]. В действительности же это обрезание отсутствует [52, 97]. Как же объяснить появление к. л. с  $E_{\text{ср}} > 3 \cdot 10^{19}$  и до  $3 \cdot 10^{20}$  эВ, вот в чем вопрос. Обсуждаются несколько возможностей. Активных галактических ядер на расстояниях 20–50 Мпс, по-видимому, недостаточно. Кроме того, неясно, могут ли известные галактические ядра обеспечить ускорение до энергии  $3 \cdot 10^{20}$  эВ. Частицы могли бы ускоряться космическими струнами и некоторыми другими «топологическими дефектами», находящимися вне Галактики на расстояниях до 20 Мпс [97]. Никаких указаний на наличие таких «дефектов», да еще на сравнительно близких расстояниях, не имеется. Другая гипотеза — первичными УНЕСР частицами являются не «обычные» частицы (протоны, фотоны, ядра и т. д.), а какие-то пока неизвестные, скажем, не претерпевающие сильных потерь. Тогда они могут прийти издалека, а ближе к нам или даже в земной атмосфере превратиться в обычные частицы и дать широкий атмосферный ливень (EAS). Наконец, проще всего, пожалуй, предположить, что в составе темной материи, образующей соответствующее гало, в Галактике имеются сверхмассивные частицы с массой  $M_x > 10^{21}$  эВ, живущие дольше возраста Вселенной  $t_0 \sim 10^{10}$  лет, но все же нестабильные. Продукты их распада и наблюдаются в атмосфере, порождая EAS (для читателей, очень далеких от этой проблематики, быть может, нелишне пояснить, что УНЕСР частицы, да и менее энергичные, скажем, с  $E_{\text{ср}} \gtrsim 10^{15}$  эВ, в к. л. наблюдаются только по EAS). В общем, проблема к. л. с самой высокой энергией, действительно, загадочна и уже поэтому интересна.

Перейдем к проблеме 29 — к гамма-всплескам. В конце 60-х годов в США была запущена система спутников Вела (Vela), оснащенных приборами, могущими регистрировать мягкие гамма-лучи и предназначенных для контроля над соглашением, запрещающим атомные взрывы в атмосфере. Взрывы не производились, но были зафиксированы гамма-всплески неизвестного происхождения. Их типичная энергия (0,1–1) МэВ и длительность — секунды. Проинтегрированный по времени, принимаемый поток энергии во всплесках довольно велик — достигает значений  $\Phi_\gamma \sim 10^{-4}$  эрг · см<sup>-2</sup>. Если находящийся на расстоянии  $R$  источник излучает изотропно, то, очевидно, его полное энергосодержание в гамма-фотонах  $W_\gamma = 4\pi R^2 \Phi_\gamma$ . Об этом открытии было сообщено лишь в 1973 г. [98]. Гамма-всплески с тех пор энер-

гично изучались, но их природа долгое время оставалась неясной. Дело в том, что угловое разрешение гамма-телескопов невелико, да и наблюдения в других диапазонах (радио, оптическом, рентгеновском) в направлении гамма-всплеска производились не сразу. В общем, источник оставался совершенно неизвестным. Одним из вероятных кандидатов считались нейтронные звезды, находящиеся в Галактике. В этом случае для сравнительно близких нейтронных звезд на расстоянии  $R \sim 100$  пс  $\simeq 3 \cdot 10^{20}$  см  $W_\gamma \lesssim 10^{38}$  эрг. Это уже очень много, если вспомнить, что полная светимость Солнца  $L_\odot = 3,83 \cdot 10^{33}$  эрг  $\cdot$  с $^{-1}$ . Однако распределение даже слабых гамма-всплесков по небу оказалось изотропным, в силу чего их источники не могут находиться в галактическом диске. Если же они расположены в гигантском гало Галактики так, что  $R \sim 100$  кпс (это уже не противоречит данным об угловом распределении источников), то  $W_\gamma \lesssim 10^{44}$  эрг. Наконец, в случае космологической природы всплесков и, например,  $R \sim 1000$  Мпс уже  $W_\gamma \lesssim 10^{52}$  эрг. Это значение столь велико, что многие (и я в том числе) отдавали предпочтение модели с гало. Но вот в 1997 г. удалось, наконец, быстро «посмотреть» в направлении гамма-всплеска, и были обнаружены источники с большим красным смещением [99, 100]. Так, для всплеска GRB 971214 (из обозначения ясно, что этот всплеск наблюдался 14 декабря 1997 г.) параметр красного смещения\*)  $z = 3,46$  [101]. Для всплеска GRB 970508 значение  $z \geq 0,8$ . Источники (их уже известно несколько) наблюдались как в рентгене, так и в оптике, а некоторые и в радиодиапазоне. Работа в самом разгаре, и буквально через день после того, как было написано вышеизложенное, 23 января 1999 г. наблюдался мощный всплеск GRB 990123 во всем исследовавшемся гамма-диапазоне от 30 кэВ до 300 МэВ, длившийся около 100 с. Одновременно с гамма-всплеском наблюдалась световая вспышка, светимость которой в максимуме достигала  $L_0 \sim 2 \cdot 10^{16} L_\odot \sim 10^{50}$  эрг  $\cdot$  с $^{-1}$ . Общее энерговыделение во всех электромагнитных диапазонах  $W \sim 3 \cdot 10^{54}$  эрг (красное смещение события  $z = 1,61$ ). Подробнее о гамма-всплесках будет сказано в обзоре [102]<sup>6</sup>. Но уже сейчас можно констатировать, что гамма-всплески — самое мощное взрывное явление, наблюдаемое во Вселенной, не считая, конечно, самого Большого Взрыва (Big Bang). Речь идет об энерговыделении до примерно  $10^{53} - 10^{54}$  эрг, только в гамма-диапазоне. Это существенно больше, чем оптическое излучение при взрывах сверхновых. Поэтому некоторые ис-

\*) На всякий случай напомним, что  $z = (\lambda_{\text{набл}} - \lambda_{\text{ист}}) / \lambda_{\text{ист}}$ , где  $\lambda_{\text{набл}}$  — наблюдаемая длина волны спектральной линии и  $\lambda_{\text{ист}}$  — длина волны в источнике.

точники гамма-всплесков начали называть гиперновыми (hypernovaе). Кандидаты на роль гиперновых: слияние двух нейтронных звезд, какое-то столкновение или слияние массивной звезды с нейтронной и т. п. Впрочем, и такие источники лишь с большой натяжкой могут излучать  $10^{54}$  эрг  $\sim M_{\odot}c^2$ . Так или иначе, трудно сомневаться в том, что открытие космологической природы гамма-всплесков (или, если уж быть очень строгими, обнаружение рентгеновского, оптического и радиоизлучения, связанного с гамма-всплесками) является самым выдающимся достижением астрофизики не только за 1997 г., но и за много последних лет (пожалуй, после открытия пульсаров в 1967–1968 гг.).

Осталось обсудить последнюю, 30-ю проблему «списка» — нейтринную физику и астрономию. Напомню, что гипотеза о существовании нейтрино была высказана Паули в 1930 г. Длительное время считалось, что детектировать нейтрино практически невозможно, ибо сечение реакции



(здесь  $\bar{\nu}_e$  — электронное антинейтрино) ничтожно мало:  $\sigma \sim 10^{-43}$  см<sup>2</sup>. Однако в 1956 г. эта реакция (15) была зафиксирована на атомном реакторе, за что в 1995 г. была присуждена Нобелевская премия по физике (точнее, была присуждена половина премии [103], другая ее часть присуждена за открытие  $\tau$ -лептона [104]). Вопрос о массе нейтрино возникал, вероятно, с самого начала, но было ясно, что масса  $m_{\nu_e}$  очень мала по сравнению с массой электрона. Предположение же, что масса нейтрино (речь вначале шла, конечно, только об электронном нейтрино) равна нулю, ничему не противоречило. После открытия мюонного и тау-нейтрино  $\nu_{\mu}$  и  $\nu_{\tau}$  (точнее, был открыт лишь  $\tau$ -лептон, но никто не сомневался в существовании и  $\nu_{\tau}$ ), то же самое можно было сказать и об этих нейтрино. Однако возникла идея (еще в 60-е годы) о возможности нейтринных осцилляций, т. е. взаимном превращении нейтрино разных типов (ароматов). Такое возможно только, если масса, по крайней мере нейтрино одного из ароматов (flavours), отлична от нуля. Так или иначе, вопрос о массе нейтрино давно возник и остается очень актуальным. Массу  $m_{\nu_e}$  пытаются определить путем исследования области вблизи конца  $\beta$ -спектра трития (реакция  ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e$ ; в силу СРТ-теоремы сейчас не приходится сомневаться в том, что  $m_{\nu} = m_{\bar{\nu}}$ ). Максимальная энергия распада в этом случае мала — близка к 18,6 кэВ. Измерения проводятся; насколько знаю, сейчас считается, что  $m_{\nu_e} < 4$  эВ. Трудность измерений связана с необходимостью проконтролировать энергию, отдаваемую молекулам окружающей среды. Кстати,

