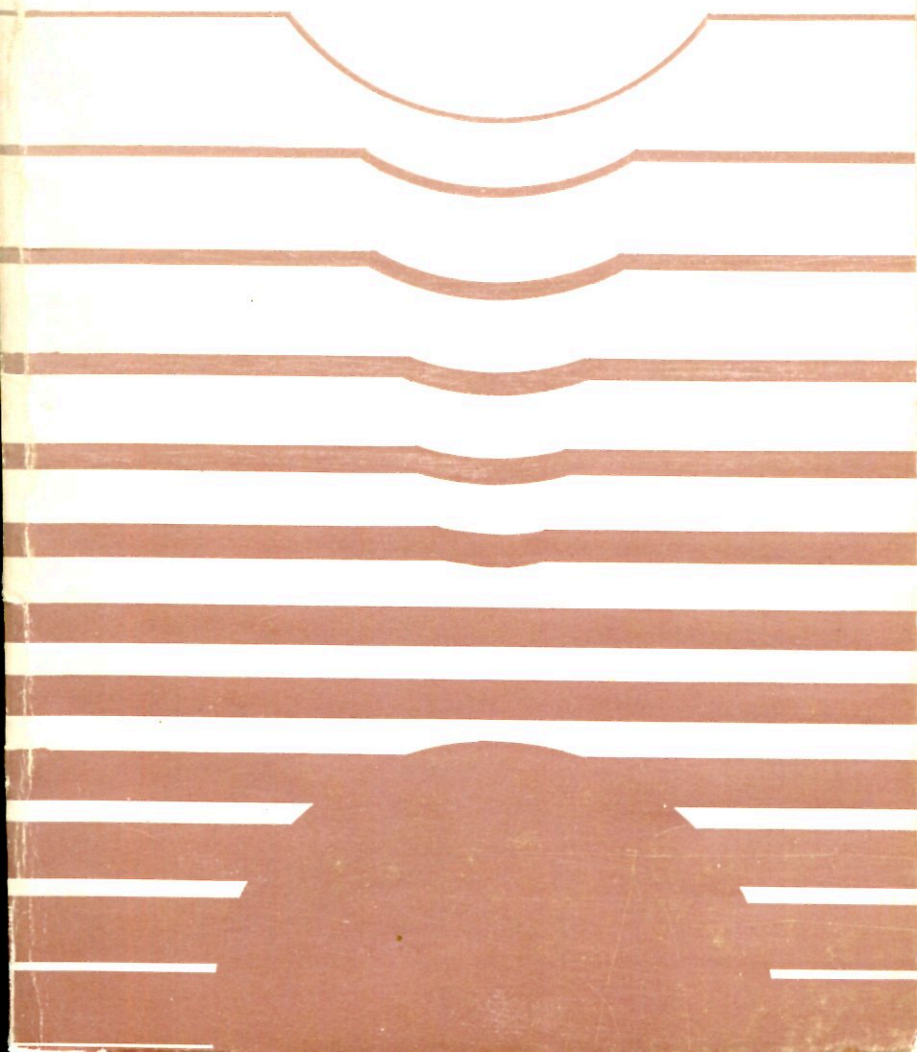


В.Л. Гинзбург

**О физике
и астрофизике**



В.Л. Гинзбург

О физике и астрофизике

Какие проблемы
представляются сейчас
особенно важными
и интересными?

Издание третье,
переработанное



МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1980

Гинзбург В. Л. О физике и астрофизике. Какие проблемы представляются сейчас особенно важными и интересными? Изд. 3-е, перераб. и доп. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980.

Среди множества вопросов, которые исследуются сегодня физиками и астрофизиками, некоторые проблемы в той или иной мере выделены в связи с их фундаментальным характером, особой загадочностью, потенциальными возможностями с точки зрения использования в технике и т. д. В этой небольшой книге сделана попытка составить список таких проблем, которые условно названы особенно важными и интересными, а также кратко пояснить и прокомментировать существо этих проблем, современное состояние соответствующих исследований, их возможную роль для развития физики и астрономии. Как сам список, так и целый ряд замечаний и оценок автора являются спорными и субъективными, что представляется, однако, неизбежным по самой сути дела и по характеру изложения.

Библиография 315 назв.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к третьему изданию	5
Предисловие ко второму изданию	7
ВВЕДЕНИЕ	11
I. МАКРОФИЗИКА	17
§ 1. Управляемый термоядерный синтез	17
§ 2. Высокотемпературная сверхпроводимость	23
§ 3. Новые вещества (проблема создания металлического водорода и некоторых других веществ)	29
§ 4. Металлическая экситонная (электронно-дырочная) жидкость в полупроводниках	32
§ 5. Фазовые переходы второго рода (критические явления). Некоторые примеры	36
§ 6. Поведение вещества в сверхсильных магнитных полях	42
§ 7. Разеры, газеры и сверхмощные лазеры	44
§ 8. Изучение очень больших молекул. Жидкие кристаллы. Некоторые явления на поверхности	48
§ 9. Сверхтяжелые элементы (далекие трансураны). «Экзотические» ядра	51
II. МИКРОФИЗИКА	54
§ 10. Что понимать под микрофизикой?	54
§ 11. Спектр масс. Кварки и глюоны	58
§ 12. Фундаментальная длина (квантованное пространство и т. п.)	66
§ 13. Взаимодействие частиц при высоких и сверхвысоких энергиях	68
§ 14. Нарушение <i>CP</i> -инвариантности. Единая теория слабых и электромагнитных взаимодействий	72
§ 15. Нелинейные явления в вакууме в сверхсильных электромагнитных полях	78
§ 16. О микрофизике вчера, сегодня и завтра	80
III. АСТРОФИЗИКА	90
§ 17. Экспериментальная проверка общей теории относительности	90
§ 18. Гравитационные волны	93

§ 19. Космологическая проблема. О сингулярностях в общей теории относительности и космологии	96
§ 20. Нужна ли «новая физика» в астрономии? Квазары и ядра галактик. Образование галактик	100
§ 21. Нейтронные звезды и пульсары. Физика «черных дыр»	105
§ 22. Происхождение космических лучей и космического гамма- и рентгеновского излучения	120
§ 23. Нейтринная астрономия	129
§ 24. О современном этапе развития астрономии	132
ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ	136
§ 25. Несколько замечаний о характере развития науки	136
§ 26. Вместо заключения	141
ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА ,	147

ПРЕДИСЛОВИЕ К ТРЕТЬЕМУ ИЗДАНИЮ

Настоящее издание отделено от предыдущего примерно пятилетним интервалом. За такой срок глубокие изменения в науке происходят лишь в исключительных случаях. Это имело место, например, между 1925 и 1930 годами, когда была создана и в большой мере развита квантовая механика. Последние пять лет не были в физике и астрономии какими-то исключительными. Вместе с тем, конечно, за это время сделано немало, настоящая же книжка по самому своему характеру и смыслу должна отражать современное состояние затрагиваемых в ней проблем. Уже по этой причине подготовка нового издания представляется естественной. Добавлю, что предыдущее издание, несмотря на довольно значительный тираж (27 000 экз.), давно разошлось. Вообще, независимо от того, насколько книжка оказалась удачной и полезной, о чем автор не вправе судить, интерес к такого рода литературе совершенно несомненен. Об этом свидетельствует, в частности, появление переводов книги на английский, французский, немецкий, словенский и болгарский языки.

Поскольку речь идет о новом издании книги с сохранением ее названия, автор считал себя в известной мере связанным предыдущими изданиями. Поэтому вносились в основном лишь изменения и дополнения, касающиеся существа затрагиваемых физических и астрономических вопросов.

Просматривая с этой целью большое число новых статей, посвященных самым разнообразным проблемам и задачам, я особенно остро почувствовал, сколь трудно даже поверхностным образом охватить мысленным взором значительную часть современной физики и астрофизики. В этой связи хочу лишний раз подчеркнуть, что никогда и не рассматривал эту небольшую книжку как нечто выходящее за пределы сочинения научно-популярного типа. Предъявление в таком случае претензий, быть может

уместных в отношении программных документов или философских трактатов, указывает, во всяком случае, на потерю чувства меры. Видимо, я и сам его потерял, запальчиво отвечая на критику, которую считал необоснованной. Сейчас я по-прежнему считаю, что при всех сделанных оговорках вполне допустимо выделять «особенно важные и интересные» проблемы, можно и нужно спорить о месте и роли тех или иных научных направлений, а автор подобной книги вовсе не обязан думать о возможных взглядах начальства или узких интересах тех или иных своих коллег. С другой стороны, вся эта полемика уже как-то «отзвучала» и, в конце концов, дабы не раздражать критиков, можно было бы сгладить некоторые углы и, скажем, писать о «некоторых важных и интересных» проблемах вместо «особенно важных и интересных». Таким образом, если бы книжка писалась заново, то выглядела бы несколько иначе. Однако я не стал делать соответствующих изменений и сохранил все общие рассуждения и замечания, иногда довольно спорные. Как сказано, это не новая книга, и к тому же автору уже нечего терять, для читателей же некоторая острота или даже запальчивость в дискуссии может сделать книжку более интересной.

В заключение пользуюсь возможностью выразить благодарность всем коллегам, чьими замечаниями я смог воспользоваться при подготовке нового издания.

Июнь 1979 г.

В. Л. Гинзбург

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

За последние десятилетия физика неизмеримо вырослась и разветвилась. Этот процесс нашел отражение, в частности, в появлении таких названий, как астрофизика, биофизика, геофизика, радиофизика, химическая физика, кристаллофизика, металлофизика и т. п. Дифференциация тем не менее не привела (быть может, правильнее сказать еще не привела) к потере физикой известного единства — речь идет о единстве фундамента, общности многих принципов и методов, а также о наличии связей между различными отраслями и направлениями. Разветвление и специализация все более затрудняют, вместе с тем, возможность увидеть здание физики в целом и, несомненно, приводят к известной разобщенности. В какой-то мере такая разобщенность, видимо, неизбежна, но вполне оправдано также стремление как-то нейтрализовать ее последствия. Особенно это необходимо в отношении молодых физиков, в первую очередь студентов. Наблюдения показывают, что даже для лучших выпускников физических (или родственных им) факультетов наших вузов характерны отсутствие широты, незнание того, что же сейчас делается в физике вообще, а не только в какой-то ее более или менее узкой области. Разумеется, широта взглядов или хотя бы разносторонность знаний приходят не сразу и далеко не все можно здесь сделать в студенческие годы. Но буквально поражает какая-то диспропорция, несоответствие. Скажем, человек знает тонкие современные методы квантовой теории поля и квантовой статистики, но не представляет себе механизма сверхпроводимости и природы сегнетоэлектричества, не слышал об экситонах и металлическом водороде, совсем не знаком с современными проблемами, связанными с нейтронными звездами, «черными дырами», гравитационными волнами, космическими и гамма-лучами, нейтринной астрономией и т. д. и т. п. Дело здесь при этом, как я убежден, вовсе

не в ограниченности человеческих возможностей или отсутствии времени. Для того чтобы составить себе общефизическое представление, познакомиться «без формул» (или, во всяком случае, с использованием лишь самых простых формул и количественных понятий) со всеми перечисленными вопросами и им подобными, времени и сил студенту нужно, вероятно, даже меньше, чем на подготовку только к одному серьезному экзамену. Трудность совсем в другом: студент не знает, с чем же ему следовало бы ознакомиться и как это сделать. Недостаточно, чтобы отдельные вопросы фигурировали в одной из многочисленных программ или книг. К тому же многие проблемы, которые как раз сегодня находятся в центре внимания на физических конференциях или в оригинальной физической литературе, вообще еще не успели попасть на страницы учебников и в программы.

Вряд ли нужно развивать эти довольно очевидные замечания. Выводы также представляются достаточно ясными. Если ограничиться только благими пожеланиями или требованием улучшать и часто пересматривать программы, то нужный результат достигнут не будет. Самое разумное, по-видимому, — систематически и по заранее объявленному плану читать дополнительные лекции (8—10 в год), не входящие ни в один официальный курс. Каждую лекцию должен читать специалист в соответствующей области. Темы лекций — это, конечно, не учебный материал, каждая лекция должна представлять собой доступный, но вполне современный обзор какой-то области или проблемы. Именно такой цикл лекций организован кафедрой проблем физики и астрофизики Московского физико-технического института. Этот цикл требует, однако, общего введения, его должен предварять какой-то «взгляд и нечто» — поневоле фрагментарное и беглое перечисление многих проблем, попытка осветить современную физическую проблематику в целом. Такая задача представляется весьма трудной и в известном смысле неблагодарной, поскольку ее решение вряд ли окажется достаточно успешным, а потому и не сможет принести чувства удовлетворения. По тем или иным причинам, но подобных лекций обычно вообще не читают. Мне же такая лекция, как сказано, казалась необходимой для успеха всего цикла, и поэтому пришлось

ее подготовить. Эта лекция была прочитана затем несколько раз в различных аудиториях. И то, как она прошла, реакция слушателей, не оставляет сомнения по крайней мере в том, что подобные лекции нужны и вызывают интерес, причем не только у студентов. На основе этой лекции была также написана статья «Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными?», опубликованная в разделе «Физика наших дней» журнала «Успехи физических наук» (УФН, 1971, т. 103, с. 87), а затем переведенная на несколько языков и с дополнениями напечатанная в виде брошюры издательством Знание (М., 1971). Настоящая небольшая книжка является развитием этой статьи, причем она содержит ряд новых разделов, не говоря уже о других изменениях. Последние вызваны, в частности, появлением новых данных. Подробнее на содержании книжки здесь нет оснований останавливаться: представление о нем можно составить, ознакомившись с введением и оглавлением.

Зачем, однако, столь небольшой книжке предпослано столь длинное предисловие? Причина в том, что ее содержание, характер и стиль, видимо, несколько необычны и, во всяком случае, не говорят сами за себя. Я писал статью, адресованную молодым физикам и астрономам, подчеркивал условность и субъективность выделения каких-то «особенно важных и интересных» вопросов, отмечал неизбежную в таких случаях спорность оценок и вместе с тем полное отсутствие тенденции или претензии поучать читателей, навязывать им свое мнение. К счастью, насколько удалось установить, именно так статью и поняло большинство читателей, особенно тех, кому она предназначалась. Но пришлось услышать и совсем иные мнения. Одни отрицательно отнеслись к самой идее статьи. Другие сочли ее недопустимо односторонней, особенно в отношении микрофизики (я удостоился даже титула «враг ядерной физики»). Третьи обвиняли меня в нескромности и других подобных грехах, выразившихся в попытках судить, что важно и что не важно, а также в слишком частом появлении фамилии автора в списке литературы, приложенном к статье и имевшем лишь сугубо вспомогательное значение. Отвечать на все эти упреки и обвинения было бы здесь

неуместно, тем более что они, к сожалению, нигде не опубликованы. Но упомянуть о них стоит, чтобы предупредить читателей о возможной опасности, которой они, быть может, подвергаются, и тем самым побудить их относиться к книжке критически. Сам автор при подготовке настоящего издания к печати также старался так поступать. Но внимание к критике совсем не означает, что следует убояться «криков беотийцев» и отказаться от дела, которое кажется тебе полезным.

По причинам, ясным уже из сказанного, хотелось бы узнать отношение возможно большего числа читателей к этой книжке. Поэтому я особенно был бы благодарен за письма, содержащие критические замечания, пожелания и общее мнение о книжке. Автор признателен всем, чьи советы удалось использовать при подготовке рукописи к печати.

1973 г.

В. Л. Гинзбург

ВВЕДЕНИЕ

Физики и астрофизики заняты в настоящее время изучением огромного количества различных вопросов. В подавляющем большинстве случаев речь идет о вполне разумных задачах, о попытках если и не разгадать загадки природы, то все же узнать нечто новое. О любых таких вопросах трудно сказать, что они не интересны или не важны. Да и вообще нелегко сколько-нибудь последовательным образом определить, что значит «не важно» и (или) «не интересно» в науке. Вместе с тем фактически иерархия проблем и задач, безусловно, существует. Она действует на практике и отражается на всей научной (а иногда и не только научной) жизни. Нередко выделение «особенно важных» физических проблем происходит в силу их потенциального технического или экономического эффекта, часто это связано с особой загадочностью вопроса или с его фундаментальным характером, но иной раз является данью моде или осуществляется под действием каких-то непонятных или случайных факторов (вопросы, относящиеся к последней категории, мы, разумеется, постараемся не обсуждать).

Составление списков «важнейших проблем» и комментариев к ним уже не раз предпринималось. В таких случаях нередко созываются совещания или создаются специальные комиссии, которые заседают и порождают довольно объемистые документы. Не берусь делать обобщений, но могу констатировать, что не видел, чтобы эти записки о важнейших проблемах читали с большим интересом. Видимо, специалистам в них нет особой нужды, а представителям более широкой «публики» они не кажутся привлекательными (другое дело, что такие документы могут оказаться необходимыми при решении вопросов организации науки и ее финансирования).

Между тем может ли физиков и астрономов, особенно начинающих, не интересовать простой вопрос: где

сейчас «горячо» в физике и астрофизике? Или, другими словами, какие проблемы физики и астрофизики представляются в данный момент особенно важными и интересными? Исходя из предположения, что такие вопросы действительно интересны для достаточно широкого круга читателей, и сделана попытка ответить на них в настоящей небольшой книжке. Таким образом, это не плод работы комиссии и даже не результат каких-либо специальных разысканий, как выражаются литературоведы, а лишь «частное мнение» автора. Поэтому можно, по крайней мере, избежать сухости и строгости более или менее официальных документов.

Ниже перечисляются проблемы, которые мне кажутся сейчас относящимися к категории особенно важных и интересных, но вместе с тем не делается попыток ни точно определить сами понятия «важное» и «интересное», ни мотивировать характер отбора. Каждый вправе иметь собственное мнение на этот счет и ни с кем не обязан его «согласовывать» до тех пор, пока не делается какая-либо попытка объявить свое мнение апробированным или лучшим, чем другие возможные суждения. Никаких таких попыток, не говоря уже о предложениях организационного типа, автор заведомо не предпринимает и, желая подчеркнуть «личный» характер изложения, не стремился даже, как это принято в научной литературе, избегать употребления местоимений «я», «мне» и т. п.

Было бы любопытно, а быть может, и полезно сравнить списки «важнейших проблем физики и астрофизики», составленные разными лицами. К сожалению, соответствующие опросы научного общественного мнения, насколько известно, не производились. Поэтому я могу лишь высказать предположение, что в большинстве таких списков было бы очень много общего, если бы только удалось, а это нелегко, договориться об одном: что называть «физической проблемой» в отличие, скажем, от областей, направлений или объектов физических исследований. Опять же не углубляясь в дефиниции, замечу, что называю проблемой такой вопрос, характер (содержание) ответа на который остается в значительной мере неясным. Речь должна идти не о технических разработках, необходимости провести ряд измерений, вы-

числений и т. п., а о самой возможности создать какое-то вещество с необычными свойствами (например, высокотемпературный сверхпроводник), выяснить вопрос о границах применимости теории (например, общей теории относительности), раскрыть какую-то подлинную тайну (скажем, понять причину или механизм нарушения комбинированной четности при распаде К-мезонов). Исходя именно из таких соображений, ниже почти не упоминаются квантовая электроника (включая большинство применений лазеров), многие задачи исследования полупроводников (включая задачу миниатюризации схем и приборов), нелинейная оптика и голография, а также ряд других интересных направлений современной оптики, задачи вычислительной техники (включая вопрос о создании вычислительных машин нового типа) и многое другое. Большое значение всех упомянутых направлений, обилие различных не только технических, но и физических вопросов, с ними связанных, не вызывают никаких сомнений. Но принципиальной «физической проблемы» или, если угодно, какой-то существенной «неопределенности», касающейся физики дела, здесь в настоящее время не видно. До создания, скажем, первого лазера такая неопределенность существовала, хотя принципы, положенные впоследствии в основу конструкции лазера, и были ясны. Повышение же мощности или изменение других параметров лазера, как и любого другого прибора, дело нужное, трудное и почтенное, но явно качественно отличное от задачи создания устройства или прибора, основанного на новых принципах. Вместе с тем уже на подобном примере видна довольно типичная условность границ между физическими задачами принципиального и технического характера. Так, если речь идет о повышении мощности лазера на много порядков величины, а такая задача, несомненно, очень актуальна и важна, то ее никак нельзя отнести просто к технике или какой-то «непринципиальной» физике. То же можно сказать и о создании разеров и газеров — аналогов лазеров в области рентгеновских и гамма-лучей. Разеры и газеры не только не построены, но и недостаточно ясно, как это сделать и даже можно ли это сделать; поэтому речь здесь идет о типичной «важной и интересной проблеме», если применять используемый нами

же принцип отбора. И так почти в каждой области — существенный, резкий выход за пределы уже достигнутого почти всегда составляет проблему. Но не все такие проблемы созрели, достижение не всех «рекордов» кажется соблазнительным, иерархия проблем все равно на деле существует.

Вместе с тем само собой разумеется, что нельзя заниматься лишь отдельными проблемами, сколь бы значительными они ни были, игнорируя огромное число других задач и проблем, не удостоенных ранга «особенно важных и интересных». Более того, эти «другие» задачи могут оказаться и очень трудными и очень интересными, по крайней мере для тех, кто ими занимается. В качестве примера приведу задачи, относящиеся к теории излучения источников, движущихся в среде (излучение Вавилова — Черенкова, переходное излучение и переходное рассеяние и др.). Мне лично этот круг вопросов очень дорог и близок, я им занимаюсь в течение всей своей научной жизни (см. [1]). Но нельзя же не видеть, что подлинная тайна не покрывает черты таких электродинамических задач и они в этом отношении принципиально отличаются, скажем, от проблемы высокотемпературной сверхпроводимости или вопроса о кварках и их «удержании» в связанном состоянии. Естественно поэтому, что в нашем списке нет переходного излучения, как и целого ряда других вопросов, которые интересовали или интересуют автора книги. Таким образом, если наш выбор «особенно важных и интересных» проблем и является в известной мере условным и субъективным, то это все же никак не означает отбора по принципу: особенно важно и интересно в первую очередь то, чем занимался или занимается автор (думаю, что это замечание не является излишним, ибо довольно часто встречаются люди, руководствующиеся именно указанным принципом).

Выше было высказано предположение, что «научное общественное мнение», если его попытались бы выяснить, отличалось бы большой общностью взглядов на то, какие проблемы сегодня «особенно важны и интересны». Но, несомненно, возникли бы и существенные расхождения, особенно в вопросе об очередности разных задач в плане концентрации усилий и средств. Сказанное видно,

в частности, из статей [2—5]. Вопрос о средствах и очередности связан, однако, с целым рядом обстоятельств, выходящих за пределы чисто научной стороны дела. Например, создание гигантских ускорителей, несомненно, имеет большой научный интерес, и дискуссии ведутся в первую очередь в том плане, нужны ли соответствующие затраты ценой ограничения масштабов работы в других научных направлениях. Этому аспекта мы касаться совсем не будем, сконцентрировав внимание только на самой научной проблематике. Но и при таком «упрощении» и ограничении встречаются резкие расхождения во мнениях. Так, например, в качестве важнейших принципиальных проблем физики твердого тела ниже будут упомянуты высокотемпературная сверхпроводимость, создание металлического водорода и некоторых других веществ с необычными свойствами, металлическая экситонная жидкость в полупроводниках, поверхностные явления и теория критических явлений (в частности, теория фазовых переходов второго рода). Между тем в заметке, носящей название «Самая фундаментальная нерешенная проблема физики твердого тела» [5], такой проблемой считается объяснение эмпирической формулы для теплоты образования некоторых кристаллов из других веществ. Мне, хотя и не без труда, удалось понять, что некоторый интересный вопрос здесь действительно имеется, но увидеть, почему он «самый фундаментальный», я так и не смог и, более того, весьма в этом сомневаюсь. Что же отсюда следует? Видимо, только одно: никакого безусловного списка важнейших проблем предложить нельзя, да и не нужно. А вот думать над тем, что важно и что не важно, спорить на эту тему, не бояться высказывать свое мнение и его отстаивать (но не навязывать!) нужно и полезно. В таком духе и хотелось бы просить читателей относиться к последующему изложению.

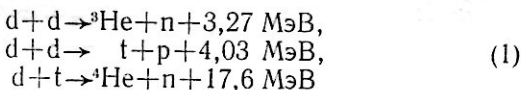
Итак, субъективная окраска и спорность наших замечаний очевидны и читатели об этом предупреждены (другое дело, что никакие предупреждения и оговорки обычно не помогают). До того, как перейти к существу дела, остается отметить, что деление книжки на три части (макрофизика, микрофизика, астрофизика) также в достаточной мере условно. Так, проблема сверхтяжелых

ядер считается макрофизической, хотя ее можно было бы считать и микрофизической. Далее, вопросы общей теории относительности отнесены к астрофизике, а не к макрофизике, но лишь в силу того, что общая теория относительности используется в основном в астрономии (мы уже не говорим о том, что различие между астрофизикой и, скажем, макрофизикой, по сути, носит иной характер, чем разделение физики на микро- и макрофизику). Наконец, подчеркнем, что ниже мы практически не касаемся биофизики, не говоря уже о менее важных, смежных с физикой и астрофизикой направлениях. Между тем именно связь физики с биологией, проникновение в биологию физических методов и идей оказались особенно плодотворными и исключительно важными для развития биологии, а потенциально также медицины, сельского хозяйства и т. д. Тем более грубой ошибкой со стороны физиков было бы отгораживаться от задач с «биологическим уклоном» на том основании, что это «не физика» (см. также справедливые замечания в статье [2]). Кроме того, можно думать, что связь с биологией, попытки решить некоторые биологические проблемы будут оплодотворять саму физику, подобно тому как обращение к физике служило и служит источником вдохновения и новых идей для многих математиков. Тем самым, тот факт, что ниже связь физики с биологией не нашла должного отражения, ни в какой мере не является результатом недооценки роли этого направления — дело здесь, с одной стороны, в недостаточном знакомстве автора с биофизикой и вообще биологией и, с другой, — в необходимости не стремиться объять необъятное и все же как-то ограничить обсуждаемую область естествознания.