некоторые теоретические оценки (см., например, [105]) таковы:

$$m_{\nu_e} \sim 10^{-5} \text{ эВ}, \quad m_{\nu_\mu} \sim 10^{-3} \text{ эВ}, \quad m_{\nu_\tau} \sim 10 \text{ эВ}. \quad (16)$$

Каковы возможные, в принципе, способы непосредственного измерения  $m_{\nu_\mu}$  и  $m_{\nu_\tau}$ , не знаю<sup>7</sup>. Но изучение осцилляций открывают такие возможности. Не лишнее, вероятно, пояснить саму идею осцилляций. Речь идет о предположении о том, что нейтрино тех или иных ароматов, испускаемые при распадах или рождающиеся при слабом взаимодействии, не являются собственными состояниями оператора массы. Поэтому при распространении в пространстве-времени нейтрино какого-то аромата постепенно превращается в нейтрино другого аромата (подробнее см. [105, 106]). Нейтринные осцилляции ищут уже 30 лет, и в 1998 г. достигнут вполне определенный, по-видимому, успех — обнаружено превращение  $\nu_\mu$  в  $\nu_\tau$  [107, 108]. Это крупнейшее открытие в физике элементарных частиц за многие годы. Оно сделано на японо-американской установке Супер Камиоканде (Super Kamiokande), основным элементом которой является «бак» (находящийся на глубине 1 км под землей) с 50000 тоннами предельно очищенной воды. «Бак» окружен 13000 фотоумножителей, регистрирующих черенковское излучение от мюонов, электронов и позитронов, образуемых в воде, попадающими в «бак» нейтрино. В данном случае имеются в виду электронные и мюонные нейтрино, образовавшиеся космическими лучами в атмосфере Земли, причем на противоположной ее стороне. Если нет осцилляций, то, согласно надежным расчетам, в установке («баке») должно наблюдаться вдвое больше электронных нейтрино, чем мюонных. Но на деле количество  $\nu_e$  и  $\nu_\mu$  одинаково (их энергия порядка ГэВ'а). Наиболее вероятное объяснение наблюдений состоит в том, что наблюдаются осцилляции, причем между  $\nu_\mu$  и  $\nu_\tau$ . При этом измеряется величина  $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$ , где  $m_{1,2}$  — массы нейтрино. Согласно [108]  $5 \cdot 10^{-4} < \Delta m^2 < 6 \cdot 10^{-3} (\text{эВ})^2$ . Если предположить, что одна из масс гораздо меньше другой, то более тяжелая масса  $m_\nu \sim 0,05 \text{ эВ}$ . Такое нейтрино (это  $\nu_\mu$  или  $\nu_\tau$ ) для космологии особого интереса не представляет. Как утверждается (см. [107]), если  $m_2$  и  $m_1$  очень близки, то допустимы такие массы, которые могут быть ответственны за темную материю. О значении отличия массы нейтрино от нуля для физики элементарных частиц я судить не берусь.

Солнце и звезды, как известно, излучают за счет происходящих в их недрах ядерных реакций и, следовательно, должны испускать нейтрино. Такие нейтрино, имеющие энергию  $E_\nu \lesssim 10 \text{ МэВ}$ , могут в настоящее время регистрироваться лишь от Солнца. И такие наблюдения ведутся уже лет 30, раньше всего путем использования

реакции  $^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$ . Атомы аргона в емкости (баке) с хлором (точнее, с жидкостью, содержащей хлор) выделяются химическим путем. Наблюдаемый поток составляет единицы SNU, где SNU — солнечная нейтринная единица: при потоке 1 SNU  $10^{36}$  ядер  $^{37}\text{Cl}$  или каких-либо иных ядер захватывают в среднем одно нейтрино в секунду. По расчетам для различных солнечных моделей поток должен составлять (8–4)SNU, последних данных я не знаю. Не стал сейчас уточнять, ибо важно то, что считается установленным такой факт: наблюдаемый поток существенно меньше вычисленного, грубо говоря, раза в два-три. Такой результат, учитывая сложность расчетов для моделей Солнца и т. д., конечно, не впечатляет. Поэтому стремились наблюдать солнечные нейтрино другими методами. Так, на установке Камиоканде (предшественнице Супер Камиоканде) наблюдалось рассеяние нейтрино на электронах  $\nu_e + e^- \rightarrow \nu'_e + (e^-)'$ . При этом фиксировались лишь нейтрино с энергией  $E_\nu > 7,5$  МэВ, испускаемые ядром  $^8\text{B}$ . И опять наблюдаемый поток примерно вдвое меньше вычисленного. Наконец, были созданы две установки: советско-американская (SAGE) и европейская (GALEX), в которых рабочим веществом является галлий  $^{71}\text{Ga}$ , превращающийся при захвате нейтрино в германий  $^{71}\text{Ge}$ . Такой детектор имеет низкий энергетический порог и, в отличие от хлорного, реагирует на основную массу нейтрино, испускаемых Солнцем (это нейтрино от реакции  $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$ ). И опять наблюдаемый поток меньше вычисленного (последние данные с солнечных нейтрино [109]). Совокупность всех имеющихся сведений привела к заключению, что поток нейтрино от Солнца, действительно, существенно меньше вычисленного. Но вычисленного без учета возможных нейтринных осцилляций. Отсюда предположение о существовании таких осцилляций для  $\nu_e$  и об их влиянии на наблюдаемый поток солнечных нейтрино (см. [106]; последнее известное мне обсуждение этого вопроса см. в [110]). Сейчас строятся или уже начали эксплуатироваться несколько совершенных установок для детектирования солнечных нейтрино с различными энергиями. Поэтому я и счел неуместным вдаваться здесь детальнее в уже известные данные, они могут устареть раньше, чем настоящая статья увидит свет. Трудно сомневаться в том, что проблема солнечных нейтрино будет, в основном, решена в ближайшие годы, если и не совсем скоро. Вероятно, прояснится и вопрос о нейтринных осцилляциях и массе нейтрино.

Нейтринная астрономия — это не только солнечная астрономия. Уже упоминался прием нейтрино при вспышке сверхновой SN 1987A. Сейчас ведется мониторинг и если нам повезет, и вблизи Солнца (в Галактике или в Магеллановых Облаках) вспыхнет еще одна сверхновая, то будет получен богатый материал (сверхновые в Галактике вспыхивают в среднем примерно раз в

30 лет, но эта цифра неточна и, главное, вспышка может произойти в любой момент). Особо нужно упомянуть задачу детектирования реликтовых нейтрино с малыми энергиями, быть может, вносящими вклад в темную материю. Наконец, буквально «на выходе» находится нейтринная астрономия высоких энергий  $E_\nu \gtrsim 10^{12}$  эВ. Строится ряд установок для детектирования таких нейтрино [111, 139]. Наиболее вероятные источники: ядра галактик, слияние нейтронных звезд, космические топологические «дефекты». Будут, наконец, производиться одновременные наблюдения во всех электромагнитных диапазонах и на гравитационно-волновых антеннах. В общем, перспективы самые впечатляющие.

Комментарии к «списку», в основном, закончены, и тем больше оснований вернуться к замечанию, сделанному в начале статьи. Прошло только 70 лет с тех пор, как Паули, с несвойственной ему робостью, высказал мысль о существовании нейтрино в письме, адресованном некоему физическому конгрессу (см., например, [103]). А сегодня мы имеем целые области физики и астрономии, посвященные нейтрино. При таких темпах трудно предвидеть даже в грубых чертах, что же будет представлять собой физика лет через сто. Но об этом еще будет речь в разделе 7.