I. МАКРОФИЗИКА

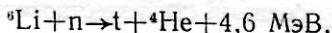
§ 1. Управляемый термоядерный синтез

Проблема управляемого термоядерного синтеза будет считаться решенной, если удастся использовать для нужд энергетики ядерные реакции синтеза. Основные реакции, о которых идет речь, таковы:

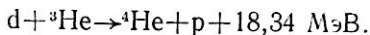


(d и t — ядра дейтерия и трития, p — протон, n — нейтрон).

Важную роль играет также реакция



позволяющая воспроизводить тритий, отсутствующий в природе. Ряд других реакций также может оказаться полезными; среди них укажем лишь на реакцию



В том, что энергию ядерного синтеза каким-то образом удастся использовать, сомневаться трудно — достаточно упомянуть о «тривиальной» возможности применения подземных взрывов. С другой стороны, управляемым термоядерным синтезом активно интересуются уже более 25 лет, однако еще не достигнут «выход» термоядерной энергии, превышающий тепловую энергию плазмы. Правда, сейчас уже создаются установки, на которых в 1982—1985 гг. предполагается осуществить «демонстрацию» прообраза реального термоядерного реактора. Создание же коммерческого термоядерного реактора в некоторых прогнозах относят на конец этого или начало следующего столетия.

Для того чтобы выход термоядерной энергии превышал затраты на нагрев плазмы, должно быть выполнено

условие $n\tau > A$, где n — концентрация электронов в плазме *) при температуре $T \sim 10^8$ К, а τ — характерное время удержания энергии в плазме (можно считать, например, что τ равно времени, в течение которого из плазмы теряется энергия, равная по порядку величины тепловой энергии плазмы). Что касается постоянной A , то она характеризует ядерное горючее (и долю атомов примесей). Для чистого дейтерия $A \sim 10^{16}$ см⁻³·с, а для смеси, состоящей из 50% дейтерия и 50% трития, $A \sim \sim 2 \cdot 10^{14}$ см⁻³·с (величина A может быть уменьшена почти в 10 раз, если нейтроны, образованные при термоядерном синтезе, использовать для деления урана). Таким образом, для работы реактора (для того, чтобы он давал больше энергии, чем необходимо затратить на создание и поддержание высокой температуры плазмы) должно соблюдаться неравенство

$$n\tau > 10^{14} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}, \quad (2)$$

причем имеется в виду «чистый» реактор, в котором не используются делящиеся элементы (уран и др.). Физический смысл требования (2), известного как неравенство Лоусена, достаточно очевиден: чем дольше длится процесс, тем менее бурно может протекать реакция горения (ее скорость пропорциональна n^2).

Самым простым по идее мог бы быть плазменный реактор с магнитным удержанием плазмы. Конкретно, из реакторов такого типа в настоящее время представляются наиболее прогрессивными (или во всяком случае наиболее популярными) тороидальные магнитные ловушки — токамаки. В настоящее время (1979 г.) рекордное достигнутое значение $n\tau = 3 \cdot 10^{13}$ см⁻³·с получено на относительно небольшом токамаке Массачусетского технологического института, но с сильным магнитным полем, до 90 кЭ. Температура плазмы составляла около 10^7 К, а концентрация плазмы в центре достигала

*) При высоких температурах, которые нужны для работы реактора ($T \geq 10^8$ К), плазма, конечно, полностью ионизована и концентрация электронов примерно равна концентрации ионов дейтерия и трития. Мы говорим о примерном равенстве, так как в плазме неизбежно присутствует некоторая доля атомов примесей: углерода, кислорода и т. д. Обзоры, посвященные термоядерному синтезу, см., например, в [6].

10^{15} см⁻³. В самом большом токамаке Т-10 (он находится в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова) энергетическое время жизни равно примерно 0,06 с, ионная температура порядка $1,2 \cdot 10^7$ К. Аналогичные результаты получены и на самом большом американском токамаке ПЛТ (в середине 1978 г. на нем была получена температура, равная $6 \cdot 10^7$ К). В 1977 г. начато сооружение токамака ФТРТ (испытательного термоядерного реактора-токамака) в США. Эта установка позволит работать со смесью дейтерия с тритием. В ближайшее время начнется сооружение Объединенного европейского токамака в Англии, токамака ДТ-60 в Японии и Т-10 М в СССР. Объем плазмы в таких токамаках превышает 100 м³. На этих установках в 1982—1985 гг. будет, вероятно, достигнуто значение $nt \sim 10^{14}$ см⁻³·с. Стоимость установки ФТРТ значительно превышает 200 млн. долларов. Следующий шаг — создание энергетического реактора с выработкой тепловой энергии и циркуляцией трития. Стоимость этого этапа очень велика. Поэтому в настоящее время рассматривается возможность создания международного энергетического реактора-токамака.

Магнитное поле термоядерного реактора должно создаваться сверхпроводящими катушками. В противном случае нет оснований ожидать достижения благоприятного энергетического баланса. В настоящее время собран сверхпроводящий токамак Т-7; кроме того, в токамаке Т-15М катушки будут также сверхпроводящими. Однако многие физические и технические проблемы, связанные с работой реактора, до сих пор еще не решены. К ним относится проблема стойкости первой стенки реактора, подверженной мощному потоку нейтронов. Не решена и проблема нагрева плазмы. Дело в том, что для нагрева плазмы одного омического нагрева недостаточно. Сейчас проходят проверку методы нагрева потоками «нейтралей» (атомов дейтерия с энергией 20—100 кэВ) или СВЧ-волнами. Не все ясно и с поведением в токамаке атомов примесей, а также неясны причины, приводящие к высокому значению электронной теплопроводности.

Большие успехи достигнуты на «прямых» магнитных ловушках, в которых используются магнитные «пробки».

На них получена плазма с термоядерными параметрами $T \sim 10^8$ К, $n \sim 10^{14}$ см $^{-3}$. Однако достигнутое время жизни τ в прямых системах мало — оно порядка 0,001 с, в силу чего мало и значение $n\tau \sim 10^{11}$ см $^{-3}$ ·с. Это связано с тем, что обычно в прямой ловушке уже одно соударение иона с другим выводит ион из системы. Быть может, удержание плазмы в прямых ловушках удастся тем не менее улучшить путем создания более совершенных «пробок» на концах ловушек.

Отмеченные трудности, которые могут оказаться еще большими при переходе к реальным системам, вполне оправдывают обсуждение других подходов к решению задачи. Поэтому, помимо токамаков и прямых ловушек, предложены и другие методы и системы: стеллараторы, высокочастотный разряд в плазме, сжимающиеся оболочки, создающие магнитное поле порядка миллиона эрстед, и др.

В последние годы привлекают к себе большое внимание исследования возможности осуществления термоядерного синтеза с инерционным удержанием плазмы. По сути дела, в этом методе предполагается использовать микровзрыв, сопровождающийся выделением энергии до 10^8 Дж (например, при полном сгорании дейтериево-тритиевой частицы с размерами около миллиметра выделяется энергия порядка $3 \cdot 10^8$ Дж, что отвечает взрыву примерно 50 кг тринитротолуола). Разрушающее действие такого взрыва относительно мало из-за малости массы взрывающегося вещества и, следовательно, малости импульса. Поскольку время потери энергии τ при взрыве порядка 10^{-8} — 10^{-9} с, мощность нагрева должна быть порядка 10^{14} Вт (см. ниже). Такой мощный нагрев можно осуществить либо лазерным пучком, либо пучком электронов, либо пучком тяжелых ионов. В соответствии с этим говорят о лазерном, электронном и пучковом термоядерном синтезе. Конечно, механизмы поглощения в мишени (в термоядерном горючем) лазерного излучения, электронов или ионов различны. Но, если отвлечься от этого, легко заметить сходство упомянутых методов. В самом деле, в лазерном методе, как и при использовании для нагрева электронных или ионных пучков, речь идет о нагреве (по возможности, со всех сторон) твердых сферических крупинки водорода

(точнее, дейтерия или смеси дейтерия с тритием) с начальной концентрацией ядер $n \sim 5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ (именно такова концентрация ядер в твердом водороде при атмосферном давлении). Ядерное горючее покрывают рядом оболочек, носящих названия толкателей, тромбовок, тромбовок-толкателей и абляторов. Верхняя оболочка (аблятор), испаряясь, создает давление на горючее порядка 10^{12} атм, которое сжимает ядерное вещество в 1000 и более раз. Строение оболочек и мишеней-крупнок выбирают, естественно, таким образом, чтобы наиболее эффективно сжать ядерное горючее. Особенно важно, чтобы образующиеся в термоядерном горючем α -частицы застревали в мишени и поддерживали горение. Здесь надо учитывать, что при увеличении плотности пропорционально ей уменьшается длина свободного пробега, тогда как радиус крупинки изменяется значительно меньше (пропорционально $n^{1/3}$). Главный вопрос при реализации инерционного синтеза состоит в получении большого значения величины Q , равной отношению выделившейся термоядерной энергии к подведенной к крупинке энергии света, электронных или ионных пучков. По расчетам величина Q может достигать 60—70; в таких условиях для получения положительного выхода энергии к. п. д. лазеров должен достигать 10—20%, тогда как в современных лазерах с короткими наносекундными импульсами к. п. д. составляет менее 1%. Другим важным требованием является стойкость лазерных материалов. Подсчитали, что стекло лазеров должно выдерживать до разрушения 10^8 импульсов, между тем как в настоящее время стойкость материалов в 10^4 раз меньше. Конечно, можно пытаться заставить крупинку гореть дольше не за счет лазерного нагрева, а за счет самоподдерживающейся реакции (т. е. за счет нагрева α -частицами). По-видимому, в этом случае можно достичь значений Q , равных нескольким сотням, и уменьшить требуемый к. п. д. лазеров. Однако и на этом пути стоит ряд трудностей, связанных с развитием неустойчивости оболочек, генерацией быстрых электронов и т. п. Тем не менее предполагается, что в 1982—1985 гг. удастся осуществить демонстрационный эксперимент (демонстрационным экспериментом называют термоядерную реакцию с $Q=1$, в которой тепловой выход термоядерной

энергии равен энергии, затраченной на нагрев). В 1977 г. начала работать крупнейшая лазерная термоядерная установка «Шива» (Ливермор, США). В «Шиве» 20 пучков доставляют на мишень около 10 кДж лазерной (световой) энергии. В 1978 г. на ней произведен первый эксперимент.

Создаются лазерные термоядерные экспериментальные установки и в СССР в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР («Дельфин», УМИ-35) и в других странах. Для электронного термоядерного синтеза сооружаются установка «Ангара-5» в ИАЭ им. И. В. Курчатова и установка ЕБФР в лаборатории Сандиа (США). Начались разработки проектов установок для пучкового (ионного) термоядерного синтеза. Затраты на термоядерный синтез в США достигли 500 млн. долларов в год (в 1979 г.).

Как для создания термоядерных реакторов с магнитным удержанием плазмы, так и для реализации «лазерного термояда» или других установок взрывного типа нужно еще преодолеть огромные трудности. Тем не менее в настоящее время, в отличие от сравнительно недавнего прошлого, царит, в общем, оптимистическое настроение и принципиальная возможность создать какой-нибудь термоядерный реактор представляется вполне реальной. Но какой тип или какие типы реакторов удастся осуществить, когда это произойдет и какие еще трудности нужно будет преодолеть, остается недостаточно ясным. К тому же речь здесь идет о столь значительных трудностях, что их нельзя считать техническими. Поэтому, несомненно, создание управляемых термоядерных реакторов должно быть отнесено к числу важнейших физических проблем. В равной мере соревнование и конкуренция (мы имеем в виду здоровую конкуренцию, а не создание взаимных помех!) различных методов при решении проблемы термоядерного синтеза представляются совершенно необходимыми.

На примере проблемы управляемого термоядерного синтеза четко выявляется, кроме того, одно общее обстоятельство: почти всякая крупная физическая проблема не изолирована, а тесно связана с целыми направлениями или областями физики. Поэтому особенно большие усилия, затрачиваемые на решение данной пробле-

мы, оказываются плодотворными и в более широком плане — они стимулируют многочисленные исследования, порождают новые методы, подходы и т. п. Так, плазмой немало занимались и интересовались и до того, как в самом начале пятидесятых годов начала разрабатываться проблема управляемого термоядерного синтеза. Но, с другой стороны, трудно переоценить, сколь важным оказалось внимание к этой проблеме для развития физики плазмы и в других направлениях — в применении к газовой плазме, твердотельной плазме и плазме, существующей в космосе.

§ 2. Высокотемпературная сверхпроводимость

Сверхпроводимость была открыта в 1911 г. и долгие годы оставалась не только необъясненным явлением (пожалуй, самым загадочным в области макрофизики), но и не находила почти никакого практического применения. Последнее объясняется в первую очередь тем, что сверхпроводимость вплоть до настоящего времени наблюдается только при низких температурах. Так, у первого по времени обнаружения сверхпроводника — ртути критическая температура $T_c = 4,15$ К. Одно из наивысших известных значений $T_c \approx 21$ К имеет некоторый сплав Nb, Al и Ge, изученный лишь в самые последние годы, а в 1973 г. установлено, что для Nb_3Ge температура $T_c = 23,2$ К (более известно соединение Nb_3Sn с $T_c = 18,1$ К, сверхпроводимость которого была обнаружена в 1954 г.). При температурах, близких к T_c (но, конечно, меньших ее, так как по определению при $T > T_c$ металл перестает быть сверхпроводящим), использовать сверхпроводник особенно трудно. Достаточно сказать, что в этой области критическое магнитное поле H_c и критический ток I_c (т. е. поле и ток, разрушающие сверхпроводимость) весьма малы (при $T \rightarrow T_c$ значения H_c и I_c стремятся к нулю). В силу сказанного, до сих пор сверхпроводники можно использовать, лишь применяя в качестве охладителя гелий (точка кипения при атмосферном давлении $T_b = 4,2$ К), поскольку жидкий водород (точка кипения $T_b = 20,3$ К) при $T_m = 14$ К уже затвердевает (твердое же вещество использовать в качестве охладителя, вообще говоря, и нелегко, и неудобно).

Еще 25—30 лет назад и гелия мало добывали (его дефицит, впрочем, ощущается и сейчас), и техника ожижения была несовершенной. В результате во всем мире имелось лишь небольшое число маломощных гелиевых ожижителей. Применение сверхпроводников для создания сверхпроводящих магнитов (а это до сих пор важнейший прибор, в котором используются сверхпроводники) в не меньшей степени лимитировалось также низкими значениями H_c и I_c для известных ранее материалов (для Hg поле $H_c \approx 400$ Э даже при $T \rightarrow 0$).

В самом начале прошлого десятилетия положение, однако, радикально изменилось. Получить жидкий гелий теперь не проблема. Там, где это дело налажено, ожижителей в лабораториях и институтах вообще не устанавливают, а по телефону заказывают у специальной фирмы или на заводе нужное количество жидкого гелия (его транспортируют в больших дьюарах). Преодолен и «магнитно-токовый барьер» — получены сверхпроводящие материалы, из которых можно делать магниты с полем H_c , достигающим сотен килоэрстед (у упомянутого сплава ниобия, алюминия и германия с $T_c \approx 21$ К сверхпроводимость исчезает лишь в поле $H_c \approx 400$ кЭ; рекордное зафиксированное значение H_c достигает 600—700 кЭ). У используемых на практике материалов пока, правда, критические поля и токи не столь велики, чтобы построить магнит на 300—400 кЭ. Но это, видимо, лишь дело технологии, техники. По-видимому, нет никаких обстоятельств принципиального характера, мешающих созданию при гелиевых температурах магнитов, скажем, на 300 кЭ*). Напротив, принципиальный и неясный момент — крайне соблазнительная возможность создания высокотемпературных сверхпроводников, т. е. металлов, остающихся сверхпроводящими при температурах жидкого азота (для азота температура кипения $T_b = 77,4$ К), а еще лучше и при комнатной температуре.

*) Получение сверхпроводников с высокими значениями H_c и I_c стало возможным, в основном, вследствие большой экспериментальной и технологической работы. Теория здесь — особенно если говорить о больших критических токах — не играла определяющей роли. Ряд других достижений был, напротив, инициирован теоретическими соображениями. К успеху, таким образом, ведут в разных случаях совершенно различные пути.

Автор уже подробно останавливался на современном состоянии проблемы высокотемпературной сверхпроводимости в статьях [7] и гл. 1 сборника [8]. Тем больше оснований ограничиться здесь лишь несколькими замечаниями.

Сверхпроводимость возникает, если электроны в металле вблизи поверхности Ферми притягиваются друг к другу, в силу чего они образуют пары, которые претерпевают нечто, подобное бозе-эйнштейновской конденсации. Критическая температура для сверхпроводящего перехода T_c пропорциональна энергии связи электронов в паре и, грубо говоря, определяется двумя факторами: силой притяжения (связи), которую можно характеризовать неким параметром g , и шириной $k\theta$ той области энергий вблизи поверхности Ферми, где еще имеет место притяжение между электронами. При этом

$$T_c \sim \theta \exp(-1/g). \quad (3)$$

Для большинства известных сверхпроводников $g \ll 1/3 - 1/4$ (формула (3) непосредственно пригодна как раз при $g \ll 1$). Температура θ в (3) зависит от механизма, приводящего к притяжению между электронами. В известных сверхпроводниках этот механизм, видимо, определяется взаимодействием электронов с решеткой. В этом случае $\theta \sim \theta_D$, где θ_D — дебаевская температура, физический смысл которой ясен из того, что $k\theta_D$ — энергия самых коротковолновых фононов в теле ($k=1,38 \times 10^{-16}$ эрг/К — постоянная Больцмана). Длина волны таких фононов $\lambda \approx a \approx 3 \cdot 10^{-8}$ см (a — постоянная решетки) и $k\theta_D \sim \hbar \omega_D$ ($\omega_D \sim u/a \sim 10^{13} - 10^{14}$, где $u \sim 10^5 - 10^6$ см/с — скорость звука). Таким образом, $\theta_D \sim 10^2 - 10^3$ К.

При $\theta_D = 500$ К и $g = 1/3$, согласно формуле (3), $T_c \sim \theta_D e^{-3} = 25$ К, а вообще для фоновго механизма $T_c \leq 30 - 40$ К (к такому же выводу приводит и значительно более тщательный анализ [8]). Тем самым, с одной стороны, возможности повышения T_c традиционными методами (создание новых сплавов, их обработка) еще, видимо, далеко не исчерпаны (мы уже не говорим о веществах типа металлического водорода; см. ниже). С другой стороны, представляется понятным, почему трудно, а скорее всего и невозможно, ожидать создания

на основе фононного механизма подлинно высокотемпературных сверхпроводников с $T_c \geq 80-300$ К (здесь опять оставляем в стороне металлический водород).

Надежды на получение высокотемпературных сверхпроводников связываются в первую очередь с использованием экситонного механизма притяжения между электронами. Суть дела состоит в том, что в твердом теле помимо волн решетки (или, на квантовом языке, фононов) могут существовать возбуждения электронного типа — экситоны. В молекулярных кристаллах наглядным образом таких экситонов является возбужденное состояние молекулы, «перескакивающее» с молекулы на молекулу и, следовательно, бегущее по кристаллу. В полупроводниках экситоны в простейшем случае — это электрон и дырка, связанные друг с другом кулоновскими силами и образующие поэтому квазиатом, аналогичный атому позитрония. Энергия возбуждения (связи), отвечающая таким экситонам (речь идет об экситонах электронного типа; экситонами иногда называют и другие возбуждения), лежит обычно в пределах от сотых электронвольта до нескольких электронвольт. Обмен экситонами, подобно обмену фононами, может приводить к притяжению между электронами проводимости. В этом случае, однако, в формуле типа (3) температура $\theta \sim E_s/k \sim 10^3-10^5$ К (здесь E_s — энергия экситона; энергии $E_s \sim 1$ эВ отвечает температура $\theta \sim 10^4$ К). Поэтому, если бы удалось обеспечить за счет обмена экситонами достаточно сильное притяжение между электронами ($g \geq 1/4 - 1/5$), то значения критической температуры оказались бы большими. Известно несколько подходов или путей, на которых можно надеяться использовать экситонный механизм. Один из таких путей, на который я довольно долгое время (начиная с 1964 г.) возлагал наибольшие надежды, связан с применением слоистых соединений и «сэндвичей» — тонких металлических слоев с диэлектрическими обкладками.

Весьма интересные сверхпроводящие слоистые соединения действительно обнаружены [8], но высокая критическая температура у таких соединений, как и в случае «сэндвичей», не достигнута. Правда, масштаб и уровень соответствующих исследований никак не назовешь впечатляющими, особенно по сравнению с усилиями,

которые тратятся на создание моделей термоядерных реакторов или на постройку ускорителей. Причина, по-видимому, заключается в том, что теория не в состоянии выдвинуть вполне конкретных и простых рекомендаций, где искать высокотемпературные сверхпроводники, и, главное, не в состоянии дать каких-то гарантий успеха. С другой стороны, для создания высокотемпературных сверхпроводников, быть может, вовсе не нужен какой-то сверхсложный синтез новых веществ и не исключена возможность добиться успеха сравнительно скромными (хотя и современными) средствами. Поэтому я не очень удивился бы, если бы прочел о создании высокотемпературного сверхпроводника в очередном номере физического журнала (другое дело, что в этом случае, по всей вероятности, возникла бы сенсация и о новостях мы узнали бы из газет или радиопередач). Но не менее вероятно, что высокотемпературные сверхпроводники создать очень трудно, а в принципе и невозможно. Поэтому, как обычно в подобных условиях, наряду с оптимистическими оценками ситуации [7, 8] встречаются и весьма пессимистические [9].

Имея в виду последний период (1977—1979 гг.), отмечу следующее. В теоретическом плане удалось показать (см. [10], а также [8]), что выдвигавшееся возражение общего характера (см. [96]) против возможности достижения больших значений T_c не является правильным. В результате можно сказать, что нам в настоящее время неизвестны какие-либо препятствия или возражения принципиального характера, опровергающие оценку $T_c \lesssim 300$ К, и, следовательно, «закрывающие» возможность создания высокотемпературных сверхпроводников. Вместе с тем становится все более ясным, что достижение этой цели, если и возможно, то все же в весьма специальных условиях. В области эксперимента нужно особо отметить, пожалуй, открытие металлической проводимости (и сверхпроводимости с $T_c \approx 0,3$ К) в полимерном нитриде серы $(SN)_x$, не содержащем, очевидно, атомов металлов. Тем самым доказано, что отличной от нуля проводимостью при $T \rightarrow 0$ (т. е., по определению этого термина, металлической проводимостью) могут обладать вещества значительно более широкого класса, чем ранее предполагалось. Особенно интересно искать новые ме-

таллические проводники и сверхпроводники среди веществ, содержащих легкие атомы (в частности, среди органических соединений), поскольку для таких веществ имеются причины ожидать повышения T_c (см. [8]).

Не останавливаясь, естественно, на некоторых опровергнутых сообщениях об обнаружении сверхпроводимости при довольно высоких температурах, упомянем об одной из сенсаций 1978 г.— сообщениях [11, 12] об обнаружении «сверхдиамагнетизма» в соответствующим образом приготовленном и находящемся под давлением в несколько килобар хлориде меди (CuCl). При этом эффект («сверхдиамагнетизм») *) наблюдался при температурах, достигающих 150—200 К. Является ли наблюдаемый эффект подлинно новым или речь идет о какой-то экспериментальной ошибке либо имитации подлинного сверхдиамагнетизма, еще, к сожалению, не ясно. Если сверхдиамагнетизм в CuCl действительно наблюдается, то он мог бы оказаться следствием появления высокотемпературной сверхпроводящей фазы, возникновение которой возможно, в принципе, при переходе в сверхпроводящее состояние некоторых полупроводников или полуметаллов (см. [8], гл. 5). Другая возможность — образование «сандвичей» из Cu и CuCl . Возникла, однако, и совсем иная гипотеза: могут, по-видимому, существовать вещества неизвестного еще типа со спонтанными токами, которые должны обладать сверхдиамагнетизмом, но отличны от обычных сверхпроводников [13].

Поскольку как экспериментальная ситуация для CuCl , так и теоретические соображения, касающиеся несверхпроводящих сверхдиамагнетиков, остаются недостаточно ясными, вряд ли уместно входить здесь в детали. Но, даже если в CuCl не наблюдается высокотемпературная сверхпроводимость или какой-то новый фи-

*) В толщу идеального сверхпроводника достаточно слабое магнитное поле не проникает (это свойство называют эффектом Мейсснера). Формально можно сказать, что при эффекте Мейсснера магнитная восприимчивость, как и в случае идеального диамагнетика, равна $\chi_{\text{нд}} = -1/4\pi$. В обычных диамагнитных веществах $\chi \approx -(10^{-4} - 10^{-6})$. Сверхдиамагнетиками я называю (думаю, это уместно) вещества, для которых χ сравнимо с $\chi_{\text{нд}} = -1/4\pi$, скажем, если $\chi \sim -0,01/4\pi - 0,1/4\pi$. Как ясно из текста, сверхпроводники являются сверхдиамагнетиками, но обратное утверждение может быть и несправедливо.

зический эффект, это ни в какой мере, конечно, не способно опровергнуть возможность существования высокотемпературных сверхпроводников. Вопрос открыт, попытки ответить на него представляются исключительно увлекательными.

§ 3. Новые вещества (проблема создания металлического водорода и некоторых других веществ)

На Земле существует в природных условиях или получено искусственно огромное количество различных веществ (химических соединений, сплавов, растворов, полимеров и т. д.). Создание новых веществ, вообще говоря, относится к области химии или технологии, но не составляет физической проблемы. Положение меняется, когда речь заходит о совсем необычных (если угодно, экзотических) веществах. Сюда можно отнести уже упоминавшиеся высокотемпературные сверхпроводники, а также, например, гипотетические кристаллы с плотноупакованными структурами, которые обладали бы (если бы их удалось создать!) исключительно высокими механическими и термическими свойствами [14]. Так, плотноупакованный углерод («сверхалмаз») обладал бы твердостью (модулем упругости), на порядок превосходящей твердость алмаза. К сожалению, автор не знает современного состояния этой проблемы и, собственно, в какой мере она вообще реальна (т. е. может считаться физической проблемой). Но заведомо имеется одно «новое вещество», создание и изучение которого составляет важную и интересную проблему; кстати, она привлекает к себе в последнее время большое внимание. Речь идет о металлическом водороде.