## 6. Еще о трех «великих» проблемах

Весь мой «проект» — составление «списка» и его комментарии в качестве некоторой педагогической или образовательной программы и, в известной мере, руководства к действию не всем по душе. Некоторым не понравятся также манера и стиль изложения. Это естественно. Я могу защищать лишь право иметь и излагать свое мнение, что не мешает уважать иные мнения. Надеюсь, настоящая статья принесет пользу. Вместе с тем, для известной полноты картины хочу упомянуть еще о трех проблемах (или круге вопросов), которые остались за пределами изложенного. В то же время преподавание физики и обсуждение ее состояния и путей развития не может и не должно обойти вниманием эти три направления, три «великие» проблемы. Во-первых, речь идет о возрастании энтропии, необратимости и «стреле времени». Во-вторых, это проблема интерпретации и понимания квантовой механики. И, в-третьих, это вопрос о связи физики с биологией и, конкретно, проблема редукционизма.

Л. Д. Ландау отличался очень большой ясностью понимания физики, во всяком случае того, что уже «устоялось». В известном соответствии с этим он не любил всяких «обоснований» (*Neubegründung*, как он говорил, употребляя это немецкое слово), т. е.

получения известных результатов иным путем, другим методом \*). В этой связи особенно ценны критические замечания Ландау, касающиеся закона возрастания энтропии и его обоснования. В Курсе (см. [29, § 8]) прямо говорится о неясностях, остающихся в этой области: «Вопрос о физических основаниях закона монотонного возрастания энтропии остается, таким образом, открытым» ([29, с. 52]). Открытие в 1964 г. несохранения СР-четности (а следовательно, и несохранения Т-четности, т. е. необратимости времени) явно имеет отношение к делу, но все это еще недостаточно исследовано и осознано. Каково в данный момент состояние проблемы, не знаю и, к сожалению, не могу сообщить даже подходящей ссылки на литературу. Трудно сомневаться в том, что ясности здесь еще нет, и это обстоятельство, во всяком случае, не следует замазывать.

В отношении квантовой механики (имеется в виду нерелятивистская теория) ситуация иная. Большинство физиков, видимо, считают, что так называемая ортодоксальная или копенгагенская интерпретация квантовой механики последовательна и удовлетворительна. Эта точка зрения отражена в Курсе [112]. Ландау часто добавлял примерно следующее: «Все, в общем, ясно, но возможны каверзные вопросы, на которые ответить может только Бор». В 1939 г. Л. И. Мандельштам читал в МГУ лекции об основах квантовой механики. Они были посмертно изданы [113], причем подготовлены к печати Е. Л. Фейнбергом и просмотрены И. Е. Таммом и В. А. Фоком. Л. И. Мандельштам, насколько понимаю, полностью разделял «ортодоксальную» интерпретацию, глубоко проанализировал ее. К сожалению, эти лекции мало известны научной общественности, опубликованы они были с большим трудом и в очень тяжелое время. К тому же в этот период (в 50-е годы) обсуждение интерпретации или, правильнее сказать, основ и понимания квантовой механики как-то приутихло (см., в частности [2, с. 420]). Сейчас эта проблематика снова широко представлена в серьезной литературе. Сошлюсь на монографии [114, 115] и статьи [116–118, 155, 157], где приведено немало ссылок. Частично современный интерес к основам квантовой механики связан с новыми экспериментами, главным образом, оптическими (см. [116, 155]). Все эти эксперименты свидетельствуют о полной справедливости и, можно сказать, торжестве квантовой механики. Вместе с тем, они выявили те черты теории, которые давно и хорошо известны, но кажутся не наглядными. Здесь не место обсуждать всю эту проблематику. Хочу лишь отметить, что обсуждение основ нерелятивистской квантовой механики сохраняет известную акту-

---

\*) Позволю себе заметить, что в этом отношении я с Ландау совершенно не согласен, о чем уже много раз писал (см., например, различные статьи в [2] и в настоящей книге).



альность и не следует им пренебрегать \*). Значительная, если не подавляющая часть критиков квантовой механики не удовлетворены вероятностным характером части ее предсказаний. Они хотели бы, видимо, вернуться и при анализе микроявлений к классическому детерминизму и, наглядно говоря, узнать в конце концов, куда именно попадет каждый электрон в известных дифракционных опытах. Сейчас надеяться на это нет никаких оснований.

Если обратиться к истории, то мы знаем, что создание теории относительности и квантовой механики привело к пониманию области применимости классической (ньютоновской) механики. Но сама эта механика осталась непоколебимой. Связанные с релятивизмом границы применимости нерелятивистской квантовой механики уже известны. Обобщение существующей релятивистской квантовой теории (быть может, на пути, намечаемом в теории струн) вряд ли может что-либо внести в нерелятивистскую квантовую механику и ответить на пресловутый вопрос «куда попадет электрон». Однако, когда речь идет о возможностях будущей теории и ее влиянии на существующую, нельзя дать априорный ответ. Как было сказано, ортодоксальная (копенгагенская) интерпретация представляется последовательной, и очень многие ею удовлетворены. Могу высказать лишь свое интуитивное суждение — нерелятивистская квантовая механика существенных изменений не претерпит («куда попадет электрон» мы не узнаем), но какое-то более глубокое понимание (за пределами ортодоксальной интерпретации) все же не исключено [155].

Только что я воспользовался термином «интуитивное суждение». Понятие, вроде бы, ясное из названия. Фактически же, речь идет о глубоком вопросе, проанализированном Е. Л. Фейнбергом [120]\*\*). Методология и философия науки у нас в России сейчас не в почете. Такова естественная реакция на извращения советского

---

\*) Сказанное особенно ясно, если, например, учесть, что в конце 1998 г. в достаточно серьезном журнале опубликована статья [119], в которой «наиболее глубоким открытием в науке» (видимо, за какой-то период) провозглашаются работы Д. Белла. Фактически Белл был (и остался до своей смерти в 1990 г.) не удовлетворен ортодоксальной интерпретацией квантовой механики и пытался ее заменить теорией со «скрытыми параметрами». Однако, как раз, анализ Белла и последующие эксперименты полностью подтвердили квантовую механику в значительной мере вопреки его устремлениям. Другое дело, что Белл надеялся на то, что будущая теория приведет к лучшему пониманию существующей нерелятивистской квантовой механики. Но это не больше, чем надежда. Усмотреть в работах Белла «глубокое открытие» в науке мне не удалось.

\*\* ) Термин «интуитивное суждение» представляется очень удачным в применении к высказываниям и утверждениям, которые нельзя ни доказать, ни опровергнуть. В таких случаях чаще всего говорят о «вере» (например, «верю в то, что удастся получить...»). Но термин «вера» оказался тесно связанным с вопросом о вере в Бога и религией. Вера в Бога — это интуитивное суждение, но принципиально отличное от интуитивного суждения в науке (см. [120, 121], а также статью 27 в настоящей книге).

периода, когда не существовало свободы мнений и насаждался догматический диамат. Но методология и философия науки остаются, конечно, важнейшими ингредиентами научного мировоззрения. В условиях идеологической свободы внимание к этим вопросам необходимо у нас возродить [156].

Последняя «великая» проблема, которая будет здесь затронута, касается связи физики с биологией. С конца XIX века и примерно до 60-х или 70-х годов XX века физика была, можно сказать, первой наукой, главной, доминирующей. Конечно, всякие ранги в науке условны, и речь идет лишь о том, что достижения физики в указанный период были особенно яркими и, главное, в значительной мере определяли пути и возможности развития всего естествознания. Ведь выяснено было строение атома и атомного ядра, строение материи. Сколь это важно, например, и для биологии, совершенно очевидно. Развитие физики привело в середине нашего века к известной кульминации — овладению ядерной энергией и, к великому сожалению, созданию атомных и водородных бомб. Полупроводники, сверхпроводники, лазеры — все это тоже физика, определяющая лицо современной техники и тем самым, в значительной мере, современной цивилизации. Но дальнейшее развитие фундаментальной физики, основ физики и, конкретно, создание кварковой модели строения вещества, это уже физические проблемы, для биологии и других естественных наук непосредственного значения не имеющие. В то же время биология, используя в основном все более совершенные физические методы, быстро прогрессировала, и после расшифровки в 1953 г. генетического кода начала особенно бурно развиваться. Сегодня именно биология, особенно молекулярная биология, заняла место лидирующей науки. Можно не соглашаться с подобной терминологией и маловажным, по существу, распределением «мест» в науке. Я хочу лишь подчеркнуть факты, не всеми физиками, особенно в России, понимаемые. Для нас физика остается делом жизни, молодой и прекрасной, но для человеческого общества и его развития место физики заняла биология. Хорошей иллюстрацией сказанного служит такая деталь. Журнал *Nature*, о роли и месте которого в науке излишне напоминать, в своем еженедельном номере освещает все науки и, в частности, физику, астрономию и биологию. И одновременно *Nature* сегодня «оброс» целыми семью сателлитами — ежемесячными журналами: *Nature-Genetics*, *Nature-Structural Biology*, *Nature-Medicine*, *Nature-Biotechnology*, *Nature-Neuroscience*, *Nature-Cell Biology*, *Nature-Immunology*. Все они посвящены биологии и медицине. Для физики же и астрономии вполне достаточно основного издания *Nature* и, конечно, многочисленных чисто физических журналов (в биологии такие журналы тоже, разумеется, имеются). О достижениях биологии так много пишут даже

в популярной литературе, что нет нужды здесь о них упоминать. Пишу же я о биологии по двум причинам. Во-первых, современные биологические и медицинские исследования невозможны без самого широкого использования физических методов и аппаратуры. Поэтому биологическая и околобиологическая тематика должна и будет занимать в физических институтах, на физических факультетах и на страницах физических журналов все большее место. Нужно это понимать и активно этому содействовать. Во-вторых, вопрос о редукционизме — это одновременно великая физическая и биологическая проблема, и она, как я убежден, будет одной из центральных в науке XXI века.

Мы полагаем в настоящее время, что знаем, из чего устроено все живое — из электронов, атомов и молекул. Знаем строение атомов и молекул, а также управляющие ими и излучением законы. Поэтому естественна гипотеза о редукции — возможности все живое объяснить на основе физики, уже известной физики. Конкретно, основными являются вопросы о происхождении жизни и появлении сознания (мышления). Образование в условиях, царивших на Земле несколько миллиардов лет назад, сложных органических молекул уже прослежено, понято и смоделировано. Казалось бы, переход от таких молекул и их комплексов к простейшим организмам, к их воспроизводству можно себе представить. Но здесь имеется какой-то скачок, фазовый переход (см. [157]). Проблема не решена, и я склонен думать, будет безоговорочно решена только после создания «жизни в пробирке». Что касается физического объяснения механизма появления сознания и мышления, то я ситуации не знаю, могу сослаться лишь на обсуждения возможности создания «искусственного интеллекта». Разумеется, верующие в Бога «решают» проблемы очень просто: жизнь и сознание «вдохнул» в неживое Бог. Но подобное «объяснение» представляет собой сведение одного неизвестного к другому, и выходит за пределы научного мировоззрения и подхода. Вместе с тем, можно ли считать, что возможность редукции биологии к современной физике несомненна? Здесь ключевым является слово «современная». И с учетом этого слова дать положительный ответ было бы, как мне кажется, неправильно. Пока дело не сделано, нельзя исключать возможность того, что мы даже на фундаментальном уровне еще не знаем чего-то необходимого для редукции. Такую оговорку делаю из осторожности, хотя мое интуитивное суждение таково: на фундаментальном уровне никакой «новой физики» для редукции — понимания всех биологических явлений не нужно. Конечно, спорить на этот счет бесплодно — будущее покажет.

Об этом будущем нельзя не думать с завистью — сколь много важного и интересного мы узнаем даже в ближайшие лет десять! Позволю себе сделать на этот счет несколько замечаний.

## 7. Попытка прогноза на будущее

В связи с прогнозами на будущее чаще всего можно встретить фразу: прогнозы — дело неблагодарное. Имеется, очевидно, в виду тот факт, что жизнь, действительность богаче нашего воображения, и прогнозы часто оказываются ошибочными. Более существенно то обстоятельство, что наиболее интересны непредсказанные, неожиданные открытия. Их, естественно, нельзя прогнозировать, и тем самым ценность прогнозов кажется особенно сомнительной. Тем не менее попытки предвидеть будущее представляются разумными, если не придавать им слишком большого значения. Так я и поступлю, закончив настоящую статью некоторым прогнозом, касающимся только проблем, упомянутых выше (извиняюсь за некоторые повторения).

Решение о начале сооружения гигантского токамака ИТЭР стоимостью в 10, а то и в 20 миллиардов долларов отсрочено на три года. Думаю, что этот проект вообще осуществляться не будет, но исследования в области термоядерного синтеза не прекращены, разрабатываются альтернативные системы и проекты. Сомнений в самой возможности построить действующий (коммерческий) реактор сейчас нет. А будущее этого направления определяется в основном экономическими и экологическими соображениями. Думаю, что в любом случае через пару десятилетий какой-либо экспериментальный реактор (но, конечно, с положительным выходом энергии) будет построен. Будет осуществлен и «лазерный термояд», поскольку такая установка возможна и нужна для военных целей. На ней будут, конечно, проводиться и физические исследования.

Как было упомянуто в разделе 3, проблемой высокотемпературной сверхпроводимости начали заниматься в 1964 г., и я считал ее вполне реальной все время и до получения ВТСП в 1986–1987 гг. Однако речь не шла о подлинном предсказании возможности ВТСП, было лишь выяснено, что никаких известных принципиальных трудностей на пути создания ВТСП не существует. Такова же сегодня ситуация в отношении комнатнотемпературной сверхпроводимости (КТСП). В 1964 г. максимальная известная критическая температура для сверхпроводников равнялась 23 К, сейчас для ВТСП  $T_{c,max} = 164$  К, т.е. температура  $T_c$  возросла в 7 раз. Чтобы добраться до комнатной температуры, достаточно повысить  $T_c$  «всего» в 2 раза. Поэтому, если исходить из «кухонных» соображений, возможность достижения КТСП представляется вероятной. Вместе с тем сомнения, безусловно, остаются. Если механизм ВТСП в купратах, все еще невыясненный, является в основном фоннным или спиновым (или фоннно-спиновым), то повысить  $T_c$  даже в 2 раза очень трудно. Если играет роль экситонный (электронный) механизм, то, на-

против, создание КТСП вполне правдоподобно. Я здесь могу высказать лишь интуитивное суждение. Именно, думаю, что КТСП будет получена в не столь уж отдаленном будущем (может быть, завтра, а быть может, и через десятилетия) (см. также статьи 6 и 7 в настоящем сборнике)<sup>8</sup>.

Помню времена, когда создание металлического водорода казалось «делом техники». Конечно, и сегодня можно так сказать, но достигнутые статические давления около 3 млн атмосфер для получения металлической фазы оказались недостаточными. Как существенно повысить давление, если не будут открыты новые материалы, более прочные, чем алмаз, неизвестно (мне во всяком случае). Динамическое сжатие приводит к нагреву и как его избежать, тоже неясно. Мое интуитивное суждение на будущее таково: имеющиеся трудности удастся преодолеть сравнительно скоро. Вместе с тем надежды (они имелись) получить «кусочек» металлического водорода и использовать его представляются совершенно нереальными.

В отношении всех остальных проблем 4–13 раздела 3 ясно, что будет происходить интенсивное развитие, выяснится много интересного. Но на какие-то яркие четкие ожидания указать не могу, возможно, в силу недостаточной информированности. Разве что сюрприз могут преподнести фуллерен  $C_{36}$  и соединения типа  $K_3C_{36}$ , если в них будет наблюдаться ВТСП. Впрочем, то же можно сказать и о некоторых других фуллеренах, а также нанотрубках. Перспективно исследование и применение нанотрубок. Возможно, по-видимому, получение долгоживущих трансурановых ядер.

К макрофизике нужно отнести и проблему шаровой молнии, которую я не стал включать в «список». В существовании шаровой молнии сомневаться не приходится. Вопрос о ее природе обсуждается с давних времен. Предложено много моделей и гипотез, но пресловутого консенсуса нет. Думаю, что природа шаровой молнии будет четко и однозначно выяснена лишь после создания этих объектов в лаборатории при ясном контроле всех условий и параметров. Кстати сказать, такие попытки неоднократно предпринимались и высказывались претензии на то, что шаровые молнии были рождены. Но, видимо, все такие утверждения не выдержали проверки.