Как известно, в обычных условиях (скажем, при атмосферном давлении) водород состоит из молекул, кипит при $T_b = 20,3$ К и затвердевает при $T_m = 14$ К. Плотность твердого водорода $\rho = 0,076$ г/см³, и он является диэлектриком. Однако при достаточно сильном сжатии, когда внешние атомные оболочки оказываются раздавленными, все вещества должны переходить в металлическое состояние. Грубую оценку плотности металлического водорода можно получить, если считать, что расстояние

между протонами порядка боровского радиуса: $a_0 = \hbar^2/me^2 = 0,529 \cdot 10^{-8}$ см. Отсюда $\rho \sim Ma_0^{-3} \sim 10$ г/см³ ($M = 1,67 \cdot 10^{-24}$ г — масса протона). Количественные, хотя и ненадежные расчеты приводят к меньшей плотности: например, согласно [15], молекулярный водород находится в термодинамическом равновесии с металлическим водородом при давлении $p = 2,60$ Мбар, когда плотность металлического водорода $\rho = 1,15$ г/см³ (плотность молекулярного водорода при этом $\rho = 0,76$ г/см³). Согласно [16], в равновесии $p = 1-2,5$ Мбар, причем неопределенность связана с отсутствием достаточно надежных данных об уравнении состояния молекулярной фазы. Возможно, металлический водород является сверхпроводящим, причем с высоким значением T_c , достигающим 100—300 К (для металлического водорода дебаевская температура $\theta_D \sim 3 \cdot 10^3$ К; поэтому по формуле (3) при $g < 1/2$ температура $T_c \leq 500$ К).

Получение такого простейшего в некотором отношении металла, как металлический водород, и определение для него критической температуры T_c представляют не только очевидный физический интерес, но может иметь актуальное астрофизическое значение (достаточно сказать, что большие планеты, такие, как Юпитер и Сатурн, в значительной своей части должны содержать металлический водород; см. [17]). Но еще несравненно важнее, что металлический водород может оказаться устойчивым (хотя, конечно, и метастабильным) даже в отсутствие давления. Существование подобных, вполне устойчивых метастабильных модификаций общеизвестно (примером может служить алмаз, который при низких температуре и давлении обладает более высокой свободной энергией, чем графит). В отношении металлического водорода вопрос о его устойчивости в отсутствие давления, как свидетельствуют некоторые расчеты [16, 18a], также решается положительно, но остается неясным, будет ли это состояние жить достаточно долго. Независимо от вопроса об устойчивости и длительности существования метастабильного состояния, теоретическое исследование [16] возможной структуры металлического водорода привело к интересным и неожиданным результатам: при нулевом давлении металлический водород должен иметь нитевидную структуру без

упорядочения вдоль нитей, т. е. должен обладать только двумерной периодичностью (нити образуют треугольную решетку в перпендикулярной к ним плоскости). Под давлением металлический водород может перейти в жидкое состояние еще до достижения равновесного давления (давления, при котором сосуществуют металлический и молекулярный водород); в этом случае, очевидно, твердый молекулярный водород будет под давлением переходить в жидкий металлический водород. Возможно, однако, что жидкому состоянию отвечают давления, большие равновесного. В других работах получены, правда, иные выводы [186], и в целом вопрос о структуре металлического водорода остается открытым.

Дальнейшее продвижение в области изучения металлического водорода вряд ли возможно без эксперимента — без попыток его создать (впрочем, необходимо также определить параметры молекулярного водорода при высоком давлении, что еще не сделано). Может оказаться интересным и исследование различных сплавов металлического водорода с более тяжелыми элементами. Так или иначе, проблема металлического водорода (как легкого, так и тяжелого, т. е. дейтерия) принадлежит сейчас к числу особенно актуальных. В случае же «удачи», если металлический водород окажется достаточно устойчивым (долгоживущим) при малом давлении, да к тому же еще и сверхпроводящим, получение и исследование металлического водорода станет одной из основных задач в области макроскопической физики.

К сожалению, попытки получить металлический водород в квазиравновесных условиях связаны с необходимостью создать в некотором объеме давления, превосходящие 1—2 Мбар. Известные же материалы, включая алмаз, не выдерживают, вообще говоря, таких нагрузок, и поэтому очень трудно сделать камеру, в которой водород сжимался бы до нужного давления. Один из интересных путей преодоления этой трудности связан с получением сверхвысоких давлений в области небольшого контакта между заостренной (конусообразной) и плоской «наковальнями», сделанными из алмаза или на основе алмаза. Таким способом были получены указания [19а] на появление металлического водорода. Применялись и применяются и другие методы (см. [196]),

однако в целом задача ни в коей мере не решена, и, когда будет получен «кусочек» металлического водорода, сказать трудно.

Создание или использование веществ с невиданными свойствами — одна из излюбленных тем для авторов фантастических романов. В этом случае, видимо, все позволено. Но неподтвердившиеся в дальнейшем сообщения об открытии совсем необычных веществ появлялись и на страницах вполне серьезных научных журналов (примером может служить утверждение о существовании полимерной, или сверхплотной, воды). Здесь дело, с одной стороны, в том, что во многих случаях очень трудно выяснить состав и свойства вещества, получаемого в крайне малых количествах, на очень короткое время (например, при взрыве) или, скажем, под очень высоким давлением. С другой стороны, сказывается, конечно, стремление авторов «не упустить» великое открытие. Соответствующие примеры поучительны, в частности, как напоминание о необходимости любое открытие считать окончательно установленным лишь после многократной и всесторонней проверки.

§ 4. Металлическая экситонная (электронно-дырочная) жидкость в полупроводниках

Если в полупроводнике имеются электроны и дырки (скажем, созданные в результате освещения), то при достаточно низкой температуре они должны соединиться в уже упоминавшиеся экситоны — водородоподобные «атомы», родственные позитронию. В первом приближении энергия связи и радиус таких экситонов в основном состоянии таковы:

$$E_{0, \text{э}} \sim \frac{e^4 m_{\text{эфф}}}{2\varepsilon^2 \hbar^2} = \frac{E_0 m_{\text{эфф}}}{m\varepsilon^2}; \quad a_{0, \text{э}} \sim \frac{\hbar^2 \varepsilon}{m_{\text{эфф}} e^2} = \frac{a_0 \varepsilon m}{m_{\text{эфф}}}, \quad (4)$$

где $E_0 = e^4 m / 2\hbar^2$ и $a_0 = \hbar^2 / m e^2$ — известные выражения Бора для энергии и радиуса атома водорода, $m_{\text{эфф}}$ — эффективная масса электрона и дырки (здесь эти массы считаются равными, а анизотропия не учитывается) и ε — диэлектрическая проницаемость полупроводника.

Поскольку в ряде случаев $\epsilon \geq 10$, а $m_{\text{эфф}} \leq 0,1 m$, становится ясным, что радиус экситонов $a_{0,\text{э}} \geq 10^{-6}$ см, а их энергия $E_{0,\text{э}} \leq 10^{-2}$ эВ ~ 100 К. Очевидно, эти изменения параметров (по сравнению с атомом водорода) связаны с ослаблением кулоновского притяжения в ϵ раз, а также с малостью эффективной массы $m_{\text{эфф}}$ (по сравнению с массой свободного электрона m *).

Как уже упоминалось в связи с проблемой металлического водорода, критерий высокой плотности и металлизации, грубо говоря, сводится к тому, что размер электронной оболочки сравнивается с межъядерным расстоянием. В случае экситонов в полупроводнике это значит, что их совокупность является плотной при концентрации $n_{\text{э}} \sim a_{0,\text{э}}^{-3} \sim 10^{18}$ см $^{-3}$. Таким образом, для экситонов высокая плотность, достигаемая для водорода при давлениях в миллионы атмосфер, отвечает вполне обычной концентрации электронов и дырок в полупроводниках: $n \sim 10^{18}$ см $^{-3}$. Уже одна такая возможность имитировать в полупроводниках сверхвысокие давления делает обсуждаемый вопрос достаточно важным. Это заключение оказывается еще более обоснованным, если задуматься над возможным поведением плотной системы экситонов в полупроводнике [20]. Такая система должна становиться жидкой и образовывать капли. Скорее всего, они представляют собой электронно-дырочный металл, т. е. подобны жидкому металлу, хотя и не исключена полностью возможность их «молекулярного» строения — тогда они аналогичны жидкому водороду, состоящему из молекул H_2 (роль молекул в молекулярной и, следовательно, диэлектрической экситонной «жидкости» играют биэкситоны — два соединившихся друг с другом экситона). В электронно-дырочной (экситонной) жидкости может, в принципе, наблюдаться сверхпроводимость или сверхтекучесть. Коротко говоря, экситонная жидкость в полупроводниках должна обладать целым рядом интереснейших свойств и особенностей, зависящих,

*) В интересующих нас случаях радиус экситона $a_{0,\text{э}} \gg a_0 \approx 5 \cdot 10^{-9}$ см, и именно поэтому взаимодействие между электроном и дыркой можно, вообще говоря, описывать законом Кулона с учетом влияния среды (как известно, в этом случае энергия взаимодействия зарядов $-e$ и $+e$ отвечает притяжению и по абсолютной величине равна $e^2/\epsilon r$, где r — расстояние между зарядами).

конечно, от характеристик используемого «контейнера» — полупроводника. Экспериментальное исследование этой проблемы уже проводится широким фронтом, но ситуация в целом остается недостаточно ясной [20]*). Можно думать, что проблема экситонной жидкости в полупроводниках в ближайшие годы будет находиться в центре внимания физики твердого тела.

Помимо сказанного выше в пользу такого заключения, хотелось бы привести еще два аргумента. Во-первых, работая с экситонами в полупроводниках, можно «моделировать» не только сверхвысокие плотности (давления), но и действие сверхсильных магнитных полей. Об этом речь еще пойдет в § 6. Во-вторых, на очереди исследование экситонов в двумерных и одномерных системах — на поверхности твердого тела (двумерная или квазидвумерная система) и в различных квазиодномерных образованиях (в длинных полимерах, на границе пересечения граней кристалла, в «усах», или вискерсах, — тонких кристаллических нитях, в дислокациях). В таких системах также могут, вообще говоря, образовываться электронно-дырочные «атомы» [21], причем условие высокой плотности теперь уже будет иметь вид $n_s \sim a_{0,s}^{-2}$ (двумерный случай) или $n_s \sim a_{0,s}^{-1}$ (одномерный случай). Это значит, что в двумерном случае переход к «жидкости» будет происходить уже при концентрации экситонов $n_s \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ (при $a_{0,s} \sim 10^{-6} \text{ см}$). Кроме того, вопрос о поверхностных экситонах представляет большой интерес с других точек зрения, в частности, для проблемы высокотемпературной сверхпроводимости [7,8] (см. также ниже § 8).

Мы уже подчеркивали, что упоминаемые в настоящей книжке проблемы, конечно, далеко не исчерпывают все интересные и важные вопросы, а отделение «важного» от «неважного» вообще дело трудное и, главное, довольно условное. Сейчас мы упомянули об этом еще раз, поскольку из всех проблем физики полупроводников здесь выделен лишь вопрос об экситонной жидкости. Специалисты же в области полупроводников, несомненно, назвали бы еще ряд проблем: вопрос о фазовых переходах ме-

*) См., однако, ниже.

талл — диэлектрик, неупорядоченные системы и др. Думаю все же, что проблема экситонной жидкости в полупроводниках отличается от других своей новизной, изяществом и многогранностью.

Приведенный выше текст настоящего § 4 слово в слово совпадает с текстом, опубликованным в 1974 г. в предыдущем издании книжки. Это сделано для того, чтобы можно было яснее выявить достигнутое за последние пять лет. За этот период проблема экситонной жидкости в полупроводниках действительно привлекала немалое внимание и, главное, в значительной мере была решена [22]. Именно, доказано появление при определенных условиях металлической экситонной жидкости в германии и кремнии. Более того, с этой поразительной жидкостью проведен ряд экспериментов. Было бы преждевременно, однако, «вывести» проблему экситонной жидкости в полупроводниках из нашего списка. Существуют, как известно, весьма разнообразные полупроводники, в частности отличающиеся своей анизотропией. В соответствии с этим и экситонная жидкость в полупроводниках должна обладать разными свойствами и параметрами. Особенно интересной сейчас представляется еще не выясненная на опыте возможность существования не металлической, а диэлектрической экситонной жидкости. Далее, как также упоминалось выше, стоит вопрос о сверхпроводимости и сверхтекучести экситонной жидкости. Остаются открытыми, в значительной мере, и проблемы, связанные с поведением экситонной жидкости в магнитном поле, а также на поверхности или в слоистых соединениях [21, 23].

В силу сказанного не приходится сомневаться в том, что исследования экситонной жидкости в полупроводниках будут в ближайшие годы занимать видное место. Но все же, если бы настоящая книга писалась сейчас заново, то, поскольку в этом направлении уже многое сделано, следовало бы, вероятно, уделить также внимание и другим проблемам физики полупроводников и вообще твердого тела. Помимо вопросов, уже вскользь упомянутых, нужно особо выделить так называемые спиновые стекла. Это название звучит как-то не особенно привлекательно для уха физика. В действительности, однако, речь идет о весьма интересном и в известной

мере новом классе веществ *). Я решил, тем не менее, ограничиться здесь в отношении спиновых стекол лишь несколькими ссылками на литературу [24].

§ 5. Фазовые переходы второго рода (критические явления). Некоторые примеры

Сверхпроводящий переход, превращение гелия I в сверхтекучий гелий II, возникновение ферромагнитного состояния из парамагнитного, многие сегнетоэлектрические (ферроэлектрические) переходы, ряд превращений в сплавах — таковы широко известные примеры фазовых переходов второго рода. При таких переходах отсутствует выделение (или поглощение) скрытого тепла, нет скачка объема или скачка параметров решетки, т. е. в известном смысле превращение можно считать непрерывным. Вместе с тем в точке перехода наблюдаются скачки теплоемкости, сжимаемости и других величин, а вблизи точки перехода многие из этих величин ведут себя аномальным образом. Так, теплоемкость для перехода гелий I ↔ гелий II и для некоторых других переходов неплохо описывается законом $C \sim \ln |T - T_c|$, где T_c — температура перехода (температура λ -точки). Магнитная и диэлектрическая проницаемости в случае соответственно ферромагнитного и сегнетоэлектрического переходов при $T \rightarrow T_c$ стремятся к бесконечности и часто приближенно описываются законом Кюри $\chi \sim |T - T_c|^{-1}$.

К фазовым переходам второго рода примыкают некоторые переходы первого рода, лежащие на p, T -диаграмме вблизи критической точки, или, как чаще говорят в последнее время, вблизи трикритической точки (см. [26]). Суть дела состоит в том, что при изменении ряда параметров (например, давления) переходы второго рода могут стать переходами первого рода (точка, в которой переходят друг в друга кривые для переходов таких

*) В спиновом стекле спины расположены хаотическим образом в пространстве, но они определенным нетривиальным образом упорядочены (скоррелированы) по направлениям. Поэтому термин «спиновое стекло» в известной мере дезориентирует, тем более что в настоящее время широко исследуются также металлические и вообще проводящие стекла, отличающиеся от обычного диэлектрического стекла в основном именно своей проводимостью [25].

типов на p, T -диаграмме, и называется трикритической точкой). Естественно, что переходы первого рода, близкие к трикритической точке, родственны переходам второго рода (скрытая теплота перехода отлична от нуля, но мала; вместе с тем наблюдается аномалия теплоемкости и т. п.). К числу таких переходов относятся, например, некоторые сегнетоэлектрические превращения, сверхтекучий переход в смесях ^4He с ^3He и, по-видимому, $\alpha \rightleftharpoons \beta$ -переход в кварце. Наконец, переходам второго рода аналогичны критические точки жидкость — пар (газ) и некоторые другие.

Решение проблемы фазовых переходов второго рода (и близких к ним переходов, см. в этой связи также [27]) состоит, очевидно, в достижении достаточно полного качественного и количественного понимания различных явлений вблизи точек перехода. В частности, речь идет о нахождении температурной зависимости всех величин — их зависимости от разности $(T - T_c)$.

Непрерывный характер переходов второго рода делает естественным их рассмотрение на основе разложения термодинамических величин (например, термодинамического потенциала) в ряд по некоторому параметру η , обращаемому в равновесии в нуль при $T \geq T_c$. Далее, коэффициенты A, B, C и др. в соответствующем разложении

$$\Phi = \Phi_0 + A\eta^2 + B\eta^4 + C\eta^6 + \dots \quad (5)$$

в свою очередь разлагаются в ряд по степеням $(T - T_c)$, так что вблизи типичного перехода второго рода $A = A'(T - T_c)$ и $B = B_0 = \text{const}$. Такой подход, восходящий к Гиббсу и Ван-дер-Ваальсу, был систематически развит Ландау [26].

В рамках теории Ландау для восприимчивостей получается закон Кюри $\chi \sim |T - T_c|^{-1}$, спонтанное намагничение \mathcal{M} или спонтанная электрическая поляризация \mathcal{P} при $T < T_c$ меняются по закону $\mathcal{M} \sim \sqrt{(T_c - T)}$, $\mathcal{P} \sim \sqrt{(T_c - T)}$ и т. д. Вместе с тем в теории Ландау, в общем, не находит объяснения аномальный температурный ход теплоемкости и других величин при $T \rightarrow T_c$. Кроме того, более детальные измерения показали [26, 28], что закон Кюри и другие аналогичные соотношения не-

точны в непосредственной близости к точке перехода, где $\chi \sim |T - T_c|^{-\gamma}$ и $\mathcal{M} \sim (T_c - T)^\beta$, причем $\gamma \neq 1$ и $\beta \neq 1/2$.

Теория Ландау приводит к тем же результатам, что и модельные теории (типа известной теории ферромагнетизма Вейсса), в которых используется метод самосогласованного (или, как иногда говорят, молекулярного) поля. Как отсюда, так, конечно, и из существа дела ясно, что ограничения теории Ландау связаны с пренебрежением флуктуациями. Именно, рассматривается среднее значение, например, намагниченности \mathcal{M} . Вместе с тем при $T \rightarrow T_c$ эта средняя величина $\mathcal{M} \rightarrow 0$, тогда как флуктуации \mathcal{M} не только не исчезают, но, напротив, сильно возрастают. Понятно поэтому, что область применимости теории Ландау, различная для разных переходов, есть область сравнительной малости флуктуаций [26, 29]. В окрестности же точки перехода, т. е. при достаточной малости разности $|T - T_c|$, необходимо учитывать флуктуации, что и приводит к аномальному ходу теплоемкости, отклонениям от закона Кюри $\chi \sim |T - T_c|^{-1}$ и т. п.

Последовательная теория фазовых переходов второго рода для трехмерных систем еще полностью не построена (см., однако, ниже), хотя на решение этой задачи были затрачены чрезвычайно большие усилия*). Но они все же отнюдь не пропали даром — в последние годы был получен целый ряд важных результатов. К их числу в первую очередь относятся законы подобия [26, 28], позволившие связать температурные зависимости различных величин вблизи точки перехода T_c . В силу этих законов и при учете некоторых экспериментальных данных удастся, например, предсказать, что при $T \rightarrow T_c$ в ряде случаев магнитная восприимчивость $\chi \sim |T - T_c|^{-\gamma}$, где $\gamma = 4/3$ (вместо $\gamma = 1$ согласно теории Вейсса или Ландау). Более того, так называемые критические индексы (β , γ и т. д.) для систем разных типов удастся довольно точно вычислить и без привлечения опытных данных**).

*) Л. Д. Ландау как-то сказал мне, что ни на одну задачу он не потратил столько сил, сколько на попытки решить проблему фазовых переходов второго рода.

**) Любопытно отметить, что неприменимость самосогласованной теории типа Ван-дер-Ваальса (или типа Ландау, пользуясь более распространенной в настоящее время терминологией) вблизи критической точки в жидкости отмечалась еще в конце прошлого века (см. [30]).

Создание последовательной теории фазовых переходов второго рода и родственных им переходов с учетом отличий, характерных для различных превращений, а также обобщение всех результатов на кинетические процессы вблизи T_c остается одной из центральных проблем физики твердого тела. Существует, правда, мнение, что главное здесь уже сделано, но это не касается различных интересных частных случаев.

В качестве примера приведем две возникающие здесь более конкретные задачи, выбор которых из числа других, быть может, случаен и диктуется лишь интересами автора. Первая задача — поведение гелия II вблизи λ -точки. В теории сверхтекучести Ландау плотность сверхтекучей компоненты гелия ρ_s считается некоторой заданной функцией, скажем, температуры T и давления p . Но в рамках общей теории фазовых переходов второго рода плотность ρ_s нельзя задавать, она должна сама определяться из условия минимума термодинамического потенциала. Такой подход [31] приводит к ряду интересных следствий — зависимости $T_c \equiv T_\lambda$ и теплоемкости C от толщины пленки гелия II, к неоднородности ρ_s вблизи твердой стенки или вблизи оси вихря в гелии II и т. п. По-видимому, все эти выводы отвечают действительности, но в целом создание теории сверхтекучести гелия II вблизи λ -точки и ее экспериментальная проверка еще далеко не завершены. Второй пример — рассеяние света вблизи точек фазового перехода второго рода и, в частности, вблизи точки $\alpha \rightleftharpoons \beta$ -превращения в кварце [32—35]. Поскольку при приближении к T_c флуктуации возрастают, в этой области можно ожидать увеличения интенсивности рассеянных рентгеновских лучей, нейтронов и света. Подобное явление (критическая опалесценция) давно уже известно в случае критической точки жидкость — пар. Резкое повышение интенсивности рассеянного света наблюдается и в кварце [32] вблизи происходящего при температуре $T_c = 846$ К перехода из α - в β -модификацию. Казалось, здесь все в принципе ясно, но в дальнейшем выяснилось [34], что картина сложнее и не описывается простой теорией [33].

Сейчас это представляется не столь уж странным, поскольку в теории [33] «для простоты» не учитывалось

такое отличие твердого тела от жидкостей, как возможность существования сдвиговых деформаций. В некоторых случаях (точнее, при изучении ряда эффектов) изотропные твердые тела (например, стекла) и даже кристаллы действительно ведут себя почти так же, как жидкости. Но, разумеется, подобный подход оправдан далеко не всегда. Например, в жидкости поперечные звуковые волны сильно затухают и, можно сказать, не могут распространяться; в твердом же теле «поперечный» звук распространяется, вообще говоря, не хуже «продольного».

Рассеяние света в твердом теле и особенно аномалии этого рассеяния вблизи точек фазовых переходов, как выяснилось, обязательно должны рассматриваться с учетом сдвиговых деформаций [35]. Однако учет этого обстоятельства, позволяющий понять ряд наблюдающихся особенностей при рассеянии света в кристаллах, еще отнюдь не объясняет автоматически картины рассеяния при $\alpha \rightleftharpoons \beta$ -переходе в кварце. В этом случае (и, видимо, в ряде других родственных случаев) ситуация усложняется в результате появления в узком интервале температур вблизи точки перехода какой-то неоднородной фазы или смеси α - и β -фаз. Вопрос о рассеянии в области $\alpha \rightleftharpoons \beta$ -перехода остается в целом недостаточно ясным как теоретически, так и на опыте. Тем интереснее дальнейшее изучение рассеяния света вблизи точек фазовых переходов в твердых телах, жидких кристаллах и жидкостях (в частности, в жидком гелии) [35]. В плодотворности этого направления трудно сомневаться, учитывая уже то широкое его развитие и те достижения, которые связаны с изучением рассеяния света в жидкостях и твердых телах вне области фазовых переходов [36].

В заключение заметим, что приведенные примеры касаются все же, можно сказать, обыденных, или классических, фазовых переходов. В последнее же время все большее внимание привлекают к себе более «экзотические» переходы, такие, например, как фазовый переход жидкого ^3He в сверхтекучее состояние [37], фазовые переходы в экситонном «веществе» в полупроводниках (см. выше § 4), переход в сверхтекучее состояние в молекулярном жидком водороде [38a] и в квантовых кристаллах

[386], фазовые превращения в сверхплотном веществе, в частности в нейтронных звездах (см. ниже § 21) и др.

Упомянем также о фазовых переходах в неквантовых жидкостях — в жидких кристаллах, в магнитных веществах (ферро- и антиферромагнитные переходы в жидкой фазе), о сегнетоэлектрическом переходе в жидкости, о фазовых переходах в твердых телах с образованием «несоразмерных» (неоднородных) фаз и, наконец, о фазовых переходах или различных аномалиях (таких, например, как изменение температурной зависимости магнитной восприимчивости, возникающее в некоторой «точке» T_a) в квазидвумерных и квазиодномерных системах (см. [8], гл. 6 и 7).

Из всех перечисленных сейчас переходов остановимся несколько подробнее только на переходах в жидком ${}^3\text{He}$. Уже около 20 лет обсуждается возможность того, что атомы ${}^3\text{He}$ могут «слипаться» в пары с целым спином и в результате бозе-эйнштейновской конденсации (см. § 2) перейти в некоторое сверхтекучее состояние. Такое состояние аналогично сверхпроводящему состоянию, но в силу отсутствия у атомов ${}^3\text{He}$ заряда должно обладать свойством сверхтекучести, а не сверхпроводимости; впрочем, сверхпроводимость тоже можно называть сверхтекучестью, но в системе заряженных частиц.