В области микрофизики (физики элементарных частиц) в последние два десятилетия наблюдается явный спад (по числу открытий и т. п.) по сравнению с предшествующим периодом. Вероятно, это в значительной мере связано с отсутствием ускорителя нового поколения. Но в 2005 г. вступит в строй ЛНС, а до этого другие существующие, но реконструируемые ускорители. Поэтому можно ожидать открытия скалярного хиггс-бозона или даже нескольких «хиггсов». Если такая частица не будет обнаружена (как-то трудно в это поверить), то теория окажется перед боль-

шой трудностью. Напротив, если даже на ЛНС не найдут новых частиц и, более конкретно, суперсимметричных партнеров известных частиц, то это может лишь означать, что массы этих частиц больше  $14 \text{ ТэВ} = 1,4 \cdot 10^{13} \text{ эВ}$ . Насколько понимаю, это ни о чем особенном свидетельствовать не будет. Из ожидаемых результатов можно указать на дальнейшее изучение нейтринных осцилляций и определение массы  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  и  $\nu_\tau$  нейтрино. Будут получены также новые результаты, касающиеся несохранения СР-инвариантности, в частности, при более высоких энергиях. Возможно, это важно при анализе проблемы «стрелы времени». Много лет ищут магнитные монополи, надежда их обнаружить практически оставлена. Но кто знает? На новых установках (в особенности на Супер Камиокандэ) продолжатся попытки обнаружить распад протона. При столкновении релятивистских тяжелых ядер можно ожидать прогресса в вопросе о кварк-глюонной плазме и, вообще, кварковой материи.

Несмотря на то, что самый передний фронт физики — физика элементарных частиц перестала быть «царицей наук», исследования в этой области ведутся в весьма больших масштабах и в разнообразных направлениях. Несомненно, будущее принесет нам много нового и в этой области, но пытаться более подробно перечислять проекты, задачи и отдельные вопросы было бы здесь бессмысленно. Что необходимо, однако, выделить, — это «вопрос вопросов»: квантовую гравитацию и ее объединение (суперобъединение) с другими взаимодействиями (сильным и электрослабым). На нечто подобное претендует теория струн (суперструн). Считать, что ей уже около 30 лет представляется преувеличением, но ведь и пресловутая «первая суперструнная революция» произошла уже 15 лет назад (см. раздел 4). Тем не менее ни о какой законченной теории, о «теории всего» (theory of everything), не может быть и речи. Да, быть может, теория суперструн — это вообще не тот путь, по которому будет развиваться будущая теория. Но можно ли считать подобные замечания каким-то упреком, умалением теории струн? Прошу не понимать сказанное в таком смысле. Речь ведь идет о проблеме чрезвычайной глубины и трудности. Что такое 15 или даже 30 лет на таком пути? Мы так привыкли к скорости развития физики, к ее успехам, что теряем, как мне кажется, перспективу. Подобно экономике и народонаселению, не может же очень долго продолжаться экспоненциальный рост, в данном случае рост наших физических знаний. Прогнозировать развитие в области квантовой космологии и вообще новой поистине фундаментальной теории не берусь.

Перейду к тому, что в «списке» было отнесено, причем иногда несколько условно, к астрофизике.

Экспериментальная проверка ОТО в слабых и сильных полях продолжается и будет продолжаться. Самым интересным было бы, конечно, обнаружение хотя бы малейших отклонений от ОТО в не-

квантовой области. Мое интуитивное суждение состоит в том, что в неквантовой области ОТО не нуждается ни в какой коррекции (впрочем, возможна необходимость каких-то изменений в сверх-сильных гравитационных полях, но скорее всего эти изменения все же квантовой природы, т.е. будут исчезать при  $\hbar \rightarrow 0$ ). Подобное допущение отнюдь не представляет собой абсолютизацию ОТО. Речь идет лишь о том, что границы применимости ОТО только квантовые. Логически же возможны и другие ограничения. Для ясности приведу пример ньютоновской (классической) механики. Мы знаем, что эта механика ограничена, так сказать, с двух сторон — релятивистской и квантовой. Логически же мыслимы и другие ограничения, например, в случае очень слабых ускорений (см. [122] и [2, § 23]). Обобщение ОТО, связанное с квантовой теорией, — это великая проблема, о которой речь была выше.

С самого начала XXI века развернется прием гравитационных волн на ряде строящихся сейчас установок, в первую очередь, на LIGO в США. Прежде всего, по-видимому, будут приниматься импульсы, образующиеся при слиянии двух нейтронных звезд. Возможны, и даже очень вероятны, корреляции с гамма-всплесками, а также нейтринным излучением высокой энергии. В общем, родится гравитационно-волновая астрономия (о ее возможностях см. [72]).

С космологией в той или иной мере связана вся внегалактическая астрономия, развивающаяся бурными темпами. Уже введены в строй новые светосильные телескопы. Например, в двух «Кек» (Keck) телескопах (на Гавайских островах) диаметр зеркала равен 10 м (они вступили в строй соответственно в 1992 и 1996 г.), в то время как у знаменитого Паломарского телескопа, начавшего работать в 1950 г., зеркало имеет диаметр в 5 м; российский телескоп в Зеленчук имеет зеркало диаметром в 6 м (начал работать в 1976 г.). Очень эффективен и внеземной телескоп «Хаббл» (Hubble Space Telescope, запущен в 1990 г., диаметр зеркала 2,4 м). Строятся все новые телескопы для различных диапазонов — от рентгеновских до радиоволн. Особо можно упомянуть спутники — гамма-обсерватории и установки для приема космических нейтрино (их, конечно, можно назвать нейтринными телескопами). В результате гигантской по масштабу работы на всех этих телескопах, несомненно, уже в начале XXI века будет, наконец, уточнено значение постоянной Хаббла и определены параметры  $\Omega_b$ ,  $\Omega_d$  и  $\Omega_\Lambda$  (см. выше раздел 5). Тем самым будет, наконец, выбрана космологическая модель, по крайней мере, на стадии после образования реликтового радиоизлучения (т.е. для параметра красного смещения  $z \lesssim 10^3$ ). Будут выяснены: роль  $\Lambda$ -члена и квинтэссенции, вклад темной материи не только в среднем (параметр  $\Omega_d$ ), но и для различных объектов (Галактики, скоплений галактик, сверхскоп-

лений)... Как-то я сбился на перечисление всевозможных астрономических задач и объектов, что не имеет здесь смысла. Конечно, новое будет получено практически для всех задач и вопросов, но особо стоит отметить спорное и неясное, в какой-то мере проблематичное. К числу таких вопросов относится обнаружение черных минидыр и космических струн (они могут быть разных типов), а также некоторых других возможных «топологических дефектов».

Поскольку природа темной материи сейчас совершенно не ясна, решение этой проблемы в настоящее время можно считать особенно важным в астрономии, если не касаться основных вопросов космологии (область вблизи классической сингулярности, т. е. квантовая область; наша Вселенная как часть более разветвленной, вероятно, бесконечной системы). О возможных путях исследования темной материи уже было сказано в разделе 5. На успех здесь можно только надеяться, это подлинно загадочный вопрос. Но не удивлюсь, если он быстро разрешится.

В отношении проблемы 28 — происхождения самых высокоэнергичных космических лучей, как было пояснено в разделе 5, имеется принципиальная неясность. Ситуация аналогична имеющей место в отношении природы темной материи и, быть может, оба вопроса связаны. Пути дальнейших исследований ясны и они проводятся. То же можно сказать в отношении гамма-всплесков и нейтринной астрономии. Кстати сказать, за последние лет пять самое важное в физике и астрофизике — это доказательство космологической природы гамма-всплесков (точнее, значительной их части) и обнаружение нейтринных осцилляций, и тем самым доказательство того, что по крайней мере у одного сорта нейтрино масса отлична от нуля (нужно все же заметить, что установление нейтринных осцилляций нуждается еще в дополнительной проверке). Изучение гамма-всплесков выяснит, вероятно, немало интересного, но трудно ожидать большей сенсации, чем само открытие их космологической природы. Вступили и скоро вступят в строй новые установки для изучения нейтрино. Поэтому можно ожидать в близком будущем решение вопроса о солнечных нейтрино (имеется в виду сопоставление экспериментов и расчетов потоков нейтрино с различными энергиями). Выяснится и роль нейтринных осцилляций. Должны вступить в строй нейтринные «телескопы» для детектирования нейтрино с высокими энергиями. Как уже упоминалось, их совместная (во времени) работа с гравитационными антеннами и гамма-телескопами, безусловно, даст плоды. Что касается приема реликтовых нейтрино, как и реликтовых гравитационных волн, то ситуация мне не ясна (в отношении гравитационных волн см. [140]).

Выделение каких-то проблем среди других, как уже подчеркивалось, довольно условно и связано с какой-то неловкостью — ведь за бортом остается так много другого — важного и интересного!



Как-то особенно остро я это почувствовал, выделив гамма-всплески и не упомянув о развитии других ветвей гамма-астрономии (см., например, [123]).