Раньше считалось, однако, что «слипание» атомов ${}^3\text{He}$ в пары происходит под влиянием весьма слабых ван-дер-ваальсовых сил и поэтому температура сверхтекучего перехода должна быть крайне низкой. Между тем в 1972 и 1973 гг. выяснилось [37], что в жидком ${}^3\text{He}$ (правда, под давлением, достигающим почти 34 атм) происходит даже не один, а два фазовых перехода тоже при очень низких, но все же достижимых температурах, равных соответственно примерно $2,7 \cdot 10^{-3}$ и $2,0 \cdot 10^{-3}$ К. Сейчас уже надежно установлено, что речь идет действительно о переходе в сверхтекучие состояния, отличающиеся друг от друга полным моментом количества движения «пар», причем притяжение, ответственное за их образование, обусловлено, по-видимому, не ван-дер-ваальсовыми силами, а силами между спинами атомов ${}^3\text{He}$ (речь идет о так называемых обменных силах, приводящих к ферромагнетизму).

Исследования сверхтекучести и других эффектов в жидком ^3He (кстати сказать, распространенность этого изотопа примерно в 10^7 раз меньше, чем изотопа ^4He), проведенные за последние 5—6 лет, поражают своей тонкостью и размахом [37]. Речь ведь идет о работе в области температур, лишь на $(1-3) \cdot 10^{-3}$ К превышающих абсолютный нуль, и об объекте (сверхтекучем ^3He), отличающемся большой сложностью (по сравнению со сверхтекучим ^4He), обусловленной наличием орбитального и спинового моментов. Я склонен думать, что в области физики конденсированных сред успехи в изучении жидкого ^3He являются, пожалуй, самыми впечатляющими за последние несколько лет.

Изучение жидкого ^3He и переходов в ряде других упомянутых систем активно продолжается.

Проблема фазовых переходов в целом, несомненно, остается одним из главных магистральных направлений макрофизики.

§ 6. Поведение вещества в сверхсильных магнитных полях

Характерная разность энергий между уровнями атома водорода

$$E_a \sim \frac{e^4 m}{2\hbar^2} \sim 10 \text{ эВ.} \quad (6)$$

Разность энергий между уровнями свободного нерелятивистского электрона в магнитном поле

$$E_H \sim \frac{e\hbar H}{mc} \sim 10^{-8} H \text{ эВ,} \quad (7)$$

где напряженность магнитного поля измеряется в эрстедах (или в гауссах, так как под H с равным успехом можно понимать магнитную индукцию B); оценка (7) относится как к уровням орбитального движения, так и к спиновым уровням (собственный магнитный момент электрона $\mu = e\hbar/2mc$, и разность энергий между уровнями, отвечающими состояниям со спином по полю и против поля, равна как раз $2\mu H = e\hbar H/mc$).

До последнего времени приходилось встречаться лишь с магнитными полями, слабыми по атомным мас-

штабам, когда $E_H \ll E_a$ и, следовательно,

$$H \ll \frac{e^3 m^2 c}{\hbar^3} = \left(\frac{e^2}{\hbar c} \right)^2 \frac{mc}{e\hbar} mc^2 \sim 3 \cdot 10^9 \text{ Э.} \quad (8)$$

Для тяжелых атомов с атомным номером Z аналогичное условие слабости поля имеет вид $H \ll 3 \cdot 10^9 Z^3 \text{ Э}$, т. е. может нарушаться только в еще более грандиозных полях. Поэтому еще недавно вопрос о сильных полях, когда

$$H \geq 3 \cdot 10^9 Z^3 \text{ Э,} \quad (9)$$

считался довольно абстрактным и не привлекал к себе особого внимания. Но сейчас положение изменилось.

Открытые в 1967—1968 гг. пульсары представляют собой намагниченные нейтронные звезды, и, по оценкам, магнитное поле на их поверхности может достигать 10^{13} Э (см. ниже § 21). Таким образом, вещество на поверхности пульсара и вблизи от нее находится в сильном поле, даже если учесть, что это вещество, возможно, состоит в основном из железа ($Z=26$, $Z^3 \sim 20\,000$). В сильных полях (см. (9)) и особенно в сверхсильных полях, когда $H \gg \gg 3 \cdot 10^9 Z^3 \text{ Э}$, атомы совсем не похожи на те привычные образы, которые мы связываем с атомами в отсутствие поля или в слабых полях. Именно, в сверхсильных полях электронная оболочка атома вытягивается в сравнительно узкую иглу, направленную по полю. В подобных условиях двум атомам (скажем, атомам железа) энергетически выгодно образовать молекулу Fe_2 с большой энергией связи. Совокупность подобных молекул образует, вероятно, структуру полимерного типа также с большой энергией связи (подробнее о поведении вещества в сильных магнитных полях см. [39]). Именно такой и должна быть твердая поверхность нейтронных звезд, если поле на их поверхности достаточно сильно (как сказано, это в ряде случаев представляется вполне возможным). Эта кора испаряется или разрушается электрическим полем лишь с большим трудом, что может быть весьма существенно для теории пульсаров [39б, в].

Пульсары находятся далеко от нас, что, конечно, крайне затрудняет изучение вещества в сверхсильных магнитных полях. Да и вообще большинство физиков

интересуется «земными» условиями, и возможности, открывающиеся в астрофизике, их мало волнуют. Впрочем, и независимо от этого вполне естествен вопрос: а нельзя ли создать и применить сильные поля в лабораторных условиях? Перспективы в этом отношении, по-видимому, не представляются особенно обнадеживающими, даже если речь идет о полях, достижимых в фокусе сверхмощных лазеров (см. §§ 7, 15). Оценка ситуации, однако, полностью изменяется, если иметь в виду моделирование и, по сути дела, изучение действия сверхсильных полей в случае экситонов в полупроводниках. Действительно, как мы видели (см. формулу (4)), энергия связи водородоподобного экситона меньше, чем у атома водорода, в $m_{эфф}/m_e$ раз, т. е. в практических условиях, например, в 1000 раз. Энергия же электронов и дырок, связанная с их орбитальным движением в магнитном поле, определяется выражением типа (7) с заменой m на $m_{эфф}$. Отсюда ясно, что действующее на экситон магнитное поле является сильным [20, 22] уже при условии $H \geq 3 \cdot 10^9 m_{эфф}^2 / m^2 \epsilon^2 \sim 3 \cdot 10^5$ Э (при $m_{эфф} \sim 0,1 m$ и $\epsilon \sim 10$), а иногда и при более слабом условии (здесь имеется в виду численное значение поля). Подобные поля — хотя обычно и в импульсном режиме — уже доступны для экспериментирования. Таким образом удастся, вероятно, изучить экситонное «вещество» в сильных и даже в сверхсильных магнитных полях.

Включение вопроса о поведении вещества в сильных магнитных полях в наш список «особенно важных проблем» может вызвать, как и в ряде других случаев, сомнения или возражения. По моему мнению, однако, эта проблема выделяется своей, если можно так выразиться, свежестью и неожиданным звучанием — применением к нейтронным звездам и к экситонам.

§ 7. Разеры, газеры и сверхмощные лазеры

Хотя увлечение лазерами иногда выглядит как дань моде, их огромное значение для развития науки и техники бесспорно. Было даже замечено, пусть в шутку, что на смену атомному веку пришел лазерный век. Тем не менее, по уже изложенным во введении причинам, нет оснований в этой небольшой книжке специально ос-

танавливаться на развитии лазерной техники, а также на применении и использовании лазеров, включая сюда вопросы самофокусировки и другие проблемы, связанные с нелинейными процессами и явлениями (несомненно, впрочем, очень интересными со многих точек зрения)*). Но имеются исключения, указанные в заголовке настоящего параграфа, и без их упоминания вряд ли может обойтись составитель любого списка «особенно важных физических проблем».

В существующих лазерах достигнута в импульсе мощность порядка 10^{13} Вт. Пределом фокусировки является фактически площадь $\lambda^2 \sim 10^{-8}$ см², где $\lambda \sim 10^{-4}$ см — длина волны, характерная для известных мощных лазеров. В этом случае было бы достигнуто значение плотности потока $P \sim 10^{21}$ Вт/см². Практически уже удалось сфокусировать излучение мощного лазера на площадь порядка $10^{-4}—10^{-5}$ см², откуда $P \sim 10^{17}—10^{18}$ Вт/см². В этом случае напряженность электрического (и магнитного) поля в фокусе равна $\mathcal{E} \sim 3 \cdot 10^7$ СГСЭ/см $\approx 10^{10}$ В/см (здесь следует воспользоваться соотношением $P = \frac{c}{4\pi} \mathcal{E}^2$ для потока энергии электромагнитного поля). Как мы видели в § 1, для создания лазерных термоядерных реакторов нужно поднять мощность лазеров на два порядка, не говоря уже об увеличении к п. д.

*) Заметим, кстати, что сейчас нелегко понять, почему первый лазер заработал лишь в 1960 г., а не лет на 40 ранее, вскоре же после того, как Эйнштейн в 1916 г. ясно и на современном уровне ввел понятие об индуцированном излучении. По-видимому, дело в том, что долгое время ясна была лишь принципиальная возможность получить усиление излучения за счет индуцированного испускания. Но коэффициент усиления обычно невелик, и ключом к созданию лазера послужил переход от режима усиления к режиму генерации за счет многократного отражения луча от зеркал, ограничивающих рабочее вещество в лазере. Создание же генератора носило характер изобретения, которое было значительно легче сделать радиофизикам, чем оптикам.

Справедливости ради нельзя не отметить, что это замечание является несколько односторонним. Слишком уж часто кажется, что то или иное крупное открытие или изобретение можно было сделать раньше, чем это фактически произошло (довольно ярким примером в этом отношении могут служить комбинационное рассеяние света и эффекты Вавилова — Черенкова и Мёссбауэра). Мы уже не говорим о том, что «задержка» с открытием или изобретением никак не может умалить заслуг тех, кто его наконец сделал.

примерно на порядок. Уже эта задача очень сложна и не может считаться технической: для ее решения необходимы физические исследования. И уж подлинно физической проблемой является задача повышения плотности потока P до значений порядка 10^{26} — 10^{27} Вт/см², требуемых для достаточно эффективного рождения электронно-позитронных пар в вакууме (см. ниже § 15).

Помимо постройки сверхмощных лазеров, к числу важных и принципиальных физических проблем следует отнести создание рентгеновских и гамма-аналогов лазера — их можно назвать соответственно разерами и газерами *).

На пути создания этих приборов стоят поистине гигантские трудности. Во-первых, коэффициент усиления довольно быстро уменьшается с уменьшением длины волны, и поэтому необходимо, вообще говоря, иметь исключительно большие мощности накачки, обеспечивающие нужную перенаселенность возбужденных уровней (напомним, что индуцированное испускание обычно возникает при переходах атома или ядра с возбужденных энергетических уровней на более низкие уровни). Во-вторых, в рентгеновской области, не говоря уже о гамма-диапазоне, очень трудно создать хороший резонатор

*) Слово «лазер» составлено из первых букв английской фразы «усиление света с помощью индуцированного излучения радиации» (light amplification by stimulated emission of radiation). Поэтому говорить о «рентгеновском лазере» или о «гамма-лазере», как часто делают, представляется не очень-то последовательным. Предлагаемая здесь терминология связана с заменой буквы «л», отвечающей «свету» (light), на «р» (рентген) или «г» (гамма). Автор пустился в эти терминологические упражнения, вероятно, потому, что не смог предложить никакой идеи по существу дела, т. е. не придумал, как же создать разер или газер.

Говоря о терминологии, нужно также напомнить об отсутствии четкого разграничения между рентгеновскими и гамма-лучами. Иногда считают рентгеновским излучение с энергией фотонов, меньшей, скажем, 100 кэВ (длина волны больше примерно 0,1 Å). Тогда гамма-лучи — это излучение с большей энергией. Но по крайней мере столь же часто рентгеновское и гамма-излучение различают по их происхождению, считая, что при ядерных переходах всегда возникают гамма-фотоны. Все известные нам предложения, касающиеся разеров и газеров, относятся к области энергий, не превышающих примерно 10 кэВ, иными словами, гамма-лучами в этом случае называют фотоны, излучаемые при ядерных переходах.

(отражатели), обеспечивающий длительное пребывание излучения в области возбужденного рабочего вещества (роль такого резонатора в лазерах играют, как известно, зеркала на торцах рабочего вещества лазера или вблизи от них). В принципе, конечно, можно обойтись вообще без отражателей, но тогда либо коэффициент усиления должен быть большим, либо размеры системы (рабочего вещества) должны быть большими. Поэтому создание разеров связывают, например, с усилением излучения в очень плотных релятивистских электронных пучках, которые можно в принципе получить от сильноточных усилителей. Газер же, быть может, удастся построить [40] на ядерных переходах мёссбауэровского типа (речь идет об очень узких линиях) с заселением верхнего уровня путем захвата нейтронов, образующихся при ядерном взрыве (такой должна быть мощность «нейтронной накачки»), если не будут найдены какие-то новые реальные пути другого решения проблемы (соответствующие поиски уже ведутся [40]).

В свете таких трудностей позволено вообще сомневаться в возможности создания разеров и газеров, представляющих интерес для их использования при физических исследованиях *). Ведь успех лазеров в этом отношении связан не только с принципами (в индуцированном испускании излучения всех диапазонов сомневаться не приходилось), а и с возможностями использовать весь арсенал оптики и вместе с тем со сравнительно скромными требованиями к мощности накачки и свойствам рабочего вещества.

Но кто знает... В истории физики было столько случаев, когда перспективы решения задачи казались почти безнадежными или фантастическими. А потом открывались новые явления (например, деление тяжелых элементов), и безнадежное быстро превращалось в реальное, а затем даже тривиальное! Создание разеров и газеров, быть может, тоже ждет какого-то «прорыва» — рождения новой идеи или открытия новых явлений. Нельзя, впрочем, отрицать и возможности «печального исхода». Так

*) Имеем в виду излучение с длиной волны порядка ангстрема и более короткой; в области очень мягких рентгеновских лучей создать разер, по-видимому, значительно легче.

следовало бы считать, если бы убедительным образом была выяснена нереальность создания достаточно эффективных и полезных для каких-либо целей разеров и (или) газеров.

§ 8. Изучение очень больших молекул. Жидкие кристаллы. Некоторые явления на поверхности

Длинное заглавие настоящего параграфа объединяет три группы вопросов, на которых мне не хотелось останавливаться, но они требуют хотя бы упоминания *).

Гигантские молекулы (нуклеиновые кислоты, белки) доминируют в биологии, и при их изучении физические методы уже оказали неоценимую услугу. Однако этого мало, нужно разработать новые эффективные способы анализа строения больших молекул, в частности, в условиях, когда таких молекул очень мало и они находятся в растворе или в смеси с другими молекулами [2]. Эта задача, несомненно, физическая, но столь же трудная, сколь и важная.

Жидкие кристаллы — многочисленный класс веществ, которые могут находиться в состоянии, одновременно жидком и анизотропном (в этом жидкокристаллическом состоянии вещество течет, но остается оптически анизотропным), — изучаются уже около 90 лет, но до недавнего времени они рассматривались скорее как некоторая экзотика. В общем это понятно. До тех пор, пока оставались малоизученными простые вещества — твердые и жидкие тела, обладающие сравнительно несложным строением (химическим составом, структурой и т. п.), было не так уж много надежды разобраться в строении значительно более сложных веществ. В случае жидких

*) Последнее можно сказать и о такой старой или, скорее, даже древней проблеме, как природа шаровой молнии. Спектр предлагаемых объяснений этого явления чрезвычайно широк (плазменное образование, низкочастотный или высокочастотный разряд, антивещество, оптический обман или какой-то физиологический эффект в глазе, возникающий после вспышки молнии, и т. п.; см. [41] и указанную там литературу, а также [42]). Уже отсюда ясно, что вопрос о природе шаровой молнии остается таинственным и открытым, хотя работы [42] и позволяют надеяться на то, что круг возможных объяснений сильно сузился.

кристаллов долгое время не было и дополнительных стимулов, связанных с перспективой важных научных или технических приложений. Но сейчас ситуация коренным образом изменилась. «Простое» в области физики твердого тела, а частично и физики жидкостей уже более или менее выяснено, и концентрация внимания на простейших объектах и процессах все чаще может быть уподоблена ситуации в известном анекдотическом рассказе о поисках пропавших ключей под фонарем только на том основании, что в этом месте светло. К тому же в случае жидких кристаллов выяснилась не только их важность для биологии, но и возможность ряда существенных технических применений, связанных с резкой зависимостью ряда свойств этих веществ от температуры и от напряженности внешних электрического и магнитного полей [43]. В результате число работ, посвященных жидким кристаллам, очень сильно возросло, причем они публикуются в самых распространенных и «серьезных» физических журналах, а не только в журналах по физической химии или специальном журнале «Молекулярные кристаллы и жидкие кристаллы», появление которого тоже достаточно симптоматично.

Свойства поверхности, влияние и роль поверхности, изучение поверхностей твердых тел и жидкостей привлекают к себе внимание с давних пор. Но возможность получения действительно чистых и совершенных поверхностей, возможность детального контроля и исследования поверхности [44a] — все это, в общем, достижения последнего периода. Вместе с тем процессы миниатюризации в технике и технологии выдвигают на передний план изучение поверхностных явлений для их практических применений. Все сказанное позволяет ожидать в ближайшее время резкого повышения удельного веса исследований поверхностных явлений современными методами и на высоком уровне. Для физики это означает, вероятно, что все более интенсивно будут изучаться различные поверхностные возбуждения — возбуждения (фононы, плазмоны, экситоны, поляритоны, спиновые волны и т. д.), локализованные вблизи поверхности [44б]. Возникает вопрос об обнаружении и исследовании поверхностных аналогов ферромагнетизма, сегнетоэлектричества, жидкокристаллического состоя-

ния, сверхпроводимости и сверхтекучести. Правда, для двух измерений некоторые фазовые переходы, в частности появление сверхтекучести и сверхпроводимости, по своему характеру отличны от переходов в объеме, т. е. для трехмерных систем. Конкретно, в двумерной системе не может возникнуть сверхпроводящий или сверхтекучий, а в некоторых случаях и ферромагнитный дальний порядок, т. е. не возникает упорядочения (например, отсутствует параллельность магнитных моментов на сколь угодно больших расстояниях). Однако для конечных, но еще весьма больших макроскопических поверхностей упорядочение возможно. Кроме того, например, сверхпроводимость и сверхтекучесть возможны и в отсутствие дальнего порядка [см. [27)]. Изучение упорядочения и различных связанных с ним явлений в двумерных, а также в одномерных системах (полимерные цепи, ребра граней и т. д.) должно привлечь к себе очень большое внимание как в общетеоретическом плане, так и в применении к разнообразным конкретным объектам и условиям. При этом понятия о двумерных и одномерных системах не нужно понимать буквально, например, как пленку или цепочку с толщиной в один атом или молекулу (собственно, даже в таких случаях толщина пленки или цепочки, разумеется, отлична от нуля — она порядка 10^{-8} — 10^{-7} см, а для больших молекул еще больше). Действительно, для пленок толщиной в несколько атомов (например, для пленки, образованной несколькими слоями атомов, осажденными на некоторой «подложке») или даже для более толстого образца, но с подходящей слоистой или нитевидной структурой сохраняются определенные черты двумерных или одномерных систем — в таких случаях часто говорят о квазидвумерности и квазиодномерности. Ясно, что выше имелись в виду и такие системы (см., например, [8]). В общем речь идет и о чистых поверхностях массивных тел, и о различных пленках (в частности, находящихся на различных поверхностях), и о цепочках, ребрах граней и т. д.

Три проблемы, упомянутые в настоящем параграфе, несомненно, менее резко и определенно очерчены по сравнению с рассмотренными ранее. Вероятно, это вина автора, не нашедшего нужных аргументов и примеров для пояснения, обоснования и конкретизации мнения об

особой важности и актуальности исследования больших молекул и жидких кристаллов, а также ряда поверхностных явлений. Могу лишь добавить, что в этих случаях, за исключением, быть может, жидких кристаллов, речь в значительной мере идет о поисках принципиально новых методов или новых явлений, о расширении рамок макроскопической физики.

§ 9. Сверхтяжелые элементы (далекие трансураны). «Экзотические» ядра

Самый тяжелый обнаруженный в природе элемент — уран — состоит из $Z=92$ протонов и $N=146$ нейтронов (речь идет об ^{238}U). Начиная с 1940 г. приступили к искусственному созданию трансурановых элементов путем бомбардировки тяжелых ядер (включая ядра урана и трансуранов) нейтронами и различными ядрами. Первым был создан нептуний (Np_{93}), за ним последовали плутоний (Pu_{94}), америций (Am_{95}), кюрий (Cm_{96}), берклий (Bk_{97}), калифорний (Cf_{98}), эйнштейний (Es_{99}), фермий (Fm_{100}), менделевий (Md_{101}) и элементы 102, 103, 104, 105, 106 и 107, еще не получившие официального названия. Самые тяжелые из известных трансурановых элементов живут секунды или даже доли секунды (ядра распадаются в результате испускания α - и β -частиц и спонтанного деления). Грубая экстраполяция приводит к заключению, что элементы с $Z \geq 108-110$ должны спонтанно делиться с такой большой скоростью, что получение и изучение таких элементов маловероятно. Однако, хотя трансураны содержат 240—260 частиц (нуклонов) и в этом отношении напоминают капельки жидкости, их свойства все же не меняются монотонно с ростом Z или, скажем, параметра Z^2/A ($A=Z+N$ — массовое число). Иными словами, одночастичные и оболочечные эффекты заметны, а иногда значительны даже для самых тяжелых элементов. Поэтому есть надежда на возможность существования сравнительно долгоживущих изотопов элементов с $Z > 105$. Конкретно, предполагается [45, 46], что элемент с $Z=114$ обладает замкнутой оболочкой (т. е. что 114 является магическим числом), а изотоп этого элемента $^{298}_{114}$, содержащий $N=184$ нейтрона, является даже дважды магическим. Это не значит еще,

что ядро $^{298}_{114}$ самое стабильное, ибо нужно учитывать все возможные пути распада (спонтанное деление, α - и β -распады). В частности, некоторые расчеты приводят к выводу о наибольшей «живучести» ядра $^{294}_{110}$, обладающего периодом полураспада $T_{1/2} \sim 10^8$ лет.

По мнению, являющемуся, видимо, общепризнанным, точность всех таких расчетов невелика и они не имеют какого-либо количественного значения. Но сама возможность повышенной стабильности ядер в районе значений $Z \approx 114$ и $N \approx 184$ кажется вероятной, причем не исключено даже существование высокой стабильности отдельных изотопов или хотя бы одного из них. В последнем случае такой изотоп мог бы наблюдаться на Земле, в метеоритах или в космических лучах. Кроме того, конечно, более или менее стабильные изотопы (скажем, с $T_{1/2} \geq 1$ с) можно надеяться синтезировать и обнаруживать методами, использованными в случае уже известных трансуранов.

Поиски далеких трансуранов уже несколько лет назад начали вести на всех этих путях [45, 46]. Такие поиски имеют немалый интерес для ядерной физики, а возможно, и астрофизики (не говоря уже о том, что они подобны увлекательным попыткам обнаружить неизвестные или считающиеся вымершими виды животных).

Итак, поиски далеких трансуранов продолжаются, но пока безуспешно. Здесь не обошлось, правда, без сенсации: в середине 1976 г. появилось сообщение об обнаружении весьма стабильных элементов с $Z=116, 126$ и др. Однако эта работа, хотя и была выполнена рядом квалифицированных физиков и опубликована в очень высоко котирующемся журнале «Physical Review Letters», оказалась неверной. Я упоминаю об этом лишь для того, чтобы подчеркнуть, что от ошибок застрахованы лишь те, кто не работает. Нет также оснований отказываться от публикации сенсационных сообщений до их проверки. Для развития науки полезнее опубликовать неверную работу (это позволит быстро ее проверить другим авторам), чем задерживать публикацию важных результатов до их подтверждения. Разумеется, это не призыв к снижению требований и публикации «сырых» данных, я лишь считаю неоправданными чрезмерные требования и слишком резкую критику тех, кто ошибся (нужно иметь в виду,

что автор опубликованной неправильной работы сурово наказан уже выявлением его ошибки).

Возвращаясь к проблеме сверхтяжелых элементов, можно думать, что никто не станет возражать против ее включения в наш «список». Другое дело, можно ли или целесообразно ли относить одну из проблем физики атомного ядра к макроскопической физике. Конечно, это спорный вопрос, и о нем еще пойдет речь в следующем параграфе. Более существенно то обстоятельство, что из всей области ядерной физики здесь фигурирует лишь одна проблема сверхтяжелых элементов, между тем как можно назвать и другие вопросы, такие, например, как изомерия ядер, связанная с различием их формы [47], и изучение ядер, состоящих из нуклонов и антинуклонов. Дело в том, что наряду с «обычными» атомными ядрами существуют, можно сказать, «экзотические» ядра, такие, например, как уже наблюдаемые ядра из нуклонов и антинуклонов, представляющие большой интерес для изучения ядерных сил и в других аспектах [48]. В этой связи можно упомянуть и о гипотезе, согласно которой могут при определенных условиях оказаться стабильными или метастабильными ядра с повышенной плотностью и, конечно, с другими параметрами, отличными от характерных для обычных атомных ядер [49]. Вообще, атомное ядро — весьма своеобразная система, в частности, потому, что даже в самых тяжелых ядрах не так уж много частиц (не более 300). Поэтому в ядрах значительна роль поверхностных эффектов и наблюдаются различные немонотонности (флуктуации) в распределении уровней. Наконец, ядерные силы недостаточно хорошо известны, что принципиально отличает ядерную физику от атомной. Все сказанное действительно нужно иметь в виду, но, к сожалению, это не помогло автору сделать настоящий параграф более интересным; видимо, решить такую задачу может лишь специалист в области физики ядра.

II. МИКРОФИЗИКА

§ 10. Что понимать под микрофизикой?

Когда речь шла о макрофизике, не потребовалось никакого введения. Но о том, что понимать под микрофизикой, нужно условиться. Размеры атома ($\sim 10^{-8}$ см) и тем более атомного ядра ($\sim 10^{-13}$ — 10^{-12} см) считаются микроскопическими, и с этой точки зрения атомные и ядерные явления следует отнести к микрофизике. Но фактически дело обстоит не так просто.

Хорошо известно, что в физике (да и не только в физике) говорить о малом или большом можно лишь по сравнению с какой-то величиной (эталоном), которая считается не малой и не большой. В случае длины (пространственного расстояния) таким эталоном естественно считать характерный размер человеческого тела, т. е. длину, скажем, порядка метра. Однако по сравнению с таким масштабом очень малы не только атомы и ядра, но и, например, длины волн оптического излучения, а также размеры ряда искусственно создаваемых объектов. Вместе с тем вряд ли кто-либо согласится относить к области микромира пленки или проволоочки диаметром порядка микрометра. К этому нужно добавить, что по сравнению с метром размеры Земли, а тем более расстояние от Земли до Солнца, равное $1,5 \cdot 10^{13}$ см, являются уже очень большими. Поэтому, если исходить только из отношения масштабов, Солнечную систему следовало бы отличать от макрообъектов с размерами порядка метров с меньшим основанием, чем атомы и атомные ядра.

В силу подобных соображений микромир часто определяют как область действия квантовых законов, тогда как в макромире господствуют классические закономерности. Такой подход представляется довольно глубоким, хотя его условность также очевидна. Достаточно сказать, что в ряде случаев классические законы хорошо применимы и при рассмотрении соударений между нуклонами,

а, с другой стороны, квантовые закономерности иногда определяют поведение вполне макроскопических систем (упомянем, например, о квантовании магнитного потока через сверхпроводящие цилиндры). Наконец, важно подчеркнуть, что с развитием науки меняются, вообще говоря, сами границы между различными областями и дисциплинами, меняется также содержание различных понятий.

Все это дает основания рассматривать границу между микро- и макрофизикой в качестве исторической категории. Конкретно, представляется разумным и оправданным считать, что в настоящее время атомная и ядерная физика в основном уже относятся к макро-, а не к микрофизике.

Основания для этого таковы. Во-первых, атомы и ядра представляют собой совокупности частиц и, к тому же, системы, состоящие лишь из немногих самых распространенных частиц (протонов, нейтронов и электронов). Во-вторых, для атомов и ядер обычно достаточно нерелятивистского приближения, т. е. широко применима прекрасно освоенная нерелятивистская квантовая механика. Оба эти обстоятельства роднят атомную и ядерную физику с макрофизикой.

Естественность смещения условной границы, разделяющей микро- и макрофизику, ясна и из такого примера. До изобретения микроскопа к области микроявлений с полным основанием можно было относить всё невидимое человеческим глазом. Затем микроскопическим стали называть невидимое в микроскоп, например отдельные атомы. Сейчас, когда атомные, а в известной мере и ядерные масштабы уже освоены и достаточно доступны нашему мысленному взору*), имеются основания считать микроскопическим лишь «плохо видимое» или совсем «невидимое». Тем самым, к микрофизике почти безоговорочно относится та область, которую называли и еще сейчас называют физикой элементарных частиц;

*) Впрочем, отдельные атомы удается уже наблюдать, можно сказать, и непосредственно, с помощью автономного микроскопа [50], а также используя специальный электронный микроскоп [51]. В последнее время соответствующая техника шагнула еще дальше вперед (см., в частности, [44a]).

теперь, однако, ее чаще именуют физикой высоких энергий или, более конкретно, мезонной физикой, нейтринной физикой и т. п.

Объектами исследования в микрофизике являются, следовательно, в основном только «простейшие», «элементарные» частицы, их взаимодействие, управляющие ими законы.

Как и большинство определений, такое определение и понимание микрофизики условно, в известной мере даже произвольно. Но оно представляется, по крайней мере, не менее четким и не менее допустимым, чем другие определения. Так или иначе, ниже термин «микрофизика» используется именно в указанном смысле. При этом почти автоматически микрофизика, как и в прошлом, оказывается областью исследований, где неясности касаются самого фундамента, а не только надстроек. Если же иметь в виду тип закономерностей, то в микрофизике в настоящее время (при принятом определении) доминирует релятивистская квантовая теория. Наконец, если за основу принять некоторое расстояние, то для микрофизики сейчас характерна длина порядка или меньше 10^{-11} см (для электрона комптоновская длина $\hbar/mc = 3,85 \cdot 10^{-11}$ см, а для барионов $\hbar/Mc \sim 10^{-14}$ см *).

Нужно заметить, что при всем при том относится ядерную физику уже сегодня полностью к области макрофизики, конечно, нелегко (об этом, по сути дела, уже упоминалось в конце § 9).

Изучение ядра является одним из существенных путей исследования взаимодействия между нуклонами, а также нуклонами и другими частицами; релятивистские эффекты в ядрах довольно значительны, и, вообще,

*) Наиболее глубокой является, видимо, классификация, основанная на типе или характере закономерностей. Поэтому самым последовательным в настоящее время представляется выделение трех областей, в которых главенствуют соответственно классические законы, нерелятивистская квантовая механика и, наконец, релятивистская квантовая теория. Эти три области можно было бы называть макрофизикой, микрофизикой и, скажем, ультрамикрофизикой. Но самое последовательное далеко не всегда оказывается самым удобным и привычным. Поэтому наилучшим кажется поступить так, как сделано в тексте, т. е. говорить, как и в прошлом, только о макро- и микрофизике, но несколько передвинуть границу между ними.

связи ядерной физики с физикой элементарных частиц в целом многочисленны и тесны. Поэтому, нарушив традицию и поместив ядерную физику среди макроскопических проблем, автор, вероятно, несколько опередил события. Вряд ли, однако, подобный вопрос о классификации имеет существенное значение, если только не считать именно микрофизику «солью земли», а занятия макрофизикой — какой-то деятельностью второго сорта. Сам я, разумеется, не придерживаюсь такой странной (хотя все же иногда встречающейся) точки зрения и разделяю убеждение, что не место красит человека, а человек красит место. Бояре на Руси придавали, как известно, первостепенное значение как раз месту, на котором они «сидят» в присутствии царя. Но в науке нет царя, и борьба за боярские привилегии на места представляется весьма неуместной (тем, кому эти замечания покажутся «холостым выстрелом», рекомендую ознакомиться хотя бы со статьей Дайсона [2]).

Трудности, стоящие на пути решения фундаментальных проблем микрофизики, аналогичны тем, которые возникали при построении теории относительности и квантовой механики. Подобные исследования, даже если они достигают сравнительно скромных результатов, требуют исключительных усилий, фантазии, напряжения. Они порождают особую атмосферу, вызывают к жизни высокий накал страстей, разных страстей... Но это уже другая тема *), здесь же ограничусь констатацией того факта, что адекватно отразить содержание и своеобразие проблем микрофизики мне не под силу. Такая задача и не ставится: ниже, еще с большей условностью, чем в других случаях, выделены некоторые микрофизиче-

*) Тема эта скорее для писателя, и, к сожалению, я не могу сейчас привести пример вполне удачного решения. Правда, в качестве яркой иллюстрации, передающей характер работы над фундаментальными проблемами, хочется привести слова, которыми Эйнштейн закончил свою лекцию, посвященную истории создания общей теории относительности [52]: «В свете уже достигнутых результатов счастливо найденное кажется почти само собой разумеющимся, и любой толковый студент усваивает теорию без большого труда. Позади остались долгие годы поисков в темноте, полных предчувствий, напряженное ожидание, чередование надежд и изнеможения и, наконец, прорыв к ясности. Но это поймет только тот, кто пережил все сам».

ские проблемы и дана лишь самая конспективная их характеристика. Быть может, именно чувство неудовлетворенности изложением микрофизической части настоящей книжки побудило автора написать этот параграф, а также § 16, без которых, вероятно, лучше было бы обойтись. К счастью, проблемы микрофизики освещаются весьма часто и компетентно, так что у нас есть, куда отослать читателей (см. ряд ссылок ниже).

§ 11. Спектр масс. Кварки и глюоны

До 1932 г. были известны лишь три «элементарные» частицы: электрон, протон и фотон. Затем были открыты нейтрон, позитрон, μ^\pm -мезоны, π^\pm - и π^0 -мезоны, более тяжелые мезоны, гипероны, частицы-резонансы, электронное и мюонное нейтрино и антинейтрино. Некоторые из этих частиц ничем не менее (но и не более) элементарны, чем протон или электрон. Другие (например, гипероны и частицы-резонансы) кажутся скорее возбужденными состояниями более легких частиц. Большинство частиц нестабильно, они превращаются друг в друга и окружены «облаками» виртуальных частиц (например, нуклоны одеты в π -мезонные «шубы»). Таким образом, понятия об элементарности или сложности частиц сами становятся весьма неэлементарными и сложными. Частицы характеризуются массой, спином, зарядом, временем жизни и рядом других величин и квантовых чисел [53, 54], причем количество различных частиц весьма значительно.

Пять лет назад это утверждение казалось бесспорным. Сейчас же необходимо сделать существенную оговорку. Разумеется, переход от нескольких стабильных или долгоживущих частиц (таких, как нейтрон) к сотням частиц (в основном быстро распадающихся) — шаг огромной важности. Но, с другой стороны, еще в 1963—1964 гг. зародилась гипотеза о существовании кварков — проточастиц, из которых «слеплены» все барионы и мезоны (частицы обоих этих типов сильно взаимодействуют и по этому признаку объединяются под общим названием адронов). В последние годы, особенно после открытия в 1974 г. новых частиц [55] со свойствами, успешно интерпретируемыми на основе кварковой модели с привлече-

нием кварков четвертого типа *) — «очарованных» кварков, представление о кварках получило широкое признание. Поэтому известный итог многолетних исследований природы и структуры барионов и мезонов можно сейчас видеть в первую очередь в создании новой, кварковой модели строения этих частиц.

Когда гипотеза о кварках была высказана, она встретила весьма противоречивое к себе отношение. Объясняется это, во-первых, некоторыми общими соображениями, изложенными ниже и заставляющими сомневаться в законности постановки вопроса типа: из чего состоит протон? Во-вторых, кварки обычно наделяются дробными электрическими зарядами, равными $\frac{2}{3}$ и $-\frac{1}{3}$ (за единицу заряда принят заряд позитрона или протона). Но такие дробные заряды никогда не наблюдались и были непривычны. Более того, все поиски свободных, изолированных кварков, энергично проводившиеся после 1964 г., не привели к положительным результатам. Конечно, категорически утверждать, что чего-то нет (не существует), чрезвычайно трудно. Однако очень похоже на то (и считается в настоящее время наиболее вероятным), что в свободном состоянии, т. е. в виде индивидуальных частиц типа барионов, мезонов или лептонов, кварки находиться не могут. Казалось бы, на этом основании действительно можно с полным правом усомниться в самом существовании кварков как некоторой физической реальности. Тем не менее кварковая модель не только не была оставлена, но, как уже упоминалось выше, укрепила свои позиции и пока торжествует одну победу за другой.

Здесь нет возможности, да и неуместно подробнее излагать кварковую модель. Отсылая к хорошим популярным статьям [56], приведем для удобства читателя лишь табличку, содержащую квантовые числа кварков четырех типов или, как говорят, ароматов (flavors).

Спин всех кварков равен $\frac{1}{2}$, и, следовательно, они являются фермионами. Барионы состоят из трех кварков, причем протон и нейтрон имеют соответственно состав uud и udd . Странные и очарованные кварки s и c входят только в состав странных и очарованных частиц.

*) Вначале вводились лишь кварки трех типов (см. ниже).

Аромат (тип кварка)	Заряд	Барионное число	Стран- ность (s)	Очаро- вание (c)
u (up)	$2/3$	$1/3$	0	0
d (down)	$-1/3$	$1/3$	0	0
s (strange)	$-1/3$	$1/3$	-1	0
c (charmed)	$2/3$	$1/3$	0	1

Для антикварков все квантовые числа меняют знак, и, например, антикварк \bar{u} имеет заряд $-2/3$ и барионное число $-1/3$. Мезоны состоят из кварка и антикварка. Например, конфигурация (состав) π^+ -мезона есть ud (ясно, что заряд такой конфигурации равен $2/3 + 1/3 = 1$, барионное число равно $1/3 - 1/3 = 0$, а спин может равняться нулю, как и должно быть). К сожалению (?), дело не ограничилось указанными четырьмя частицами и четырьмя античастицами. Пришлось ввести еще одно квантовое число, называемое цветом (color), так что кварк каждого типа (flavor) может еще находиться в трех состояниях, отличающихся цветом (условно красным, зеленым и синим). Три кварка, образующие барион, обязательно должны иметь три разных цвета, в силу чего барион является бесцветным. Мезоны также бесцветны, поскольку цвет антикварка отвечает антицвету кварка.

В итоге полное число кварков и антикварков с учетом цвета достигает уже 24. Впрочем, дело этим не ограничивается. Уже сейчас на основе экспериментальных данных имеются основания для введения кварков пятого типа (пятого аромата), а в теории появился и кварк с шестым ароматом (эти кварки называют top- и bottom-кварками). В случае шести ароматов и трех цветов общее число кварков и антикварков равно уже, очевидно, 36.

В литературе появились гипотезы и о возможном увеличении числа ароматов и цветов. Во всяком случае, утверждать, что кварковая модель ограничивается 24 или даже 36 кварками и антикварками, еще никак нельзя. Далее, кварки взаимодействуют между собой и их взаимодействие связано с обменом квантами некоторых полей (подобно тому как электромагнитное вза-

имодействие связано с обменом фотонами). Но «склеивающих» кварки полей (они называются глюонными от английского слова «glue» — клей) приходится вводить не одно, а несколько (обычно 8). Каждому такому полю отвечают свои кванты-частицы (глюоны). Таким образом, общее число частиц в кварковой модели вещества достигает нескольких десятков.

Не слишком ли это много? — Таков вопрос, хотя и риторический, но невольно возникающий, когда речь идет о преимуществах кварковой модели. Вряд ли, конечно, подобное возражение само по себе сколько-нибудь существенно — даже и при большом числе кварков и глюонов сведение сотен адронов к комбинациям из кварков, пусть и нескольких типов, вносит какой-то порядок и обладает красотой.

Гораздо глубже и важнее другой вопрос: имеет ли смысл говорить о существовании частиц (кварков), ненаблюдаемых в свободном состоянии? И что, собственно, значит, что барион «состоит» из трех кварков? На последний вопрос можно, правда, дать довольно четкий ответ: рассеяние, скажем, электронов и нейтрино на протоне оказывается таким же, как если бы протон содержал три точечных частицы (состоял из трех частиц), — их назвали партонами, причем роль партонов вполне могут играть кварки [57].

Вместе с тем это еще не доказывает, что кварки существуют. Например, магнитная стрелка, да и любой другой магнит, ведет себя так, как если бы на ее концах находились магнитные полюсы. Фактически никаких магнитных полюсов не существует (по крайней мере в обычных условиях) и все сводится к токам (движению электрических зарядов) и дипольным (спиновым) магнитным моментам ряда частиц (электронов, протонов и др.). Эта аналогия между магнитными полюсами и кварками весьма глубока [58]: как ни дели магнит, полюсы все равно остаются «спаренными» (т. е. любой магнитик имеет северный и южный полюсы); точно так же любые известные превращения адронов не приводят к появлению изолированных кварков, а последние рождаются только в виде барионов и мезонов, т. е. тройками и парами. Нужно отметить также, что и сама кварковая модель еще не однозначна. В частности, существуют

схемы, в которых заряд кварков является не дробным, а целым *) [59].

Вопрос о существовании кварков можно считать одним из аспектов общей проблемы о возможности различать простые (элементарные) и составные (сложные) частицы. Мы можем утверждать, например, что атом водорода состоит из протона и электрона, поскольку разбить (ионизовать) этот атом легко, затратив лишь энергию, большую 13,6 эВ и очень малую по сравнению с энергией в 1 МэВ, необходимой для рождения пары электрон — позитрон. По последней причине число частиц в атомной физике практически сохраняется и, конкретно, атом водорода можно разделить именно на протон и электрон — стабильные частицы, существующие в свободном состоянии. А состоит ли нейтрон из протона и электрона, как предполагалось, когда задолго до его обнаружения нейтрон фигурировал в качестве гипотетического «микроатома» водорода? Как известно, на этот вопрос дается отрицательный ответ, и распад нейтрона интерпретируется как рождение электрона и антинейтрино с переходом нейтрона в протон ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e + 0,8 \text{ МэВ}$). Считать, что нейтрон «состоит» из протона, электрона и антинейтрино, нельзя, в частности, и потому, что сам протон может распадаться на нейтрон, позитрон и нейтрино (хотя это и происходит с поглощением энергии, но осуществляется для протонов, находящихся в β^+ -активных ядрах). Подобные примеры как раз и свидетельствуют об ограниченной пригодности понятия «состоит из» в применении к частицам со значительной энергией связи или большой энергией продуктов распада. Между тем именно такова, вообще говоря, ситуация для кварковых моделей адронов.

Итак, сравнительно большие энергии связи и, главное, отсутствие кварков в свободном состоянии (об этой особенности принято говорить как об «удержании» кварков), несомненно, дают основания для подозрений, что кварки являются лишь вспомогательными образами (типа магнитных полюсов в электродинамике), пусть и удобными для описания различных явлений и свойств адронов,

*) Не доказано также, что мезоны состоят из кварка и антикварка, а не, скажем, из двух кварков и двух антикварков [150].

но не носящими особенно фундаментального характера. Именно такую точку зрения высказывал, в частности, в конце своего более чем пятидесятилетнего пути в физике один из создателей квантовой теории В. Гейзенберг [60]. Осторожность в вопросе о «существовании» кварков и фундаментальности кварковой картины проявляют и физики, активно занимающиеся этой проблемой [56б, 58].

Нужно ли, впрочем, решать вопрос в какой-то категорической форме: «адроны состоят из кварков» или «кварки — это лишь вспомогательное понятие»? Не является ли более привлекательной картина, в которой адроны представляют собой сложные динамические системы, имеющие общие черты с атомами и атомными ядрами, но качественно отличные от них именно в смысле их неделимости на самостоятельные составные части? Такой подход кажется весьма глубоким *). Все развитие атомистики шло по пути введения все новых первичных кирпичей вещества (молекулы, атомы, атомные ядра и электроны, нуклоны); кварки были бы еще одним этапом на этом пути, и если так продолжать, то встал бы вопрос: а из чего состоят кварки? Более того, протокварки уже фигурируют в физической литературе. Но не все могут верить в существование «бесконечной матрешки» — открыли одну куклу, а в ней лежит другая, и так без конца. Глубокой и вместе с тем естественной по ряду соображений представляется мысль как раз о том, что безграничное и механическое повторение процесса деления вещества когда-то прекращается, причем нетривиальным образом: барионы и мезоны, возможно, одновременно и состоят из частей (типа каких-то кварков) и не состоят из них. Именно так можно описать ситуацию, в которой составные части не могут существовать сами по себе (в свободном состоянии), но тем не менее в ряде отношений ведут себя аналогично ядру в атоме или нуклонам в ядре.

*) Воспользуемся случаем, чтобы привести здесь приписываемое Н. Бору определение глубокого утверждения или замечания: «Для того чтобы определить, какое утверждение является глубоким, нужно раньше определить, что такое ясное утверждение. Утверждение считается ясным, если противоположное утверждение или правильно, или ложно. Глубокое утверждение должно обладать тем свойством, что противоположное утверждение также является глубоким» [61].

Подобные рассуждения способны, быть может, как-то примирить с представлением о кварках критиков, признающих «по-настоящему» существующими (или реальными) лишь частицы, могущие быть свободными. Но дело, в конце концов, не в словах и не в уточнении понятий и терминов. На основе кварковых моделей сейчас происходит бурное развитие теории кварков, глюонов и их взаимодействия (эту теорию обычно называют квантовой хромодинамикой), в которой пытаются количественно описать спектр масс адронов и их взаимодействие. Если такие попытки приведут к далеко идущему успеху, к однозначной количественной кварковой модели адронов, то споры на тему, существуют кварки или не существуют, как-то потеряют смысл. Другими словами, тогда можно будет сказать, что кварки вполне реальны, хотя и обладают свойствами (в первую очередь свойством «удержания»), отличными от характерных для частиц, встречающихся в физике ранее.

В настоящее же время вряд ли можно утверждать, что кварковая гипотеза уже одержала полную и безоговорочную победу. Более того, сомнения на этот счет имеют под собой некоторую почву, как уже ясно из сказанного выше. Подчеркну поэтому, что проблему спектра масс пытались и пытаются решать и на других путях. Один из них — единая полевая теория элементарных частиц [62], могущая быть также названной теорией первоматерии, поскольку делается попытка положить в основу некоторое первичное спинорное поле со спином $1/2$. Эта теория в идейном отношении во многом связана с квантовой хромодинамикой и заведомо сыграла положительную историческую роль [63]. Однако развитие теории первоматерии на базе нелинейных уравнений для поля со спином $1/2$ кажется весьма привлекательным и интересным и вне связи с квантовой хромодинамикой и кварками. Упомяну и о другом пути — попытках построения релятивистских моделей частиц с внутренними степенями свободы [64].

Еще один неожиданный и далеко не тривиальный подход к проблеме первоматерии — идея Фридмонов, связывающая макромир (и даже Вселенную) с микромиром и элементарными частицами. Как следует из общей теории относительности, замкнутый мир Фридмана, который

может служить моделью Вселенной (см. ниже § 19), имеет равные нулю полную массу и заряд (масса равна нулю потому, что исходная масса составляющих мир частиц компенсируется гравитационным дефектом массы — результатом гравитационного взаимодействия между частями). Если же рассмотреть «полузамкнутый» мир, состоящий, грубо говоря, из почти замкнутого мира, связанного некой «горловиной» с бесконечным пространством, не содержащим вещества, то его масса и заряд могут быть весьма малыми *). Таким образом, для внешнего, удаленного наблюдателя целый мир может представляться небольшой частицей — фридмоном. В рамках классической теории масса, заряд и другие параметры (спин) фридмона не определены, а квантовая теория фридмонов еще не построена. Можно надеяться, однако, что в квантовой теории фридмоны будут обладать параметрами элементарных частиц. Разумеется, это пока что только фантастическая возможность, надежда, мечта. Но она столь смело указывает путь объединения противоположностей — макромира и микромира, что уже поэтому заслуживает внимания. Для этого имеются и другие, более конкретные основания, особенно если говорить в широком плане о связи микрофизики с общей теорией относительности и ее еще не созданным квантовым обобщением (см. также § 19).

Выше мы имели в виду сильно взаимодействующие частицы (адроны, т. е. барионы и мезоны). Несколько особняком стоит не менее важная и интересная проблема спектра масс лептонов (электронов и позитронов, μ^\pm -мезонов и нейтрино), а также недавно открытых более тяжелых τ -мезонов [65]). В частности, причина различия масс электрона и μ -мезона давно считается и остается загадкой. Упомянем также, что не исключено существование некоторых «экзотических» частиц, не входящих в известные семейства. К числу таких частиц относятся, например, магнитные полюсы — монополи и тахионы — гипотетические частицы, движущиеся со скоростью,

*) Более подробное и четкое пояснение заняло бы много места и как-то нарушило бы стиль изложения. Поэтому ограничиваемся несколькими замечаниями, которые будут ясны лишь посвященному читателю. Других же читателей отсылаем к соответствующей статье в книге [36].

большей скорости света в вакууме. Как монополи, так и тахионы уже пытались найти, хотя и безуспешно. Скорее всего, такие частицы (особенно тахионы) существовать не могут, но характерно, что при современном неудовлетворительном состоянии теории элементарных частиц она, естественно, почти ничего не может запретить. Особо упомянем о гипотезе промежуточных мезонов, или W-частиц, ответственных за слабое взаимодействие (до сравнительно недавнего времени считалось более вероятным, что лептоны взаимодействуют с адронами «слабыми силами», так сказать, непосредственно; если же существуют соответствующие «промежуточные бозоны», то слабое взаимодействие осуществляется в два этапа: адроны — барионы и мезоны — взаимодействуют с промежуточными бозонами, а последние — с лептонами). В случае существования промежуточных мезонов возможно известное объединение электромагнитного и слабого взаимодействий, т. е. сведение их к одному «правзадействию» (в результате константы электромагнитного и слабого взаимодействий оказываются связанными друг с другом; см. § 14).

Ни одна попытка решить проблему спектра масс, как уже было сказано, не привела к безусловному и вполне определенному успеху. Правда, кварковая модель за последние несколько лет получает все большее признание, и, быть может, в отношении адронов, наконец, «лед тронулся». Бесспорно, однако, что для решения проблемы спектра масс частиц *) нужно пройти еще длинный и трудный путь. Эта проблема, одна из центральных в физике, чрезвычайно широка и принципиальна.

§ 12. Фундаментальная длина (квантованное пространство и т. п.)

В специальной и общей теории относительности, в нерелятивистской квантовой механике, в существующей теории квантовых полей используется представление о

*) По существу, речь идет, конечно, не только о спектре масс, но и обо всех характеристиках частиц. Более того, различия между барионами и лептонами являются качественными и более глубокими, чем между барионами с различными массами.

непрерывном, по сути дела классическом, пространстве и времени (точка пространства-времени характеризуется четырьмя координатами $x_i = x, y, z, ct$, могущими принимать непрерывную последовательность значений). Но всегда ли законен такой подход? Откуда следует, что «в малом» пространство и время не становятся совсем иными, какими-то «зернистыми», дискретными, квантованными? Вопрос этот отнюдь не нов и, по-видимому, впервые был поставлен Риманом еще в 1854 г. [66], а затем обсуждался неоднократно. Так, в своей известной лекции «Геометрия и опыт» Эйнштейн в 1921 г. говорил [67]:

«Предложенная здесь физическая интерпретация геометрии не может быть непосредственно применена к областям пространства субмолекулярных размеров. Тем не менее даже в вопросах строения элементарных частиц она сохраняет некоторый смысл. В самом деле, в том случае, когда мы описываем электрические элементарные частицы, составляющие материю, можно сделать попытку сохранить физический смысл за теми аспектами поля, которые использовались в физике для описания геометрического поведения тел, больших по сравнению с молекулами. Только успех может служить оправданием такой попытки приписать физическую реальность основным понятиям римановой геометрии вне области их физического определения. Однако может оказаться, что подобная экстраполяция имеет не больше оснований, чем распространение понятия температуры на части тела молекулярных размеров».