Подводя известный итог, можно констатировать прекрасные перспективы развития почти во всех обсуждавшихся направлениях. Думаю, что в пределах 20–30 лет мы получим ответы на все упомянутые в тексте вопросы за исключением, быть может, фундаментальных проблем физики элементарных частиц (суперструны и т. д.) и квантовой космологии вблизи классических сингулярностей. В этих двух направлениях я просто не берусь ничего предвидеть.

В заключение — о трех «великих» проблемах, затронутых в разделе 6. Что касается «стрелы времени», не вижу каких-то новых экспериментов, могущих способствовать прогрессу в понимании. Интуитивно думаю, что важно несохранение  $CP$ , а тем самым и  $T$ -инвариантности. Но, что могут прояснить новые эксперименты в этом направлении? В отношении основ нерелятивистской квантовой механики имеющийся вопрос об интерпретации носит в значительной мере гносеологический характер. Проводящиеся новые очень тонкие эксперименты по проверке соотношений неопределенностей, пресловутой телепортации и т. п. ни в коей мере не выходят за пределы известной теории. Интуитивное суждение — предсказать «куда попадет» электрон в дифракционных опытах, мы никогда не сможем. Будущая теория (условно — теория суперструн и ее развитие) может быть новое и внесет, но что именно, не представляю (под подозрением — понятие о времени в квантовой механике). Что касается третьей из «великих проблем» — редукционизма — сознаю свою некомпетентность. Быть может, именно поэтому не был бы удивлен, если бы в XXI веке создали «жизнь в пробирке». Но если это и будет достигнуто, то биохимическими методами, физика здесь явно может играть лишь вспомогательную роль. Так или иначе, каких-либо прогнозов в этой области я делать не могу.

Закончив статью, ясно вижу некоторые ее недостатки. Несомненно, широта охвата материала обернулась поверхностностью изложения и, вероятно, некоторым верхоглядством. За все придется платить. Но слишком ли велика цена — судить читателям. Однако те или иные недостатки не могут дискредитировать саму идею статьи. Тех, кто с ней согласен, призываю к конструктивной критике — сделать лучше то, что мне не удалось.

Наконец, последнее замечание.

На основании всего изложенного ясно, что и в ближайшие годы и тем более в первой половине XXI века можно ожидать очень много нового, важного и интересного. Встречающиеся в литературе довольно пессимистические прогнозы в отношении развития физики и астрофизики в обозримое время представляются плодом

недостаточной информированности, некомпетентности или просто недоразумения. Другое дело, что экспоненциальный закон развития науки в отношении ряда «показателей» (количества научных работников, числа публикаций и т. д.) ограничен во времени, и наступает известное насыщение (несколько подробнее см. [2, § 27] и [120]). Однако это обстоятельство не противоречит, в целом, сказанному, ибо выше речь шла о близком будущем. Думаю, что лет через десять будет вполне уместно написать новую статью с таким же названием, как и настоящая. Интересно будет констатировать, что сбылось, что не сбылось и как нужно изменить мой «список», убрав уже устаревшее и добавив новое. Надеюсь, найдется физик, который это сделает, а «Успехи физических наук» предоставят свои страницы для соответствующей статьи.

В заключение пользуюсь возможностью поблагодарить всех, с кем советовался по тем или иным затронутым вопросам и кто сообщал критические замечания о рукописи (не называю имен, чтобы не возложить на других, хотя бы и косвенно, ответственность за недостатки статьи).

### Список литературы \*)

1. Гинзбург В. Л. УФН **103** 87 (1971).
2. Гинзбург В. Л. О физике и астрофизике.—М.: Бюро Квантум, 1995.
3. Гинзбург В. Л. УФН **169** 419 (1999).
4. Гинзбург В. Л. Разум и вера. Вестник РАН **69** 546 (1999).
5. Физики все еще шутят. Природа № 9 84 (1996).
6. Хвольсон О. Д. Физика наших дней. 4-е изд. — М.; Л.: ГТТИ, 1932.
7. Гинзбург В. Л. УФН **166** 1033 (1996).
8. Ginzburg V. L. Physics Today **43**(5) 9 (1990).
9. Phys. Today **44**(3) 13 (1991).
10. Смолли Р. Е., Керл Р. Ф., Крото Г. Нобелевские лекции по химии 1996. УФН **168** 323 (1998).
11. Гинзбург В. Л. Труды ФИАН **18** 55 (1962).

---

\*) Литература по затронутым в статье проблемам невообразимо велика. Здесь я старался поместить лишь минимум ссылок, позволяющих читателям как-то «защититься» за соответствующую литературу. При этом предпочтение было отдано ссылкам на более доступные журналы (УФН, Physics Today, Physics World и т. д.), причем на самые последние, известные мне публикации, содержащие много ссылок.

12. Todd T.N., Windsor C. G. *Contemp. Phys.* **3** 255 (1998); *Nature (London)* **396** 724 (1998).
13. Морозов А.И., Савельев В.В. *УФН* **168** 1153 (1998).
14. Hoffman A. *Phys. World* **11**(12) 25 (1998).
15. Гинзбург В.Л. *УФН* **167** 429 (1997); **168** 363 (1998).
16. Ruvalds J. *Supercond. Sci. Technol.* **9** 905 (1996).
17. Ford P.J., Saunders G.A. *Contemp. Phys.* **38** 63 (1997).
18. Hemley R.J., Ashcroft N.W. *Phys. Today* **51**(8) 26 (1998); см. также *Nature* **404** 259 (2000).
19. Cote M. et al. *Phys. Rev. Lett.* **81** 697 (1998); Collins P.G. et al. *Phys. Rev. Lett.* **82** 165 (1999).
20. Crawford E., Sime R.L., Walker M. *Phys. Today* **50**(9) 26 (1997).
21. Гинзбург В.Л. *Вестник РАН* **68** 51 (1998) — статья 20 в наст. сборнике.
22. *Phys. Today* **51**(12) 17 (1998).
23. Дорожкин С.И. и др. *УФН* **168** 135 (1998).
24. *УФН* **168**(2) (1998).
25. *Phys. Today* **51**(12) 22 (1998).
26. Altshuler B.L., Maslov D.L. *Phys. Rev. Lett.* **82** 145 (1999).
27. Ли Д.М., Ошеров Д.Д., Ричардсон Р.К. Нобелевские лекции по физике 1996. *УФН* **167** 1307 (1997).
28. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 1. — М.: Наука, 1965. С. 489; Einstein A. *Berl. Ber. (1/2)* S 3 (1925).
29. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Статистическая физика. Ч. 1.* — М.: Физматлит, 1995.
30. London F. *Nature (London)* **141** 643 (1938).
31. Kleppner D. *Phys. Today* **49**(8, Pt. 1) 11 (1996).
32. Чу С., Коэн-Таннунджа К.Н., Филлипс В.Д. Нобелевские лекции по физике 1997. *УФН* **169** 274 (1999).
33. Кадомцев Б.Б., Кадомцев М.Б. *УФН* **167** 649 (1997).
34. Пятаевский Л.П. *УФН* **168** 641 (1998).
35. Kleppner D. *Phys. Today* **50**(8, Pt. 1) 11 (1997).
36. Hutchinson D.A.W. *Phys. Rev. Lett.* **82** 6 (1999).
37. Holyst R. et al. *Phys. Rev. Lett.* **81** 5848 (1998).
38. Auciello O., Scott J.F., Ramesh R. *Phys. Today* **51**(7) 22 (1998); Bune A.V. et al. *Nature (London)* **391** 874 (1998).