Ясно сформулированный здесь вопрос о границах применимости римановой геометрии (т. е., по существу, макроскопических, или классических, геометрических представлений) остается без ответа и до сих пор. По мере продвижения в область все больших энергий и, следовательно, более «близких» столкновений различных частиц (см. ниже § 13) масштаб необследованной области пространства уменьшается. Сейчас можно, видимо, утверждать, что вплоть до расстояний порядка 10^{-15} см обычные пространственные соотношения справедливы или, точнее, их применение не приводит к противоречиям. В принципе не исключено, что предела нет вообще, но все же значительно более вероятно существование какой-то фунда-

ментальной (элементарной) длины $l_f \leq 10^{-16} - 10^{-17}$ см, которая ограничивает возможности классического пространственного описания. Более того, в настоящее время кажется разумным считать, что фундаментальная длина l_f во всяком случае не меньше гравитационной длины $l_g = \sqrt{G\hbar/c^3} \sim 10^{-33}$ см (см. ниже § 19).

Проблема фундаментальной длины в разных формах и вариантах обсуждается уже много лет (эта длина входит в теорию первоматерии [62], в различные варианты теории квантованного пространства [68] и др.). С проблемой фундаментальной длины тесно связан вопрос о возможных нарушениях причинности в микромире (или, как говорят, о нарушении микропричинности), а также ряд других направлений в микрофизике и проблема сингулярностей в общей теории относительности и космологии (см. ниже § 19). Если какая-то фундаментальная длина существует, то естественно полагать, что она играет роль и для решения проблемы спектра масс. Фундаментальная длина, вероятно, служила бы «обрезающим» фактором, в котором в той или иной мере нуждается существующая квантовая теория поля; в теории, содержащей фундаментальную длину, по идее автоматически исчезли бы расходящиеся выражения.

В экспериментальном плане поиски фундаментальной длины связаны с исследованием соударений частиц при все больших и больших энергиях, а также с осуществлением сверхточных измерений различных величин при меньших энергиях. Вообще, несогласие существующей теории (типа квантовой электродинамики) с опытом явилось бы указанием на возможное нарушение используемых пространственно-временных представлений и необходимость введения фундаментальной длины (мы вернемся к этому вопросу в §§ 19, 21).

§ 13. Взаимодействие частиц при высоких и сверхвысоких энергиях

Изучение взаимодействия частиц при высоких и сверхвысоких энергиях служит целому ряду целей: «прощупыванию» структуры частиц и самого пространства в малых масштабах, обнаружению все новых и новых частиц-ре-

зонансов (возбужденных барионов и мезонов), определению энергетической зависимости сечений для упругого и неупругого рассеяния.

При столкновении нуклона с нуклоном достигается расстояние

$$l = \frac{\hbar}{m_{\pi}c} \frac{Mc^2}{E_c}, \quad (10)$$

где $\hbar/m_{\pi}c \sim 10^{-13}$ см — комптоновская длина для π -мезона, M — масса нуклона ($Mc^2 \approx 1$ ГэВ) и E_c — энергия нуклона в системе центра масс (подробнее см., например, [69]). Если один из нуклонов покоится, а другой имеет энергию $E = \sqrt{M^2c^4 + c^2p^2}$, то

$$E_c = \sqrt{(E + Mc^2)Mc^2/2}. \quad (11)$$

Сейчас на ускорителях достигнута энергия $E \approx 500$ ГэВ (Батавия, США). Даже при $E \approx 500$ ГэВ, очевидно, $E_c \approx 15$ ГэВ и $l \approx 5 \cdot 10^{-15}$ см. В космических лучах встречаются частицы с энергией вплоть до $E \approx 10^{20}$ эВ, но практически вряд ли удастся использовать для анализа индивидуальных актов соударения космические протоны с энергией $E \geq 10^{15}$ эВ; при этом $E_c \leq 10^3$ ГэВ и $l \geq 10^{-16}$ см (некоторые сведения о законах взаимодействия частиц между собой в космических лучах можно все же получить и для больших энергий, особенно в области $E \leq 10^{17}$ эВ). В методе встречных пучков сталкиваются частицы, движущиеся навстречу друг другу. Если каждая из этих частиц имеет энергию E' и массу покоя M , то система центра масс совпадает с лабораторной системой, причем $E_c = E'$. Недавно в Европе получены встречные пучки протонов с $E' \approx 30$ ГэВ. Если речь идет о достижении тех же значений E_c , этот эксперимент эквивалентен использованию пучка протонов с энергией

$$E = \frac{2(E')^2}{Mc^2} - Mc^2 \approx 2000 \text{ ГэВ}, \quad (12)$$

сталкивающегося с неподвижной водородной мишенью. Очевидно, во встречных пучках с энергией E' для частиц в каждом пучке можно «породить» состояния (частицы) с энергией до $2E'$. В обозримом будущем можно

рассчитывать достигнуть значений $E' = E_c \sim 500$ ГэВ, что отвечает энергии

$$E \approx \frac{2(E')^2}{Mc^2} \sim 5 \cdot 10^5 \text{ ГэВ} = 5 \cdot 10^{14} \text{ эВ.} \quad (13)$$

Однако и в этом случае расстояние

$$l = \frac{\hbar}{m_{\pi}c} \frac{Mc^2}{E_c} \sim 10^{-16} \text{ см,} \quad (14)$$

так что изучение расстояний $l < 10^{-16}$ см остается очень трудным и при использовании метода встречных пучков.

Отметим попутно, что колоссальные трудности, с которыми часто связано изучение частиц с очень высокими энергиями, малыми временами жизни и т. п., стимулируют развитие новых методов и способов ускорения и детектирования частиц. Прогресс в области создания ускорителей и детектирующих устройств (пузырьковые и ионные камеры, различные счетчики и т. д.) является весьма впечатляющим. В этой связи следует вообще подчеркнуть, что микрофизика, помимо всего прочего, оплодотворяет и обогащает физику в целом в плане развития методов и техники эксперимента.

При столкновениях частиц, которые не испытывают сильного взаимодействия (мюоны, электроны, фотоны), наименьшая длина, фигурирующая при столкновениях, порядка длины волны в системе центра масс, т. е. $l = \frac{\hbar c}{E_c} = \frac{\hbar}{m_i c} \frac{m_i c^2}{E_c}$ (здесь $E_c \gg m_i c^2$, где m_i — массы сталкивающихся частиц), и возможности достижения малых расстояний несколько более благоприятны, чем в случае нуклонов. Кроме того, при высокой точности измерений и тщательном сравнении с теорией, вообще говоря, удастся «прощупывать» расстояния, которые несколько меньше получаемых просто на основании приведенных грубых оценок. Но все равно, совершенно ясно, сколь трудно перешагнуть предел $l \sim 10^{-16} - 10^{-17}$ см (при $E_c = 1000$ ГэВ длина $l = \hbar c / E_c \approx 1,5 \cdot 10^{-17}$ см).

Сравнение теории рассеяния с опытом при все более высоких энергиях, наряду с исследованием все новых резонансных состояний для барионов и мезонов и определе-

нием различных эффективных сечений [70], составляет основную задачу физики высоких энергий. При больших энергиях при этом происходит не только рассеяние и рождение отдельных частиц, но наблюдается в первую очередь множественное рождение частиц. Множественное рождение обладает своей спецификой, которую пытаются учитывать с помощью статистических и гидродинамических методов [71]. Сказанное в основном относится к соударениям сильно взаимодействующих частиц — адронов (барионов и мезонов), и поэтому особо нужно упомянуть о взаимодействии с веществом мюонов и нейтрино высоких энергий, в частности, тех, которые создаются в земной атмосфере космическими лучами (речь в основном идет о нейтрино от распада μ - и π -мезонов, созданных космическими лучами [72]).

В отличие от проблемы спектра масс и вопроса о фундаментальной длине, исследования взаимодействия частиц при высоких и сверхвысоких энергиях могут показаться вспомогательными и менее определенными с точки зрения формулировки какой-то ясной и заманчивой физической цели. Это, однако, не так, и такое впечатление, если оно действительно создается, обусловлено несовершенством нашего изложения. В качестве некоторого оправдания можно заметить, что все уже затронутые вопросы микрофизики фактически тесно переплетаются и в большой мере не независимы друг от друга. Выделяя особо проблему взаимодействия частиц при высоких энергиях, в первую очередь хочется лишний раз подчеркнуть, что далеко не все в физике высоких энергий сводится к проблемам спектра масс и фундаментальной длины. Так, вопрос об энергетическом ходе различных сечений взаимодействия разных частиц (особенно при сверхвысоких энергиях или, формально, при $E \rightarrow \infty$ и в первую очередь для сильно взаимодействующих частиц) имеет для теории весьма глубокое и в известном отношении независимое значение. Кроме того, очень важно, что изучение взаимодействия частиц при все более и более высоких энергиях необходимо для проверки гипотез о существовании целого ряда частиц [73], из которых особенно видное место, пожалуй, занимают W^\pm - и $Z^0 \equiv W^0$ -векторные мезоны, ответственные за слабое взаимодействие.

§ 14. Нарушение CP -инвариантности. Единая теория слабых и электромагнитных взаимодействий

В 1956 г. было открыто несохранение пространственной четности (P) при слабых взаимодействиях. Это значит, конкретно, что при бета-распаде радиоактивных ядер (в первых опытах использовались ядра ^{60}Co), магнитные моменты которых ориентированы во внешнем магнитном поле, бета-электроны испускаются в разных количествах вдоль поля и в противоположном направлении. Таким образом, процесс распада идет по-разному в правой и левой системах координат, что как раз и отвечает несохранению пространственной четности. Однако все обнаруженные вплоть до 1964 г. распады удовлетворяли принципу комбинированной четности, согласно которому все взаимодействия инвариантны относительно CP -сопряжения, т. е. одновременной пространственной инверсии P и зарядового сопряжения C (замены частицы на античастицу). Несохранение пространственной четности можно понимать и таким образом: частица (скажем, нейтрон) обладает каким-то «внутренним винтом», в силу чего ее бета-распад идет по-разному в направлении вдоль «винта» и в противоположном направлении. Тогда сохранение комбинированной четности означает, что нарезки «винта» у частицы и ее античастицы противоположны в том смысле, что «левый винт» заменяется на «правый».

Обнаружение несохранения P - и C -четностей и сохранения CP -четности явилось одним из крупнейших открытий и еще больше повысило интерес, всегда находившийся на высоком уровне, к слабым взаимодействиям. И нужно сказать, что вскоре слабые взаимодействия опять «оправдали доверие»: в 1964 г. было сделано еще одно открытие, значение которого, видимо, весьма велико, хотя еще далеко не полностью понято. Речь идет об обнаружении распада $K_S^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ ($K_S^0 \equiv K_L$ — долгоживущий нейтральный K -мезон, распадающийся в данном случае на π^+ - и π^- -мезоны), который может идти только при нарушении комбинированной четности [74]. Итак, в природе наблюдается нарушение CP -четности, хотя и нужно отметить, что во всех известных случаях процессы

с нарушением *CP*-инвариантности на три порядка величины менее вероятны, чем процессы, идущие без такого нарушения. Несохранение *CP*-инвариантности приводит, по-видимому, к фундаментальному выводу о неэквивалентности прямого и обратного направлений времени. Дело в том, что из весьма общих соображений, можно сказать из основ существующей теории, вытекает свойство *CPT*-инвариантности всех взаимодействий. Это значит, что взаимодействия (и, конечно, все их проявления) остаются неизменными при проведении (в любом порядке) трех операций: пространственной инверсии (*P*), зарядового сопряжения (т. е. перехода от частицы к античастице — преобразования *C*) и обращения знака времени (замены t на $-t$, или операции *T*). Насколько фундаментальна *CPT*-инвариантность, видно из того, что она гарантирует равенство масс и времен жизни при распадах для частиц и античастиц. Нет никаких указаний на нарушение этих свойств частиц и античастиц.

Если *CPT*-инвариантность имеет место, то из *CP*-неинвариантности следует и *T*-неинвариантность, т. е. неинвариантность относительно изменения знака времени. Между тем как классическая теория (механика, электродинамика и общая теория относительности), так и квантовая механика и квантовая теория поля удовлетворяют требованию обратимости во времени (формально это означает, что уравнения теории инвариантны относительно замены времени t на $-t$; поэтому при соответствующем изменении начальных условий каждый процесс пойдет в обратном направлении по тому же пути, через те же состояния, через которые он шел в прямом направлении)*). Таким образом, в наиболее вероятном, хотя строго и не доказанном случае — при наличии *CPT*-инвариантности — обнаружение несохранения *CP*-инвариантности привело к открытию *T*-неинвариантности для фундаментальных взаимодействий и процессов. Такой вывод можно

*) Наблюдающаяся в макроскопической физике, в химии и в природе необратимость (неэквивалентность) прошлого и будущего (т. е. неинвариантность относительно замены t на $-t$) связана со сложностью макроскопических объектов (речь идет об огромном числе частиц) и обусловленной этой сложностью тенденцией развития движения от более упорядоченного к менее упорядоченным состояниям.

было бы интерпретировать в известном смысле аналогично проведенной выше интерпретации P - и C -неинвариантности. Именно, считая «элементарные» частицы очень сложными образованиями (а так оно в известном смысле и есть; см. выше), можно себе представить, что в частице имеется не только «внутренний винт», но и работают «собственные часы», идущие в определенном направлении.

Изучение CP -несохранения при слабых взаимодействиях продолжается, причем особенно интересен был бы переход в область больших энергий. Возможно, например, что при больших энергиях и отвечающих им (в известном отношении) малых пространственно-временных расстояниях CP -несохранение и T -несохранение уже не «малы» (скажем, сравнимы по своей вероятности с вероятностью слабого взаимодействия).

Сказанное выше в настоящем параграфе повторяет в целом текст издания 1974 г. Тогда мне казалось, что проблема нарушения CP -инвариантности как-то особенно выделена среди других вопросов из области физики слабых взаимодействий. Нужно подчеркнуть, что и сейчас эта проблема остается нерешенной, актуальной и важной (как и в большинстве других случаев, опускаю, как само собой разумеющиеся, слова «как мне кажется» или «насколько могу судить»). Несомненно, однако, что в настоящее время в области слабых взаимодействий внимание приковано в первую очередь к единой теории слабых и электромагнитных взаимодействий.

Еще в тридцатые годы возникло предположение, что слабое взаимодействие переносится промежуточными векторными W^\pm -мезонами, подобно тому как «переносчиком» электромагнитного взаимодействия можно считать фотоны. В этом смысле возможна глубокая аналогия между слабым и электромагнитным взаимодействиями. Но дело упиралось в два очень важных обстоятельства. Масса фотона равна нулю, а сами фотоны нам хорошо известны. Масса же промежуточных W^\pm -мезонов должна быть весьма большой, и они еще не обнаружены (разумеется, последний факт связывают как раз с тем, что W^\pm -мезоны столь массивны, что их нельзя создать на существующих ускорителях). В таких условиях гипотеза промежуточных мезонов занимала примерно такое же место, как и большое число других предположений и

предсказаний, не имеющих под собой солидного фундамента. В 1967 г. возникла, однако, теория, в которой фотоны и W^\pm -мезоны рассматриваются единым образом, причем дается объяснение различию в их массах [75].

После некоторых колебаний я, во избежание профанации, удержался от соблазна попытаться изложить здесь изящные идеи (обобщенная калибровочная инвариантность, спонтанное нарушение симметрии), лежащие в основе единой теории слабых и электромагнитных взаимодействий. Ограничусь в этом отношении ссылками на популярные статьи [75] и также доступную не только теоретикам статью [63], освещающую весьма полезную для понимания сути дела связь калибровочных теорий со сверхпроводимостью. С калибровочными теориями поля (весьма модным сейчас направлением), которые энергично развиваются в применении также к сильным и гравитационным взаимодействиям [76], а не только к слабым и электромагнитным, можно познакомиться по обзорам [77]. Здесь важно подчеркнуть два момента. Во-первых, сильные стороны единой теории слабых и электромагнитных взаимодействий [75] стали ясны лишь через несколько лет после ее создания (речь в первую очередь идет об устранении расходимостей или, как говорят, о перенормируемости теории). Во-вторых, один из существенных элементов этой теории — введение, помимо заряженных W^\pm -мезонов, также промежуточного векторного нейтрального $W^0 \equiv Z^0$ -мезона. Обмен такой нейтральной частицей приводит уже в первом приближении к процессам рассеяния, которые в аналогичном приближении отсутствуют в случае существования только W^\pm -мезонов (так дело обстоит, например, для рассеяния мюонного нейтрино ν_μ на электроны e и при рассеянии как ν_μ , так и «обычного», электронного, нейтрино ν_e на протоне или нейтроне). На теоретическом жаргоне процессы с участием W^0 -мезона называют связанными с нейтральными токами. И вот в 1973 г. и с еще большей определенностью в последующие годы было установлено на опыте, что нейтральные токи действительно существуют [75]. В этом, несомненно, можно видеть торжество теории. Сейчас проверяются или обсуждаются и некоторые другие ее предсказания [78]. Вряд ли, однако, теория может считаться надежно доказанной до

обнаружения самих $W^{\pm,0}$ -мезонов. По некоторым оценкам, масса W^{\pm} -мезона лежит между 58 и 68 ГэВ, а масса W^0 -мезона заключена в пределах 75—85 ГэВ [79]. Массы $W^{\pm,0}$ -мезонов могут оказаться и иными, но нет оснований думать, что они другие даже по порядку величины, и, таким образом, $W^{\pm,0}$ -мезоны можно будет создать уже на ускорителях следующего поколения [80] *).

Помимо $W^{\pm,0}$ -мезонов в калибровочных теориях (особенно в тех, в которых пытаются одновременно рассмотреть слабые, электромагнитные и сильные взаимодействия) вводится еще ряд частиц, в частности скалярных. К сожалению, массы некоторых из них могут оказаться колоссальными (до 10^{17} эВ и больше; см. [79]), так что, быть может, выяснения вопроса о том, существуют или нет такие частицы, придется ждать много десятилетий, если не дольше. Вряд ли этот момент помешает решению судьбы калибровочных теорий в целом, ведь какие-то неисследованные вопросы и области всегда останутся. Более важно подчеркнуть, что калибровочные теории, учитывающие также и сильные взаимодействия, еще далеко не однозначны и, вообще, находятся в стадии становления **). В разных их вариантах, в частности при введении кварков с новыми ароматами, получают и существенные следствия в отношении слабых взаимодействий (касается это и несохранения CP -инвариантности [79, 81]). Развитие калибровочных теорий представляется сегодня магистральным направлением в мик-

*) Для рождения частицы с массой m энергия частиц, получаемых на ускорителе, должна превосходить mc^2 в системе центра масс. Поэтому даже на ускорителе с энергией протонов $E=500$ ГэВ, сталкивающихся с покоящимся протоном, могут рождаться лишь частицы с $mc^2 \leq E_c \approx 15$ ГэВ (см. § 13).

**) Калибровочная теория только сильных взаимодействий (квантовая хромодинамика) продвинута весьма далеко. В ее рамках, вообще говоря, можно понять и описать особенности поведения кварков, ведущих себя на близком расстоянии друг от друга (скажем, в протоне) как почти свободные частицы, но не могущих разлететься на большие расстояния (эти свойства часто называют соответственно асимптотической свободой и удержанием или инфракрасным рабством кварков). Существенным следствием уже созданных теоретических схем является также вывод о влиянии на «элементарные частицы» и на вакуум макроскопических воздействий, в первую очередь очень высокой температуры [63].

рофизике, но наивно было бы думать, что на этом пути не встретятся неожиданности и новые трудности.

Теперь одно частное замечание. До создания единой теории слабых и электромагнитных взаимодействий теория слабых взаимодействий приводила к «бесконечностям» (была неперенормируема) и использовалось «обрезание» различных выражений на верхнем пределе по энергии E или, что эквивалентно, по длине $l = \hbar c/E$. В подобной ситуации имелась, так сказать, питательная среда для предположений о существовании некоторой фундаментальной длины $l_f \sim 10^{-17}$ см. Сейчас основания для введения такой длины отпали. Но значит ли это, что оценка фундаментальной длины окончательно переместилась в область гравитационной длины $l_g = \sqrt{G\hbar/c^3} \sim 10^{-33}$ см (см. § 19)? Думаю, что такое заключение было бы заведомо слишком поспешным (разрыв между оценками $l_f \sim 10^{-17}$ и $l_f \sim l_g \sim 10^{-33}$ составляет ведь 16 порядков!), и поэтому, как бы высоко ни оценивать последние успехи в теории слабых взаимодействий, они никак еще не свидетельствуют против возможности существования фундаментальной длины $l_f \gg l_g \sim 10^{-33}$ см (см. также § 19).

Развитие кварковых моделей, квантовой хромодинамики, единых теорий слабых и электромагнитных (а также сильных и гравитационных) взаимодействий хотя и началось в целом лет двадцать назад, но именно за последние лет пять получило особенно широкий размах, привело к успехам и большим ожиданиям. В общем, в микрофизике после периода какого-то «безвременья» или относительного минимума наступил очередной подъем, царят энтузиазм и вдохновение. Значение уже достигнутого, подлинное место и смысл современного этапа можно будет объективно и по достоинству оценить лишь в будущем. Впрочем, некоторые из тех, кто строит новую микрофизику, имеют, вероятно, реальные основания делать какие-то надежные заключения уже сегодня. Автор этой книжки в области микрофизики в настоящее время не работает и поэтому, безусловно, не вправе считать свое мнение достаточно обоснованным и интересным. Замечу тем не менее, что после просмотра при подготовке нового издания книжки большого числа статей (ряд из них процитирован выше) у меня создалось впечатле-

ние, совершенно отличное от появлявшегося при ознакомлении с многочисленными сенсациями и модными направлениями прошлых лет. Думаю, что имеются достаточные основания полагать, что кварки, глюоны, калибровочные поля и т. д. — это не только очередная мода, «физнадежда» или локальный успех, а нечто, если и не окончательное, то фундаментальное.

§ 15. Нелинейные явления в вакууме в сверхсильных электромагнитных полях

Перечисленные выше микрофизические проблемы отличаются очень большой широтой, каждую из них можно было бы разделить на ряд других, более частных и конкретных. Но мы не стремимся увеличить число проблем, добиться какой-то стройности при классификации и т. п.: все это вступило бы в противоречие с гораздо более скромными целями — окинуть беглым взглядом общую ситуацию в физике. Поэтому скорее в качестве одного из возможных примеров более частной, но весьма значительной проблемы остановимся на процессах в сверхсильных электромагнитных полях.

О своеобразии поведения вещества в сверхсильных магнитных полях речь уже была в § 6. Сильное электрическое поле, в отличие от магнитного, вообще разрушает атом. Так, если напряженность внешнего электрического поля \mathcal{E} одного порядка с напряженностью поля ядра (протона) на расстоянии радиуса атома $a_0 = \hbar^2/me^2 \approx 5 \cdot 10^{-9}$ см, т. е. если

$$\mathcal{E} \sim \frac{e}{a_0^2} \sim \frac{e^5 m^2}{\hbar^4} \sim 10^7 \text{ СГСЭ/см} \approx 3 \cdot 10^9 \text{ В/см}, \quad (15)$$

атом водорода очень быстро разрушается. Фактически такое разрушение (ионизация атома во внешнем электрическом поле) происходит и в более слабых полях, но в поле $\mathcal{E} \ll 10^6 - 10^9$ В/см атом водорода живет достаточно долго. Атом урана будет полностью, и притом быстро, «ободран» — лишен всех электронов — лишь в полях порядка $10^9 Z^3 \sim 10^{15}$ В/см (заряд ядра урана $eZ = 92e$, а радиус K -оболочки для урана $a_0, Z \sim \hbar^2/me^2 Z \sim 10^{-10}$ см, в силу чего поле ядра на этой оболочке порядка eZ^3/a_0^2). В еще более сильных электрических полях не только

электроны в самых тяжелых атомах «не выдерживают» — отрываются от ядер и ускоряются полем, но «не выдерживает» и сам вакуум! Дело в том, что реальный (физический) вакуум — это уже не «пустота»; вакуум поляризуется полем, и последнее может порождать из вакуума пары различных частиц, причем легче всего рождаются самые легкие, т. е. электронно-позитронные, пары. Такие пары интенсивно порождаются в поле \mathcal{E}_0 , работа которого на расстоянии комптоновской длины волны $\hbar/mc \sim 3 \cdot 10^{-11}$ см порядка энергии покоя пары $2mc^2 \sim 10^6$ эВ $\sim 10^{-6}$ эрг. Отсюда $e\mathcal{E}_0\hbar/mc \sim mc^2$, или

$$\mathcal{E}_0 \sim \frac{m^2 c^3}{e\hbar} \sim 10^{14} \text{ СГСЭ/см} \approx 3 \cdot 10^{16} \text{ В/см.} \quad (16)$$

Пары достаточно быстро, хотя и не в катастрофическом темпе, могут рождаться и в более слабых полях. Поэтому достижение полей, скажем, с $\mathcal{E}_0 \sim 10^{14}$ В/см уже позволило бы, вероятно, наблюдать рождение пар в вакууме. В столь сильных, а иногда и в меньших полях проявляется также целый ряд других интересных эффектов. При этом важно подчеркнуть, что частицы с высокой энергией E могут бурно порождать пары в электромагнитном поле, которое в E/mc^2 раз меньше поля (16) (см. [82]; дело в том, что в системе отсчета, связанной с частицей, поле в E/mc^2 раз сильнее, чем в лабораторной системе отсчета).