39. Chesnokov S.A. et al. Phys. Rev. Lett. **82** 343 (1999); см. также, например, Physics World **13**(6) 29 (2000).
40. Phys. Rev. Lett. **82**(3) (1999).
41. Mourou G.A., Barty C.P.J., Perry M.D. Phys. Today **51**(1) 22 (1998).
42. Kapteyn H., Murnane M. Phys. World **12**(1) 33 (1999).
43. Wilczek F. Nature (London) **395** 220 (1998).
44. Окунь Л.Б. УФН **168** 625 (1998).
45. Mavroumatos N. Phys. World **11**(12) 21 (1998); Phys. Today **52**(2) 19 (1999).
46. Phys. World **12**(1) 5 (1999); Phys. Today **52**(1) 22 (1999).
47. Гайтлер В. Квантовая теория излучения. — М.: ИЛ, 1956.
48. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. — М.: Физматлит, 1988.
49. Sessler A.M. Phys. Today **51**(3) 48 (1998).
50. Critical Problems in Physics /Eds V.L.Fitch, D.R.Marlow, M.A.E.Dementi. — Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press, 1997.
51. Гинзбург В.Л. УФН **166** 169 (1996).
52. O'Halloran T., Sokolsky P., Yoshida S. Phys. Today **51**(1) 31 (1998).
53. Gleiser M. Contemp. Phys. **39** 239 (1998).
54. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 1. — М.: Наука, 1965. С. 682.
55. Wilczek F. Phys. Today **52**(1) 11 (1999).
56. Witten E. Phys. Today **50**(5) 28 (1997).
57. Schwarz J.H. Proc. Natl. Acad. Sci. USA **95** 2750 (1998).
58. Gauntlett J.P. Contemp. Phys. **39** 317 (1998).
59. Kane G. Phys. Today **50**(2) 40 (1997).
60. Гинзбург В.Л., Тамм И.Е. ЖЭТФ **17** 227 (1947).
61. Гинзбург В.Л., Манько В.И. Физика элементарных частиц и атомного ядра **7** 3 (1976).
62. Kaluza Th. Berl. Ber. 966 (1921).
63. Klein O. Nature (London) **118** 516 (1926); Z. Phys. **46** 188 (1927).
64. Паули В. Теория относительности. — М.: Физматлит, 1991 [Пер. с англ. Pauli W. Theory of Relativity. — New York: Pergamon Press, 1958].
65. Кун Т. Структура научных революций. — М.: Прогресс, 1975.

66. Уилл К.М. Теория и эксперимент в гравитационной физике. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
67. Захаров А.Ф. Гравитационные линзы и микролинзы. — М.: Янус-К, 1997; Захаров А.Ф., Сажин М.В. УФН **168** 1041 (1998).
68. Chwolson O. *Astron. Nachrichten* **221** 329 (1924).
69. Einstein A. *Science* **84** 506 (1936); Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 2. — М.: Наука, 1966. С. 436.
70. Stella L., Vietri M. *Phys. Rev. Lett.* **82** 17 (1999).
71. Халс Р.А., Тэйлор Дж.Х. УФН **164** 743 (1994).
72. Брагинский В.Б. УФН **170** 743 (2000).
73. Shi X., Fuller G.M., Halzen F. *Phys. Rev. Lett.* **81** 5722 (1998).
74. Kundic T. et al. *Astrophys. J.* **482** 75 (1997).
75. Новиков И.Д. Эволюция Вселенной. — М.: Наука, 1983.
76. Peebles P.J.E. *Principles of Physical Cosmology*. — Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press, 1993 [Перевод предыдущего издания Пибле П. Физическая космология. — М.: Мир, 1975].
77. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 2. — М.: Наука, 1966. С. 349; Einstein A. *Berl. Ber.* 235 (1931).
78. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 1. — М.: Наука, 1965. С. 601; Einstein A. *Berl. Ber.* (1) 142 (1917).
79. Глинер Э.Б. ЖЭТФ **49** 542 (1965) Gliner E. *Sov. Phys. JETP* **22** 378 (1966)].
80. Вайнберг С. УФН **158** 639 (1989) [Перевод: Weinberg C.S. *Rev. Mod. Phys.* **61** 1 (1989)].
81. Гинзбург В.Л. Пульсары / Новое в жизни, науке, технике. Сер. Физика, астрономия. Вып. 2. — М.: Знание, 1970.
82. Hurley K. et al. *Nature (London)* **397** 41 (1999); см. также *Nature (London)* **398** 27 (1999).
83. Бескин В.С., Гуревич А.В., Истомин Я.Н. УФН **150** 257 (1986); Beskin V.S., Gurevich A.V., Istomin Ya.N. *Physics of the Pulsar Magnetosphere*. — Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1993.
84. Бескин В.С. УФН **169** 1169 (1999).
85. Vilenkin A., Shellard E.P.S. *Cosmic Strings and other Topological Defects*. — Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1994.
86. Oppenheimer J.R., Snyder H. *Phys. Rev.* **56** 455 (1939).

87. Frolov V.P., Novikov I.D. Black Hole Physics. Fundamental Theories of Physics, Vol. 96. — Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1998. Первое издание этой книги было опубликовано и по-русски: Новиков И.Д., Фролов В.П. Физика черных дыр. — М.: Наука, 1986.
88. Phys. Today **51**(3) 21 (1998); Nature **407** 349 (2000).
89. Hawking S. Nature (London) **248** 30 (1974).
90. Bekenstein J.D., Schiffer M. Phys. Rev. D **58** 064014 (1998).
91. Oort J.H. Astrophys. J. **91** 273 (1940); Science **220** 1233, 1339 (1983).
92. Tinney C.G. Nature (London) **397** 37 (1999).
93. Sciamma D.W. Nature (London) **348** 617 (1990); Q.J.R. Astron. Soc. **34** 291 (1993).
94. Pretzl K.P. Europhys. News **24** 167 (1993).
95. Гуревич А.В., Зыбин К.П., Сирота В.А. УФН **167** 913 (1997).
96. Gill A.J. Contemp. Phys. **39** 13 (1998).
97. Berezhinsky V. Nuclear Phys. B (Proc. Suppl.) **70** 419 (1999); Phys. Today **51**(10) 19 (1998).
98. Klebesadel R.W., Strong T.B., Olson R.A. Astrophys. J. Lett. **182** L85 (1973).
99. Phys. Today **50**(6) 17; (7) 17 (1997).
100. McNamara B., Harrison T. Nature (London) **396** 233 (1998).
101. Kulkarni S.R. et al. Nature (London) **393** 35 (1998).
102. Постнов К.А. УФН **169** 545 (1999).
103. Райнес Ф. Нобелевские лекции по физике 1995. УФН **166** 1352 (1996).
104. Перл М.Л. УФН **166** 1340 (1996); Perl M.L. Phys. Today **50**(10) 34 (1997).
105. Perkins D.H., in Critical Problems in Physics / Eds V.L. Fitch, D.R. Marlow, M.A.E. Dementi. — Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press, 1997. P. 201.
106. Wolfenstein L. Contemp. Phys. **37** 175 (1996).
107. Phys. Today **51**(8) 17 (1998).
108. Fukuda Y. et al. Phys. Rev. Lett. **81** 1562 (1998).
109. Fukuda Y. et al. Phys. Rev. Lett. **81** 1158 (1998); **85** 3999 (2000).
110. Baltz A.J., Goldhaber A.S., Goldhaber M. Phys. Rev. Lett. **81** 5730 (1998).
111. Bahcall J.N. et al. Nature (London) **375** 29 (1995).

112. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. — М.: Физматлит, 1989.
113. Мандельштам Л. И. Полное собрание трудов. Т. 5. / Под ред. М. А. Леонтовича. — Л.: Изд-во АН СССР, 1950. С. 347.
114. Кадомцев Б. Б. Динамика и информация. — М.: Редакция журн. УФН, 1997; второе издание — М.: Редакция журн. УФН, 1999.
115. Bub J. *Interpreting the Quantum World*. — Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1997.
116. Клышко Д. Н. УФН **168** 975 (1998).
117. Haroche S. *Phys. Today* **51**(7) 36 (1998).
118. Goldstein S. *Phys. Today* **51**(3) 42; (4) 38 (1998); см. дискуссию на эту тему: *Phys. Today* **52**(2) 11 (1999).
119. Whitaker A. *Phys. World* **11**(12) 29 (1998).
120. Фейнберг Е. Л. Две культуры: интуиция и логика в искусстве и науке. — М.: Наука, 1992; дополненное издание Feinberg E. L. *Zwei Kulturen*. — Berlin: Springer-Verlag, 1998; Вопросы философии (7) 54 (1997).
121. Гинзбург В. Л. Газета «Поиск» № 29–30 (1998).
122. Milgrom M. *Astrophys. J.* **270** 363 (1993); *Ann. Phys. (N.J.)* **229** 384 (1994).
123. Gehrels N., Paul J. *Phys. Today* **51**(2) 26 (1998).
124. *Nature (London)* **397** 289 (1999); *Phys. World* **12**(2) 7 (1999); **12**(3) 19 (1999).
125. Shiozawa M. et al. *Phys. Rev. Lett.* **81** 3319 (1998).
126. Collins C. A. *Contemp. Phys.* **40** 1 (1999).
127. Hijmans T. *Phys. Today* **52**(2) 17 (1999).
128. Bildsten L., Strohmayer T. *Phys. Today* **52**(2) 40 (1999).
129. Williams G. A. *Phys. Rev. Lett.* **82** 1201 (1999).
130. Ellis J. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **95** 53 (1998).
131. Rosenberg L. J. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **95** 59 (1998).
132. Peebles P. *Nature (London)* **398** 25 (1999).
133. *Phys. World* **12**(3) 12 (1999).
134. Смирнов Б. М. УФН **163**(10) 29 (1993); **164** 1165 (1994); **167** 1169 (1997).
135. Rafelski J., Müller *Phys. World* **12**(3) 23 (1999).
136. Sorge H. *Phys. Rev. Lett.* **82** 2048 (1999).
137. Heiselberg H. *Phys. Rev. Lett.* **82** 2052 (1999).