В настоящее время в фокусе лазерного пучка достигнута поля $\mathcal{E} \sim 10^9 - 10^{10}$ В/см (см. § 7). Повышение мощности лазера и потока электромагнитной энергии в фокусе лазерного пучка на 10 порядков, необходимое для достижения значения $\mathcal{E} \sim 10^{14}$ В/см, составляет столь трудную задачу, что она в реальном плане, видимо, даже не стоит перед физикой сегодняшнего дня. Но для электронов с энергией $E \sim 20$ ГэВ, которая уже достигнута, $E/mc^2 \sim 4 \cdot 10^4$, и рождение фотонов и пар такими электронами в лазерном фокусе с полем $\mathcal{E} \sim 10^9$ В/см будет идти так же, как для покоящегося вначале электрона в поле $\mathcal{E} \approx 4 \cdot 10^{13}$ В/см.

Сверхсильные электрические поля существуют вблизи атомного ядра. Так, на границе ядра урана поле $\mathcal{E} \sim eZ/R^2 \sim 3 \cdot 10^{16}$ СГСЭ/см $\approx 10^{19}$ В/см ($Z=92$, радиус ядра $R \sim 10^{-12}$ см). Однако это поле в случае ядра урана

еще не может порождать пары; поле нужно еще несколько усилить, и, как следует из количественных расчетов [83], пары рождаются для ядер с $Z \geq Z_c \approx 170$. Подобные ядра можно создать лишь на короткое время при соударении двух ядер с $Z_1 + Z_2 > Z_c$. Но и такой процесс интересен, не говоря уже о том, что вопрос о поляризации вакуума и рождении пар для сверхтяжелых ядер более богат содержанием [49, 63, 83, 84]. Наконец, особое значение имеет проблема рождения пар вблизи сингулярностей в космологических решениях, описывающих эволюцию Вселенной (см. § 19).

Вакуум поляризуется не только сильным электрическим полем, но и магнитным полем, причем характерное значение поля $H_0 \sim m^2 c^3 / e \hbar \sim 10^{14}$ Э (т. е. такое же, как для электрического поля \mathcal{E} ; см. (16)). В магнитном поле H , сравнимом с H_0 , и с еще большей резкостью в поле $H > H_0$, вакуум ведет себя подобно нелинейной анизотропной среде и сильно влияет на распространение электромагнитных волн (т. е., на квантовом языке, на движение и все поведение фотонов; см., например, [16, 82] и указанные там источники). Вопрос о влиянии на вакуум сильного магнитного поля перестал быть абстрактным после выяснения того, что вблизи поверхности пульсаров магнитное поле может достигать значений $H \sim 10^{13}$ Э (см. также § 21).

§ 16. О микрофизике вчера, сегодня и завтра

Все течет, все изменяется — меняется не только содержание той области, которая названа микрофизикой, но и занимаемое ею место в науке вообще и в физике в частности. Достаточно просмотреть физические, реферативные и научно-популярные журналы, чтобы убедиться в следующем: удельный вес проблем микрофизики во всех этих журналах в течение последних 20 лет сильно снизился по сравнению с предшествующими несколькими десятилетиями. К сожалению, я не располагаю точными цифрами*), но думаю, что отношение чисел научных

*) В связи с этим еще раз приходится пожалеть о том, как мало внимания у нас уделяется статистическому (да и любому другому) анализу тенденций развития науки, роли разных форм информации и т. д. и т. п. Замечу также, что обсуждаемое изменение

работ по микро- и макрофизике сейчас минимум на порядок величины меньше, чем 20 лет назад. Если воспользоваться другими показателями научной активности (число специализирующихся студентов-выпускников, число конференций и т. д.), то, вероятно, картина будет примерно такой же.

В чем же здесь дело?

Главная причина, как мне кажется, связана с тем, что еще в недавнем прошлом (скажем, для определенности, 30—35 лет назад) микрофизика занимала некоторое совершенно исключительное место в науке, а теперь ситуация изменилась.

Проблематика микрофизики — это самые фундаментальные, принципиальные и поэтому для многих самые привлекательные вопросы физики. С такой точки зрения положение микрофизики не претерпело изменений. Но до середины нашего века проблемы микрофизики имели вместе с тем, по существу, определяющее значение для развития всего естествознания. В самом деле, основное содержание микрофизики составляло тогда изучение атомов, а затем также атомных ядер. Разгадать строение атома, понять действующие в нем законы (для этого пришлось создать квантовую механику!) означало дать мощнейший толчок многим областям физики, астрономии, химии, биологии. Примерно то же можно сказать об атомном ядре — его изучение породило возможность использования ядерной (атомной) энергии и даже дало известные основания называть XX век атомным веком (тот факт, что подобное значение ядерной физики было осознано не сразу, не изменяет сути дела и к тому же уже более 30 лет не играет никакой роли).

Физики, занимавшиеся соответствующими проблемами микрофизики, в подавляющем своем большинстве не думали ни о каких практических плодах своей работы,

удельного веса микрофизики нет никаких оснований связывать с тем обстоятельством, что основную часть атомной и ядерной физики мы отнесли к области макрофизики. Достаточно сказать, что таких разделов микрофизики, как физика высоких энергий, мезонная физика, нейтринная физика и т. п., ранее вообще не существовало. Своеобразное же место микрофизики как физического авангарда при принятом ее определении полностью сохранилось (см. также § 10).

а их энтузиазм и настойчивость питались интересом к проблемам как таковым, были обусловлены неугасимым стремлением узнать, «как же это устроено», преодолеть трудности, добиться истины. Но концентрация усилий в целом, размах работы, поддержка и внимание общества (в частности, научного общественного мнения) — все это в немалой степени диктовалось также сознанием роли микрофизики для развития естествознания в целом и, если угодно, пониманием ее общечеловеческого значения в плане решения важнейших практических проблем.

Сейчас же положение совсем другое. Исследуемые микрофизикой частицы либо живут ничтожные доли секунды, либо, как в случае нейтрино, почти свободно пронизывают земной шар и улавливаются лишь с колоссальным трудом.

Совершенно очевидно, что научную значимость проблемы нельзя измерить ни временем жизни частиц, ни их проникающей способностью. Задачи, стоящие перед микрофизикой сегодня, ни в какой мере не уступают по своей жгучей таинственности и трудности проблемам вчерашнего дня. Иными словами, микрофизика осталась (и при использовании ее определении всегда останется) аванпостом физики, ее самой передовой и «глубокой» частью *). Но положение уже иное в отношении характера и роли изучаемых микрофизикой объектов. Эти объекты (атом, атомное ядро) были хлебом насущным, новые же объекты — экзотические и редкие «растения» (по крайней мере в земных условиях **) . Между тем, как сказано, мик-

*) Нужно заметить, что подобное мнение, которое я сам разделяю, не может все же считаться совершенно бесспорным (см., например, [4]). Дело в том, что многие проблемы, с которыми сталкиваются макрофизика и, скажем, биология, достаточно самостоятельны и глубоки; их исследование не облегчается от убеждения в том, что фундаментальные законы (скажем, нерелятивистская квантовая механика) в данном случае известны. Как сказано, различие между макро- и микрофизикой представляется все же достаточно существенным, чтобы поднять микрофизику, а также, скажем, космологию (см. § 19) на некий пьедестал, но, конечно, не для того, чтобы третировать все остальные естественные науки, как нечто второстепенное или лишенное фундаментальности.

**) Возможны, конечно, некоторые исключения. Например, μ -мезоны живут микросекунды и представляют известный интерес в химии и, быть может, даже для создания термоядерного реактора, использующего так называемый мезонный катализ (конкретно,

рофизика занимала в науке буквально доминирующее положение не в малой степени также и по причине особой практической важности исследуемых ею вопросов.

Итак, согласно защищаемому здесь мнению, место микрофизики и в физике, и во всем естествознании радикально изменилось, и (этот пункт является особенно спорным) я думаю, что такое изменение произошло, быть может, навсегда или, во всяком случае, очень надолго.

Если позволено будет выразить сказанное в ненаучных терминах, я сказал бы, что микрофизика в первой половине нашего века была первой дамой естествознания. Сегодня и завтра она остается и останется «только» самой красивой дамой. Но в том-то и дело, что разные люди могут считать разных дам самыми красивыми, первая же дама (в отличие от первых заместителей) по определению только одна (например, так называют жену президента страны). Позволю себе добавить, что для меня самого микрофизика была и остается самой красивой физической дамой. Но, в отличие от некоторых своих коллег, я лишь считаю, что поклонение не должно сопровождаться игнорированием изменений возраста и характера, а также пренебрежением к другим объектам, заслуживающим восхищения.

Сделанные замечания представляются в достаточной мере тривиальными, но... только тем, кто с ними согласен. На деле же они здесь помещены в первую очередь именно потому, что являются спорными. В последнем мне пришлось убедиться, когда лет 15 назад примерно то же самое было написано по другому поводу [85]. Правда, как обычно бывает, некоторые возражения и критические замечания явились лишь плодом недоразумения или эгоцентризма. Так, в утверждении об изменении и в известном отношении уменьшении роли микрофизики усмотрели если не призыв прекратить строительство мощных ускорителей и вообще всестороннюю поддержку микрофизических исследований, то по край-

μ -мезоны, находящиеся в дейтерии или смеси дейтерия с тритием, облегчают протекание реакций (1)). Кроме того, продолжается, конечно, изучение протона и электрона на более «глубоком» уровне (имеется в виду, например, кварковая модель протона). Такие исследования, однако, мало затрагивают атомную и ядерную физику.

ней мере оправдание таких действий. Нечего и говорить, что автор крайне далек от подобных мыслей *).

Подлинного внимания, однако, заслуживает возражение по существу, которое сводится к следующему. На первом этапе исследований атомного ядра перспективы ядерной энергетики были еще далеко не ясны или даже оценивались совершенно неправильным образом. Таких примеров немало. Вообще, развитие науки в конкретном плане плохо предсказуемо, а иногда и совсем непредсказуемо. Поэтому представляется возможным и, исходя из ряда аналогий, даже довольно вероятным, что микрофизика еще вернет свое положение прародительницы новых гигантских задач вроде овладения ядерной энергией **). Тогда, естественно, удельный вес микрофизики мог бы снова сильно увеличиться.

Само собой разумеется, что никто не возьмется полностью исключить подобную возможность. Уже одного этого обстоятельства — существования пусть самой туманной перспективы новых практически важных открытий — должно оказаться достаточно для того, чтобы продолжать всемерно развивать микрофизику не только в интересах «чистой науки».

Но вместе с тем даже признание возможности нового переворота в отношении практической роли микрофизики в будущем несколько не противоречит сказанному

*) Позволю себе добавить, что вызывают чувство протеста попытки тесно связать (и, если угодно, привязать) обсуждение путей развития науки и научной проблематики с узкими и частными интересами или заботами той или иной области науки в тех или иных местных условиях. Вопросы финансирования, строительства и т. п. зависят от большого числа факторов, среди которых чисто научные интересы иногда имеют второстепенное значение по сравнению, например, с экономическими или техническими соображениями. Тем меньше оснований делать какие-либо практические выводы, касающиеся организации науки, без всестороннего анализа и на базе обсуждения лишь научных вопросов. Ситуация существенно изменилась бы, если бы средства, предоставляемые для развития науки, резко возросли во много раз, например, за счет ликвидации гигантских непроизводительных расходов населения на курение и спиртные напитки. Но нечто такое в настоящее время может произойти лишь в фантастическом романе.

***) В качестве примера можно упомянуть о мечтах использовать кварковый катализ [151], для чего необходимо существование кварков в свободном состоянии.

выше относительно сегодняшнего ее места. Кроме того, непонятно, почему должно считаться ересью или признаком плохого тона предположение (которое я не боюсь высказать), что самый блистательный в каком-то смысле (в плане влияния на развитие общества, техники и т. п.) период в жизни микрофизики, быть может, уже позади.

К сожалению, в вопросе о будущем микрофизики у меня нет почти никаких шансов убедиться в своей правоте, но зато и в неправоте вряд ли придется покаяться — даже оптимисты не склонны ожидать нового радикального изменения роли микрофизики в науке и технике еще при жизни нашего поколения.

Кстати сказать, ее роль и сегодня крайне почетна и не может удовлетворить лишь тех, кто избалован вниманием, привык всегда быть первым, находиться в исключительных условиях. Только в этом отношении положение микрофизики несколько изменилось и ее «потеснила» астрофизика (включая сюда космические исследования) и в особенности биология. Разве не очевидно вместе с тем, что стремительный подъем роли биологии (точнее, ряда ее направлений — молекулярной биологии, биофизики и др.), свидетелями которого мы являемся, тесно связан не только с самими научными достижениями, но и с открывающимися почти фантастическими перспективами решения таких важнейших для человечества проблем, как ликвидация болезней (в частности, рака), радикальное удлинение сроков человеческой жизни, искусственное создание жизни «в пробирке», мобилизация ресурсов мозга и т. д. и т. п.? С другой стороны, астрофизика может служить примером науки, которая захватывающе интересна «сама по себе», независимо от весьма и весьма туманных и проблематичных, в общем, возможностей ее практического использования в будущем. В этом отношении место микрофизики сегодня и завтра во многом аналогично тому, которое занимает астрофизика. И совершенно очевидно, что строить большие ускорители столь же необходимо, как большие телескопы на поверхности Земли и на спутниках.

Некоторые из замечаний, сделанных выше, во многом близки к содержащимся в статье Дайсона [2] (кстати сказать, эта статья и первый вариант настоящей книжки появились почти одновременно и, естественно, совершен-

но независимо друг от друга). Поэтому хочется привести здесь также сформулированные в [2] три правила, которыми следует руководствоваться при преодолении критических ситуаций, возникающих при развитии физики (имеется в виду масштаб института или лаборатории):

Не следует пытаться возродить былую славу.

Не следует заниматься чем-то только потому, что это модно.

Не следует бояться насмешек и презрения теоретиков (don't be afraid of the scorn of theoreticians).

Первые два правила вряд ли нуждаются в комментариях, да к тому же некоторые разъяснения на этот счет имеются в самой статье [2]. Но вот третье правило может быть неверно понято, особенно если не знать, кто его автор.

Известно, что физиков часто делят на экспериментаторов и теоретиков. Экспериментатор, в идеале, сидит около сделанных им приборов и что-то измеряет. Кроме того, он должен заботиться о добывании денег, материалов и приборов для постройки экспериментальных установок, руководить большим иногда штатом техников и лаборантов, обрабатывать результаты наблюдений. И все это иной раз длится долгие годы и служит лишь для уточнения какого-либо параметра или какой-то постоянной, вроде магнитного момента протона, массы частицы-резонанса и т. д. Физик же теоретик, тоже в идеале, сидит себе за рабочим столом в чистой и светлой комнате с видом на сад и пруд или, на худой конец, лежит дома на диване, размышляя «о природе вещей» или производя какие-то вычисления, прерываемые интересными дискуссиями на различные научные и ненаучные темы. Обе схемы, конечно, весьма абстрактны, но позволяют понять, почему абстрактный экспериментатор часто недолюбливает теоретиков, а абстрактные теоретики нередко не очень-то уважают экспериментаторов. В жизни все, разумеется, гораздо сложнее и многообразнее. Даже в XIX веке, не говоря уже о более давних временах, не было еще сколько-нибудь четкого деления на физиков-экспериментаторов и физиков-теоретиков. Конечно, в зависимости от способностей и наклонностей одни больше экспериментировали, а другие больше вычисляли,

но большинству физиков не было чуждо ни то, ни другое. Только усложнение экспериментальной техники, быстрый рост числа физиков, обострение соревнования, увеличение темпов работы и скорости обмена информацией породило четкое «разделение труда», до какой-то степени разделило и обособило теоретиков и экспериментаторов. Наряду с положительными сторонами этого процесса дифференциации, он привел и к отрицательным последствиям. «Физики перестали понимать друг друга» — такое утверждение звучит уже не как абсурд или парадокс, а нередко отражает печальные факты. Да что уж там говорить о физиках вообще, когда спектр одних только людей, называемых физиками-теоретиками, простирается от математиков, заинтересовавшихся решением тех или иных физических проблем, до далеких от высоких материй физиков, которые по тем или иным причинам сами не «работают руками» или оказались не связанными с экспериментом. Естественно, что физики-теоретики, находящиеся на разных полюсах своей специальности, а тем более теоретики и «чистые» экспериментаторы сплошь и рядом не имеют общего языка и не доверяют друг другу.

Так вот, если прочитать третье правило Дайсона, ничего не зная о нем самом, возникает образ некоего экспериментатора, которому изрядно насолили теоретики, поучавшие его, как нужно работать и чем не нужно заниматься, а также дававшие понять, сколь он безграмотен в области «настоящей» физики. На самом же деле Ф. Дайсон — один из самых ярких и известных (и притом заслуженно известных) современных физиков-теоретиков. Его совет не бояться насмешек своих коллег-теоретиков проникнут лишь знанием манер некоторой небольшой их части. Это не измена «своему цеху», а проявление любви к нему. Настоящая теоретическая физика — неразрывная часть всей физики, которая не может даже существовать без экспериментальной физики и не господствует над ней. Физик-теоретик — это не жрец и не пророк, а чаще всего просто счастливчик, не обремененный массой забот, преследующих физика-экспериментатора. Потому-то насмешки и презрение теоретиков не могут не вызывать отрицательной реакции (так же, разумеется, как и встречающиеся аналогичные если не по

форме, то по сути дела проявления неуважения и недоверия к теоретикам со стороны экспериментаторов). Конечно, речь идет лишь об исключениях, но уже они дают право на самооборону, навеянную в данном случае услышанными мной разговорами о том, что «Дайсон — изменник», а «Гинзбург — враг ядерной физики». И все это на основании замечаний, приведенных выше! Не стоило бы, разумеется, обращать на это внимание и тем более предавать гласности, если бы дело было в обиде или в желании ответить критикам. Прошу поверить, что мной руководят совсем другие мотивы — желание, пусть ценой внесения в обсуждение какой-то остроты, побудить читателей спорить, думать, вырабатывать свое мнение и не бояться его высказывать и отстаивать, но только не оставаться безразличными и равнодушными. Впрочем, быть может, уж лучше безразличие и равнодушие, чем другой полюс — нетерпимость и неуважение к неугодным «чужим» мнениям и эгоцентричная защита собственных взглядов и интересов путем поношения оппонентов. Вместе с тем мало что приносит развитию науки большую пользу, чем дискуссии, обсуждения и споры, проходящие в дружеской атмосфере, с подъемом и энтузиазмом. К счастью, так оно чаще всего и бывает.

Настоящий § 16 носит в известной мере полемический характер. Поэтому мне казалось уместным выше ничего, практически, не изменяя по сравнению с предыдущим изданием, но в заключение поставить вопрос: а каково мнение автора сегодня, спустя пять лет? Вопрос этот представляется тем более естественным, что за эти пять лет в области микрофизики достигнуты блестящие успехи (подтверждение кварковой модели в связи с открытием новых, в частности очарованных, частиц; развитие единой теории слабых и электромагнитных взаимодействий). Кроме того, несмотря на все сделанные в тексте заверения (вполне искренние) в любви к микрофизике, все же возникает (пусть и у немногих читателей) какое-то подозрение в недооценке мною микрофизики. Хочу в этой связи, во-первых, просить читателей еще раз прочесть текст и, во-вторых, лишний раз подчеркнуть следующее.

Новые блестящие успехи в области микрофизики несколько не изменили моего мнения, изложенного выше. Да и не могли его изменить, поскольку это мнение ка-

сается не самой современной микрофизики, а ее оставшихся без всяких изменений связей с остальной физикой и другими дисциплинами. Быть может, стоит лишь повторить, что место микрофизики в настоящее время я считаю аналогичным месту астрофизики. И какое же это превосходное «место»!

Должен добавить, что полезность того или иного научного направления для промышленности, сельского хозяйства, связи, медицины и т. п., разумеется, является важным положительным моментом. Вместе с тем представляются несправедливыми и неоправданными требования, чтобы наука обязательно была полезна в непосредственном, «сиюминутном» смысле этого понятия. Во-первых, в огромном числе случаев полезность науки не сразу видна и может выявиться лишь через много лет. Во-вторых, занятия наукой для многих являются глубокой потребностью и делом жизни, подобно тому как для других такими потребностью или призванием являются занятия музыкой, живописью или поэзией. Почему же от ученых нужно требовать в обязательном порядке пользы и полезности в большей мере, чем от музыкантов? Конечно, затрата средств уже сильно зависит от близости практического «выхода». Но это совсем другой вопрос. В общем, хотелось бы подчеркнуть, что утверждение о меньшей роли современных микрофизики и астрофизики для общества (по сравнению, скажем, с макрофизикой или биологией) ни в какой мере не должно считаться каким-то упреком.

III. АСТРОФИЗИКА

§ 17. Экспериментальная проверка общей теории относительности

Общая теория относительности (ОТО) была в законченном виде сформулирована Эйнштейном в 1915 г. К этому же времени им уже были указаны также три знаменитых («критических») эффекта, могущих служить для проверки теории: гравитационное смещение спектральных линий, отклонение световых лучей в поле Солнца и смещение перигелия Меркурия. С тех пор прошло больше полустолетия, но проблема экспериментальной проверки ОТО остается животрепещущей и продолжает находиться в центре внимания.

С чем это связано?

Все указанные Эйнштейном эффекты существуют и наблюдаются, но достигнутая точность еще невелика [86, 87]. Так, в случае гравитационного смещения частоты погрешность измерений составляет примерно 1% и к тому же сам эффект нечувствителен к виду теории гравитации *). Отклонение световых лучей в поле Солнца (оно, согласно ОТО, достигает 1,75 угловой секунды при прохождении луча непосредственно вблизи диска Солнца) наблюдают уже 60 лет. К сожалению, соответствующие измерения даже при современной технике производятся только во время солнечных затмений. Так или иначе, но эффект хотя и обнаружен и находится в согласии с ОТО, измерен с погрешностью около 10%. Столь низкая точность до последнего времени служила оправданием для рассмотрения неэйнштейновских теорий тяготения (т. е. теорий гравитационного поля, от-

*) Недавно точность совпадения теории с наблюдениями гравитационного смещения частоты удалось повысить на два порядка [152], но в принципиальном отношении этот успех ничего не изменяет [87].

личных от ОТО). Однако для проверки можно с равным правом использовать не свет, а радиоволны. Отклонение вблизи Солнца радиоволн, идущих к нам от квазаров, удалось измерить, причем ОТО проверена уже с точностью примерно до 1%. Такая же точность достигнута при радиолокационных измерениях релятивистского эффекта запаздывания сигналов, отражающихся от Венеры и Меркурия и проходящих вблизи Солнца. Этот эффект запаздывания, эквивалентный по своей физической природе отклонению лучей в поле Солнца, достигает $2 \cdot 10^{-4}$ с (таково релятивистское запаздывание, когда сигнал проходит вблизи края Солнца, для чего, разумеется, лоцируемая с Земли планета должна находиться в верхнем соединении). Смещение перигелия Меркурия известно с погрешностью около 1%, и согласие теории с наблюдениями этого эффекта многие годы рассматривалось в качестве самого лучшего подтверждения ОТО (не говоря о точных данных о равенстве тяжелой и инертной масс, которое доказано с погрешностью до 10^{-12}). Но лет 15 назад было, однако, высказано предположение, что это согласие только кажущееся, так как не учитывается действие квадрупольного момента Солнца. Такое возражение, представляющееся на первый взгляд весьма искусственным, нашло известное подтверждение в результате наблюдений, которые интерпретировались как указывающие на сплюснутость Солнца. Сейчас, однако, сплюснутость Солнца опять считается столь незначительной, что связанный с ней квадрупольный момент не может заметно влиять на движение Меркурия.

Итак, сейчас можно лишь утверждать, что даже для слабых полей, т. е. в случае малости параметра $|\varphi|/c^2$ (на поверхности Солнца $|\varphi|/c^2 = GM_{\odot}/r_{\odot}c^2 = 2,12 \cdot 10^{-6}$), ОТО проверена лишь с погрешностью до процента. В современной физике такая точность не впечатляет, и еще имеются если не основания, то по крайней мере возможности обсуждать отличные от ОТО теории гравитации.

Отставание в области экспериментальной проверки ОТО обусловлено как малостью эффектов, доступных наблюдению на Земле и в пределах Солнечной системы, так и сравнительной неточностью соответствующих астрономических методов. Сейчас, однако, положение измени-

лось в результате применения межпланетных ракет («проб»), радиометодов и т. д. Поэтому перспективы проверки ОТО с погрешностью порядка 0,1—0,01% представляются сейчас весьма хорошими [86].

Если будет показано (горячо на это надеюсь), что с экспериментальной проверкой ОТО в поле Солнца «все в порядке», то вопрос о такой проверке перейдет совсем в другую плоскость. Именно, останется вопрос о справедливости ОТО в сильных полях или вблизи и внутри сверхмассивных космических тел, не говоря уже о применимости ОТО в космологии.

Две последние фразы были написаны 5 лет назад и фигурировали в предыдущем издании книжки. Тогда и вопрос о сплюснутости Солнца оставался еще неясным и эффект отклонения лучей и запаздывания сигналов в поле Солнца был измерен с погрешностью в несколько процентов. Сейчас, когда все три эффекта, предсказанные ОТО для слабого поля, в пределах достигнутой точности в 1% сходятся с теорией, именно проверка ОТО в сильном поле уже вышла на первый план. Свою точку зрения на этот счет автор довольно подробно изложил в статье [87a] (она помещена также в сборнике [876]); речь о проверке ОТО в сильных полях еще пойдет ниже (см. §§ 19—21 и 24).

Но значит ли это, что дальнейшая проверка ОТО в слабом поле уже излишня? Вряд ли можно занять такую позицию, ибо не следует забывать, что обнаружение (разумеется, вполне надежное и доказанное) в пределах Солнечной системы и вообще в слабом поле даже малейших отклонений от предсказаний ОТО было бы открытием исключительной важности. Вероятность подобного результата большинству физиков (в том числе и автору) кажется ничтожно малой. Но что такое вероятность в подобных случаях? К тому же, если такое понятие вероятности открытия все же ввести, то следовало бы пользоваться также понятием «математического ожидания» открытия, равного произведению вероятности на значимость открытия. В таком случае математическое ожидание для обнаружения отклонений от ОТО оказалось бы значительным даже при ничтожной вероятности их обнаружения. Но подобные рассуждения — это, как говорится, филология или сотрясение воздуха.