- 
138. Contaldi C. et al. Phys. Rev. Lett. **82** 2034 (1999).
  139. Phys. Today **52**(3) (1999).
  140. Грищук Л. П. и др. УФН **171** 3 (2001).
  141. Максимов Е. Г., Шилов Ю. И. УФН **169** 1223 (1999).
  142. Лафлин Р. Б., Штермер Х., Цуи Д. Нобелевские лекции по физике 1998. УФН **170** 289 (2000).
  143. Scarola V. M. et al. Nature (London) **406** 863 (2000).
  144. Kocharovskaya O. et al. Laser Phys. **9**(1) 1 (1999); см. также Phys. Reports **219** 175 (1992).
  145. Phys. World **13**(10) 37 (2000).
  146. Kalmus P. Contemp. Phys. **41** 129 (2000).
  147. Abel S., March-Russell J. Physics World **13**(11) 39 (2000).
  148. Physics World **13**(6) 3 (2000).
  149. General Relativity and Gravitation **32**(6) (2000).
  150. Caldwell R., Steinhardt P. Physics World **13**(11) 31 (2000).
  151. Armendariz-Picon C., Muchanov V., Steinhardt P. Phys. Rev. Lett. **85** 4438 (2000).
  152. Harvey A., Schucking E. Am. J. Phys. **68** 723 (2000).
  153. Physics World **13**(11) 3 (2000).
  154. Beacom J. F., Boyd R. N., Mezzacappa A. Phys. Rev. Lett. **85** 3568 (2000).
  155. Wilczek F. Physics Today **53**(6) 11 (2000).
  156. Менский М. Б. УФН **170** 631 (2000). См. также: УФН **171**(4) (2001).
  157. Чернавский Д. С. УФН **170** 157 (2000).
  158. Kane G. L. Contemp. Phys. **41** 359 (2000).
  159. Tigler M. Phys. Today **54**(1) 36 (2001).
  160. Nagamatsu J. et al. Nature (London) **410** 63 (2001);  
Budko S. L. et al. Phys. Rev. Lett. **86** 1877 (2001).

## Примечания

1. В 1971 г. была впервые опубликована моя статья под названием «Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными?» [1]. Уже само это заглавие говорит за себя и, действительно, в статье приводится список проблем, которые представляются выделенными по ряду причин. Однако в целом задача



статьи шире — речь идет о некоторой образовательной программе. Подробнее сказанное ясно из публикуемой статьи. По самому смыслу ее содержание должно изменяться со временем. Это и делалось. Так, в [2] имеется вариант, относящийся к 1995 г. и, наконец, в 1999 г. был опубликован вариант [3], который соответствует 1999 г. Затем уже в 2001 г. вышел несколько дополненный английский перевод статей [2] и [3] в моей книге «The Physics of a Lifetime» (Springer-Verlag, 2001). Настоящая статья — это вариант 2001 г., в ее основе лежит текст статьи [3]. Изменения незначительны, что и понятно: после опубликования статьи [3] прошло только 2 года (к моменту подписания настоящего сборника в печать).

2. Здесь я почти что извиняюсь за то, что оставил вопрос о фундаментальной длине в «списке». Таково было настроение еще в 1999 г. Оказалось, однако, что сохранение проблемы фундаментальной длины в «списке» вполне оправдано. Действительно, уже давно обсуждается возможность того, что помимо обычных для нас трех пространственных измерений  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и времени  $t$  в реальном мире существуют и как-то «работают» и другие измерения (см. ниже). Однако до недавнего времени всегда, насколько я знаю, предполагалось, что 5-е и все другие пространственные измерения, как говорят, компактифицируются с характерным размером порядка  $l_g$  (грубо говоря, это значит, что они скручиваются в «трубки» с радиусом порядка  $l_g$ ). Но вот в последние два года стала все шире обсуждаться возможность того, что одно (а в принципе, быть может, и не одно) из «дополнительных» измерений компактифицируется не с радиусом  $l_g$ , а с другим, возможно, и значительно большим радиусом  $l_c$ . Как ясно из сказанного в тексте, этот радиус не должен превосходить  $l_{\text{p}} \sim 10^{-17}$  см и будет играть как раз роль фундаментальной длины  $l_f$  (т.е.  $l_c \sim l_f$ ). Мне пришлось видеть статьи, в которых лишь одно дополнительное измерение по предположению имеет «радиус»  $l_c \gg l_g$ , причем это сказывается на поведении гравитационного поля. Так, наличие длины  $l_c$  может привести к изменению зависимости силы гравитационного притяжения от расстояния между взаимодействующими телами (частицами и т.д.). Речь идет, конкретно, о том, что ньютоновский закон для потенциальной энергии  $\varphi \propto 1/r$  при малых  $r$  станет более крутым (сейчас известно лишь, что закон  $\varphi \propto 1/r$  справедлив при  $r \gtrsim 0,1$  см). Подробнее о сказанном см. [147]. Я убежден, что соответствующее направление исследований будет в центре внимания в обозримом будущем.

3. Это утверждение на первый взгляд не так уж ясно. Дело, однако, в том, что в ОТО «действующая гравитационная масса» единицы объема равна  $(\varepsilon + 3p)/c^2$  (см. [76]), т.е. давление  $p$ , можно сказать, имеет вес. Следовательно, для уравнения состояния (8) при  $\varepsilon_v > 0$  плотность «гравитационной массы» равна  $-2\varepsilon_v/c^2$  и отрицательна. Поэтому при отрицательном давлении  $p$  оно «работает» против обычного гравитационного притяжения (формально в ОТО никаких «гравитационных сил» и «масс» нет; поэтому я, пользуясь классическим языком, и ставлю в соответствующих местах кавычки).

4. Насколько я понимаю, в рамках ОТО (без ее каких-то обобщений)  $\Lambda$  в (7) является постоянной величиной. Поэтому введение переменного

члена «типа  $\Lambda$ -члена» означает дополнительное предположение о существовании какой-то «темной энергии»<sup>\*</sup>). Такая энергия действительно вводится и названа «квинтэссенцией» (quintessence) [150]. Для квинтэссенции давление отрицательно и формально ее можно ввести в ОТО, выбирая соответствующее выражение для  $T_{ik}$  в (7). При этом энергия, связанная с  $\Lambda$ -членом, просто прибавляется к энергии квинтэссенции (впрочем, в этом случае можно просто положить  $\Lambda = 0$  и иметь дело с одной квинтэссенцией). В работе [151] квинтэссенция связывается с существованием некоторого скалярного поля  $\Phi$ . Я понимаю, что такие мои пояснения весьма туманны; думаю, однако, что обсуждаемая проблема еще сама достаточно туманна. Важно, что значение  $\Omega_\Lambda$  в (9), определяющееся вкладом от  $\Lambda$ -члена и квинтэссенции, можно найти из наблюдений. При этом выясняется, что, по-видимому, расширение Вселенной в настоящую эпоху ускоряется, поскольку значение  $\Omega_\Lambda$  достаточно велико. Мы имеем здесь дело с одной из самых «горячих» проблем современной космологии.

5. Недавно была, правда, обнаружена черная дыра с, так сказать, промежуточной массой  $M \sim (10^3 - 10^4) M_\odot$ .

6. Для всплеска GR 000131 параметр  $z = 4,5$ , что отвечает расстоянию примерно в  $11 \cdot 10^9$  световых лет от нас [153]. Нужно подчеркнуть, что излучение источников гамма-всплесков скорее всего неизотропно. При этом, конечно, излучаемая энергия меньше, чем согласно приведенным оценкам.

7. См., однако, [154], где указана некоторая возможность измерить  $m_{\nu_\mu}$  и  $m_{\nu_\tau}$ .

8. Недавно, причем совершенно неожиданно, была открыта сверхпроводимость давно известного металла  $MgB_2$  с  $T_c = 40$  К [160].

---

<sup>\*</sup>) С учетом этого замечания ясно, что в этом месте статьи изложение страдает непоследовательностью. Надеюсь, настоящее примечание пояснит, о чем идет речь.