Совершенно очевидно, что продвинуться вперед в вопросе о проверке ОТО можно только путем новых наблюдений и измерений. Мы ждем их с нетерпением (особенно это касается обнаружения «черных дыр»; см. § 21 и [87]).

§ 18. Гравитационные волны

В рамках любой релятивистской теории гравитационного поля должны существовать гравитационные волны в вакууме, аналогичные электромагнитным волнам. Такая аналогия в ОТО идет еще дальше, поскольку в этой теории гравитационного поля волны являются чисто поперечными. Представление о гравитационных волнах в вакууме родилось вместе с ОТО, а известная и широко используемая формула для мощности гравитационного излучения массами, движущимися медленно по сравнению со скоростью света (см. формулу (110,16) в [88]), была получена Эйнштейном еще в 1918 г. [89].

Гравитационные волны должны испускаться любыми массами с отличным от нуля и переменным во времени квадрупольным моментом масс (для быстро движущихся тел играют роль и более высокие мультипольные моменты). Простейшие космические объекты такого типа — двойные звезды или планетные системы.

Гравитационное взаимодействие является, однако, самым слабым из всех известных. Что же касается всем нам знакомых макроскопических (а можно сказать, и повседневных) проявлений гравитации, то они столь значительны просто в результате существования огромных скоплений масс и, например, большой массы Земли (в случае же двух протонов их гравитационное притяжение в $e^2/GM^2 \sim 10^{36}$ раз меньше электростатического отталкивания, где $G = 6,67 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/(\text{г} \cdot \text{с}^2)$ — гравитационная постоянная, $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$ СГСЭ — заряд протона и $M = 1,67 \cdot 10^{-24}$ г — его масса). Поэтому не слишком удивителен тот факт, что мощность гравитационного излучения обычно (скажем, в случае двойных звезд) сравнительно мала, а его детектирование весьма непросто. Так или иначе, с какой-либо уверенностью гравитационные волны еще не обнаружены и перспективы приема гравитационных волн от двойных звезд и пульсаров представляются весьма отдаленными. Достаточно сказать, что если бы

пульсар PSR 0531 в Крабовидной туманности даже излучал гравитационные волны с мощностью $L_g \sim 10^{38}$ эрг/с *), то плотность потока гравитационного излучения на Земле составила бы только $F_g \sim 3 \cdot 10^{-7}$ эрг/(см²·с). Между тем чувствительность существующих приемников гравитационных волн отвечает плотности потока порядка или больше $F_g \sim 10^4 - 10^6$ эрг/(см²·с) [86, 90, 91], т. е. по крайней мере на 11 порядков меньше, чем нужно в приведенном примере. Прием излучения от пульсаров даже с потоком $F_g \sim 3 \cdot 10^{-7}$ эрг/(см²·с) известными сейчас способами потребовал бы охлаждения приемника весом в несколько тонн до температуры $10^{-2} - 10^{-3}$ К (правда, если вместо материала типа алюминия использовать такое вещество, как сапфир, с очень малым внутренним трением, то можно уменьшить массу приемника на несколько порядков). Это возможно, но, конечно, крайне трудно.

К счастью, помимо периодического гравитационного излучения от двойных звезд и пульсаров, можно ожидать появления довольно мощных всплесков гравитационного излучения (с длительностью $\tau \sim 10^{-4} - 10^{-3}$ с), появляющегося при коллапсе звезд (скажем, с образованием нейтронной звезды или «черной дыры», т. е. при некоторых вспышках сверхновых), а также при соударениях нейтронных звезд или «черных дыр» [86, 90, 91]. Выделяющаяся при таких событиях энергия W_g (в виде гравитационного излучения), вообще говоря, не превосходит 10^{55} эрг $\sim 10 M_\odot c^2$. Но в нашей Галактике сверхновые вспыхивают в среднем не чаще, чем раз в 10—30 лет. Поэтому естественно рассчитывать на прием излучения и от других галактик. Если, для примера, выбрать сферу с радиусом $R \sim 3$ Мпк $\sim 10^{25}$ см, в которой находится примерно 300 галактик, то импульсы гравитационного излучения с интегральным по времени потоком, достигающим $\bar{F}_g \sim$

*) Такова светимость Крабовидной туманности во всех областях электромагнитного спектра, вместе взятых. По моему мнению, нет никаких оснований ожидать, что мощность гравитационного излучения пульсаров достигает подобного значения; вероятно, она на несколько порядков меньше. Исключение, видимо, могли бы составлять рентгеновские пульсары и «коллапсары» (см. §§ 20, 21), входящие в состав тесных двойных систем. В силу последнего обстоятельства квадрупольный момент быстро вращающейся компактной звезды мог бы быть аномально велик.

$\sim W_g/4\pi R^2 \sim 10^4$ эрг/см², будут приходить несколько раз в год (для окружающих нас галактик в среднем сверхновые вряд ли вспыхивают чаще, чем 1 раз в 100 лет). Более реалистична оценка $\tilde{F}_g \sim 1$ эрг/см², отвечающая энергии $W_g \sim 10^{52}$ эрг и расстоянию $R \sim 3-5 \cdot 10^{25}$ см.

Детектировать такие всплески (импульсы) гравитационных волн очень трудно, но все же эта задача выполнима. Здесь предложены разные методы, в частности, связанные с использованием спутников, лазеров, сверхпроводящих магнитометров и вообще самого современного арсенала экспериментальной физики [86а, 91]. Сколько придется ждать до обнаружения космического гравитационного излучения, сказать трудно, тем более что оценка возможных потоков лежит, как мы видели, в широких пределах. Работа в этом направлении ведется довольно энергично в ряде лабораторий и, как можно думать, в течение следующего десятилетия (в 80-е годы) гравитационно-волновая астрономия станет реальностью.

Достоин, вероятно, упоминания то обстоятельство, что об открытии космического гравитационного излучения было объявлено еще 10 лет назад [92]. Конкретно, утверждалось, что массивные алюминиевые болванки (цилиндры) с массой 1,5 т, разнесенные друг от друга на 1000 км, начинают вибрировать с собственной частотой $\nu \sim 10^3$ Гц под влиянием гравитационного излучения, приходящего из направления на центр Галактики. Об этих экспериментах сообщалось в предыдущем издании настоящей книжки, причем выражались сомнения в достоверности результатов. Сейчас уже окончательно ясно, что гравитационное излучение с мощностью, отвечающей наблюдениям [92], к нам из космоса не приходит. Но я решил напомнить об этой неудаче отнюдь не с целью бросить еще один камень в автора неверной работы или похвастаться своей критичностью. Критиковать, в общем, сравнительно легко («ломать — не строить»). Что же касается авторов ошибок (если можно так выразиться), то они и так обычно огорчены больше всех и, вообще говоря, нет оснований их без конца осуждать. Напротив, я упомянул о неудавшейся попытке зафиксировать гравитационное излучение [92] для того, чтобы подчеркнуть стимулирующее значение этих экспериментов. Они выз-

вали большой интерес, породили активность, и, так сказать, «на их костях» вопрос о приеме гравитационных волн вышел на авансцену физики и астрономии. Это замечание, как и аналогичное, сделанное в конце § 9, направлено, конечно, не против критичности и требовательности, безусловно необходимых в науке. Но другая крайность, не так уж редко встречающаяся и проявляющаяся в огульном и априорном отрицании всех непонятных и недостаточно проверенных утверждений, может принести не меньший вред, чем излишний либерализм. В общем, как почти всегда, правильное отношение лежит где-то посередине, недаром же говорят о «золотой середине».

Детектирование гравитационных волн иногда связывают с проверкой ОТО. В каком-то смысле это верно, особенно если иметь в виду, что в неэйнштейновских теориях гравитационного поля появляются (на бумаге, конечно) не только поперечные, но и продольные гравитационные волны и, вообще, картина отлична от предсказываемой ОТО*). Я совершенно убежден, однако, в том, что главное в вопросе о приеме гравитационных волн другое — они образуют, можно сказать, новый канал, по которому может (и будет!) поступать к нам важная информация о космосе. Поэтому раньше или позже, но рождение гравитационно-волновой астрономии неизбежно. Чем раньше — тем лучше!

§ 19. Космологическая проблема. О сингулярностях в общей теории относительности и космологии

Задача космологии — изучение пространства и времени «в большом», в больших масштабах, за длительное время. Тем самым космология неразрывно связана со всей внегалактической астрономией и охватывает весьма широкую область исследований. Но «вопросом вопросов» в космологии является выяснение самого характера эволюции Вселенной во времени, выбор отвечающей действительности космологической модели (здесь мы предполагаем, что основные понятия и вехи на пути развития

*) В 1979 г. появилось сообщение [153], что изменение орбиты для двойного радиопульсара PSR 1913+16 находится в соответствии с предположением об излучении этой системой гравитационных волн в согласии с ОТО.

современной космологии известны читателям, — на это дает какое-то право, в частности, возможность отослать их к популярной статье в сборнике [87б], а также к множеству других источников [88, 93]).

В однородных и изотропных космологических моделях (они впервые были рассмотрены Фридманом в 1922 и 1924 гг., а затем исследовались Леметром и многими другими *)). Вселенная, в согласии с данными наблюдений, представляет собой расширяющуюся систему. Любопытно, что лишь в 1934 г. Милн и Маккри поняли природу такой нестационарности, носящей классический характер, т. е. при известном подходе вытекающей уже из ньютоновской теории тяготения (дело сводится просто к тому, что при наличии только сил тяготения, отвечающих притяжению, система тел не может оставаться в покое и, если нет вращения, будет сжиматься или расширяться в зависимости от начальных условий).

Независимо от природы расширения совершенно ясно, что в прошлом оно не могло продолжаться вечно. И действительно, во всех однородных и изотропных моделях расширение либо когда-то возникло после фазы сжатия, либо началось в некоторый момент $t=0$, когда плотность вещества ρ была бесконечна (сингулярность). При этом, если космологическая постоянная $\Lambda=0$, то все решения принадлежат к последнему классу — обладают сингулярностью (те же решения с $\Lambda \neq 0$, которые не имеют сингулярности, не находятся в согласии с данными наблюдений).

Появление сингулярности ($\rho \rightarrow \infty$) логически, по-видимому, допустимо, но, по мнению очень многих (в том

*) Точнее, первая релятивистская космологическая модель, и при этом модель изотропная и однородная, была предложена Эйнштейном в 1917 г. (см. [94]). Однако его модель была статической. Она отвечает одному решению из двухпараметрического семейства во всех других случаях нестационарных решений, найденных Фридманом. При этом Фридман не считал нулем введенную Эйнштейном космологическую постоянную Λ . При $\Lambda=0$ нестационарны все однородные и изотропные модели. Заметим, что локальные однородность и изотропность пространства (и соответствующей модели) совместимы с различными в топологическом отношении глобальными моделями. Можно думать, что кроме фридмановских моделей существует очень большое число практически еще не исследованных космологических моделей, совместимых с имеющимися данными наблюдений.

числе и по моему мнению), указывает на какое-то неблагоприятное, неприменимость или ограниченность теории и т. п. Одно время была надежда на то, что сингулярность во фридмановских моделях появляется в силу их высокой симметрии, но такая сингулярность исчезнет в неоднородных и анизотропных космологических моделях, подобно тому как фокус высокосимметричной линзы размывается при ее деформации. В последние годы выяснилось, однако, что это не так [88, 98]: весьма общие решения ОТО, отвечающие космологическим моделям и являющиеся анизотропными и неоднородными, также имеют сингулярную точку (приближение к этой точке, вообще говоря, носит весьма своеобразный осциллирующий характер).

Итак, в рамках ОТО освободиться от сингулярностей в задачах о космологическом расширении (или о гравитационном коллапсе, см. следующий параграф), видимо, не представляется возможным*). Но это еще отнюдь не является решающим свидетельством в пользу существования истинных сингулярностей с $\rho \rightarrow \infty$. Дело в том, что ОТО представляет собой классическую теорию. Между тем не приходится сомневаться в том, что истинная (полная и последовательная) теория гравитационного поля должна быть квантовой. Обычно эти квантовые эффекты в астрофизике крайне малы, как и для большинства макроскопических задач, но именно вблизи сингулярности квантовые эффекты сильно возрастают. Допустим, например, что существует фундаментальная длина l_f (см. выше § 12). Тогда представляется почти несомненным, что классическая ОТО перестает «работать» для масштабов порядка или меньше l_f и, вероятно, для плотностей**) $\rho \geq \rho_f \sim \hbar / cl_f^4$. При $l_f \sim 10^{-17}$ см плотность $\rho_f \sim 10^{30}$ г/см³. Можно думать, что в этом случае плотности $\rho \geq \rho_f$ недостижимы и сингулярность, как и все расходимости, исчезает. Если же никакой фундаментальной длины l_f , не связанной с гравитацией, не существует, то все равно на сцену выступит некоторая гравитационная длина

*) Сказанное требует оговорки в применении к системе с не равным нулю полным электрическим или мезонным зарядом (речь идет о полях векторных мезонов; см. [95]).

**) Из квантовой постоянной \hbar с размерностью г·см²/с, скорости света c (см/с) и длины l_f (см) можно составить только одну указанную величину ρ_f с размерностью г/см³.

l_g (возможно, что она и играет роль фундаментальной длины l_f). В самом деле, из гравитационной постоянной G с размерностью $\text{см}^3/(\text{г} \cdot \text{с}^2)$, скорости света c и квантовой постоянной \hbar можно образовать длину

$$l_g \sim \sqrt{G\hbar/c^3} \approx 1,6 \cdot 10^{-33} \text{ см.} \quad (17)$$

Этой длине отвечают время $t_g \sim l_g/c \approx 0,5 \cdot 10^{-43}$ с и плотность

$$\rho_g \sim \frac{c^5}{\hbar G^2} \sim \frac{\hbar}{c l_g^4} \approx 5 \cdot 10^{93} \text{ г/см}^3. \quad (18)$$

Различные соображения и оценки [93б, 96—98] свидетельствуют о том, что с учетом квантовых эффектов даже в отсутствие какой-то фундаментальной длины $l_f > l_g$ плотность ρ по порядку величины не может превосходить $\rho_g \sim 10^{94}$ г/см³. При этом, помимо роста различных флуктуаций, вблизи сингулярности должно, вообще говоря, происходить бурное рождение пар различных частиц. Отсюда следует, что классические сингулярные решения ОТО нельзя экстраполировать в область плотностей, больших ρ_g , и, вообще, к самой сингулярности. Правда, последовательная квантовая теория гравитации, не говоря уже о квантовой космологии, еще не создана. Поэтому еще нельзя с полной уверенностью указать предел классического описания. Но это не меняет вывода о необходимости развивать квантовую космологию. Решение этой задачи, по-видимому, исключительно трудное дело, но вместе с тем необходимое и глубоко принципиальное. В последние годы к этой проблеме и к тесно связанным с ней вопросам о квантовых эффектах для мини-«черных дыр» (см. § 21) привлечено пристальное внимание и на эту тему появляется очень большое число работ (см. [93б, 96—98] и литературу, цитированную в § 21).

Выше мы опирались на ОТО, но делалось и делается немало попыток решать космологические вопросы вне рамок ОТО или, точнее, выходя за ее пределы [99]. Нужно упомянуть также идею о симметричной по зарядам Вселенной [100], которая может не противоречить ОТО, но развивалась на другой базе. Все эти «неортодоксальные» подходы не привели к какому-либо успеху,

но в настоящее время вряд ли могут отвергаться без детального анализа.

Космологическая проблема и связанный с ней вопрос о сингулярностях в ОТО занимают в астрономии (по своему характеру и типу задач) примерно такое же место, как микрофизика в физике. К тому же здесь, по-видимому, проблемы микромира смыкаются с проблематикой астрофизики и космологии (мы уже не говорим о гипотезе фридмонов [36, 95]). По всей вероятности, для понимания подобных вопросов нужны новые идеи, это — область исканий, ошибок и новых попыток найти правильный путь.

§ 20. Нужна ли «новая физика» в астрономии? Квазары и ядра галактик. Образование галактик

Можно ли ожидать отступлений от классических решений ОТО где-либо или когда-либо в космосе, помимо ранних (в смысле близости к классической сингулярности) фаз эволюции Вселенной? Подобный вопрос можно сформулировать шире, если вместо отступления от ОТО речь пойдет о еще более общей возможности отхода в астрономии от уже известных физических законов.

В каком-то смысле это, видимо, извечный и довольно многих астрономов волнующий вопрос: сводится ли астрономия к «земной» физике, к физике, действующей в наших лабораториях? Аналогичный вопрос многие годы обсуждается в применении к биологии: сводится ли все биологическое к физике, к молекулярным представлениям, или нет *)? Дать на подобные вопросы априорный ответ, конечно, нельзя. Подход, который представляется самым естественным (он и фактически наиболее распространен), можно сформулировать так: давайте применять известную физику без ограничений; если же на этом пути встретятся действительно непреодолимые трудности, то мы будем готовы проанализировать новые представления, пойти на какую-то ломку или обобщение физических теорий. Вероятно, с такой формулировкой согласятся почти все, но это еще далеко не означает единст-

*) Эволюция взглядов в этом вопросе заключается, в общем, во все большем, а часто и неограниченном расширении «радиуса действия» физики в биологии. Поучительно изменение взглядов Бора на этот счет (см. [85] и указанные там ссылки).

ва взглядов, ибо все дело в том, когда же считать трудности непреодолимыми!

Физики, занимающиеся астрономией, в этом отношении обычно значительно более консервативны (как я убежден, в «хорошем» смысле этого слова, а именно в смысле «здорового консерватизма» или фундаментальности взглядов), чем «чистые» астрономы. Складывается впечатление, что у некоторых астрономов имеется буквально какая-то внутренняя потребность освободиться от физических пут, выйти на простор никакими известными физическими законами не ограниченных исканий. Приведем, например, такое замечание Джинса [101]: «Каждая неудача при попытках понять происхождение спиральных ветвей делает все более и более трудным противостоять подозрению, что в спиральных туманностях действуют совершенно неизвестные нам силы, быть может, отражающие новые и неожиданные метрические свойства пространства. Предположение, которое настоятельно возникает, состоит в том, что центры туманностей имеют характер «сингулярных точек». В этих точках материя втекает в наш мир из какого-то иного и совершенно постороннего пространства. Тем самым, обитателю нашего мира сингулярные точки представляются местами, где непрерывно рождается материя».

На эти взгляды Джинса сейчас иногда ссылаются чуть ли не как на пророчество. Но ведь опубликованы они были в 1928 г., когда о строении галактик было не так уж много известно, а теория их эволюции практически совсем еще не была развита (к тому же сейчас вопрос о происхождении спиральных ветвей считается в значительной мере выясненным).

В настоящее время мы знаем о галактиках несравненно больше; в частности, установлен факт существования у них некоторого ядра, играющего важную роль и иногда активного [102]. Но следуют ли отсюда также гораздо более радикальные предположения Джинса [101] и Амбарцумяна [103а] о роли ядер как источников вещества (см. также [103в]) или о том, что эти ядра «представляют собой новую форму существования материи, возможно, вовсе не известную современной физике» [103б]?

По мнению большинства астрофизиков, это не так, и далеко еще не исключена (и, напротив, вполне правдо-

подобна) возможность объяснить все наблюдаемые в галактиках и их ядрах, а также в квазарах [102] явления, не прибегая к существенно новым физическим представлениям. Галактические ядра и квазары вполне могут представлять собой или содержать в своей центральной части сверхмассивные плазменные тела ($M \sim 10^9 M_{\odot}$, $r \sim 10^{17}$ см) с быстрыми внутренними движениями вращательного типа и магнитными полями [104]. Другая возможность, не выходящая за пределы ОТО, состоит в том, что в центре галактических ядер и квазаров находятся массивные «черные дыры» [104].

Примерно то же можно сказать и о проблеме «недостающих масс» (missing mass) в скоплениях галактик. Такие скопления должны быть устойчивы только в том случае, если их полная энергия, равная сумме кинетической энергии и потенциальной энергии гравитационного взаимодействия, отрицательна (энергия гравитационного взаимодействия отрицательна, поскольку принимается, что она стремится к нулю при достаточном удалении масс друг от друга). Между тем наблюдаются явно устойчивые, стабильные скопления, а их полная энергия, если учитывать только известные массы (т. е. в основном массы звезд, входящих в галактики), оказывается положительной [105]. Положение изменилось бы, если удалось бы найти в скоплениях какие-то еще не обнаруженные массы, вносящие достаточно большой вклад в гравитационное взаимодействие и тем самым стабилизирующие скопления. Самые вероятные кандидаты на роль «недостающей массы» — находящиеся в скоплениях звезды с малой светимостью и межгалактический газ [105]. Другая возможность — сколлапсировавшие массы (см. § 21; упомянем и о гипотезе, правда, весьма маловероятной [106], согласно которой скопления могут стабилизироваться за счет захвата ими нейтрино, если масса покоя этих частиц не равна нулю, хотя и очень мала). Однако обнаружение в скоплениях звезд с малой светимостью и межгалактического газа, а также сколлапсировавших масс весьма затруднительно, и здесь еще не получены достаточно определенные результаты. Поэтому-то большинство астрономов и физиков считают, что «недостающие массы» еще будут обнаружены и, таким образом, все «станет на свои места». Но пока это не доказано,

остается какой-то простор для различных гипотез, в частности для предположения о нарушении в масштабах скоплений известных законов физики (речь идет о законах классической механики и ньютоновском законе всемирного тяготения, поскольку эффекты ОТО для скоплений весьма малы). Если где-то в скоплениях (например, в ядрах входящих в их состав галактик) рождается новое вещество, то для объяснения наблюдений также нет необходимости в обнаружении невидимых сейчас масс — в этом случае стабильность скоплений могла бы быть лишь кажущейся (новые галактики все время появляются — рождаются, а другие галактики уходят из скоплений). Как сказано, вопрос остается открытым, просто отмахнуться от возникших трудностей никак нельзя, но и очень трудно поверить в то, что «недостаток» массы в скоплениях свидетельствует о необходимости изменять глубокие законы физики.

Вместе с тем сделанные выше ссылки на «большинство» невольно заставляет вспомнить Галилея, подчеркивавшего, что в вопросах науки мнение одного бывает дороже мнения тысячи. Поэтому здесь совсем не предлагается использовать пресловутое «большинство» в качестве аргумента в пользу неограниченного применения известных нам физических законов; речь идет только о констатации сложившейся ситуации. Последняя (если она правильно отражена) сводится к тому, что даже «астрономическое общественное мнение», не говоря уже о «физическом общественном мнении», еще ни в какой мере не согласилось с убедительностью доводов в пользу необходимости вводить существенно новые физические представления для понимания процессов в ядрах галактик, в квазарах и скоплениях галактик.

Сказанное выше в настоящем параграфе практически повторяет текст предыдущего издания. Сейчас, через пять лет, положение изменилось в том смысле, что голоса «радикалов», стремящихся вводить новые физические представления в связи с проблемой квазаров, галактических ядер и скоплений галактик, насколько я могу судить, уже совсем не слышны. Это связано, разумеется, с лучшим пониманием природы квазаров, галактических ядер и динамики скоплений. Как и в ряде других случаев, я не стал тем не менее переделывать

текст, поскольку при таком подходе читатель может в какой-то мере почувствовать также тенденцию в развитии астрономии за последние годы.

Затронутый вопрос о возможности обнаружения новых фундаментальных законов физики на астрономическом материале имеет и некоторые другие аспекты. Здесь, помимо сказанного выше, подчеркнем лишь следующее. Необходимость введения новых физических представлений сама по себе не вызывает сомнений. Это заведомо необходимо в области микрофизики и весьма вероятно в отношении космологической проблемы и, вообще, при приближении к сингулярностям (речь идет о сингулярностях, появляющихся в решениях классической ОТО — неквантованной теории гравитационного поля). Но никак нельзя утверждать, что новые фундаментальные представления и законы физики обязательно должны быть введены или выявлены в тех областях или для тех объектов, где условия (плотность, температура и т. д.) не находятся за пределами уже известного в физике. С другой стороны, и в подобных условиях, но в применении к таким системам, как ядра галактик, квазары и скопления галактик, нельзя исключить возможности выявления каких-то принципиальных моментов, связанных, например, с присутствием огромных масс и космических расстояний, с ролью очень маловероятных процессов и т. д. и т. п. Другими словами, центр тяжести проблемы следует перенести на конкретную почву.

Разумеется, такое заключение достаточно тривиально. Оно имеет своей целью, однако, подчеркнуть необоснованность встречающихся иногда взглядов, согласно которым из относительности и неполноты наших знаний вытекает необходимость введения новых представлений и законов даже при отсутствии указаний на неприменимость уже известной физики (подробнее см. [107]).

Итак, как мне представляется, наиболее вероятно, что для объяснения процессов в ядрах галактик, в квазарах и в скоплениях галактик никакая «новая физика» не нужна. Но все же именно галактические ядра, квазары и скопления галактик находятся «под подозрением», как раз для них ищут отклонения от ОТО, от закона сохранения барионного заряда и т. п. Как по этой при-

чине, так и вследствие исключительно важной роли, которую играют во всей астрономии (и космологии) ядра галактик, квазары и скопления галактик, их изучение составляет проблему выдающегося значения. Речь идет при этом не только о понимании строения и динамики указанных объектов, но и об их происхождении. Впрочем, вопрос о происхождении галактик и скоплений галактик возник задолго до открытия галактических ядер и квазаров. Известная независимость подобного вопроса ясна уже и из того, что далеко не все галактики имеют сколько-нибудь выраженное ядро. Причины образования галактик и их скоплений на фоне общего расширения Вселенной остаются неясными, спорными [102а, б; 105б]. Выяснение и исследование этих причин — одна из важнейших задач астрономии.

§ 21. Нейтронные звезды и пульсары. Физика «черных дыр»

Гипотеза о существовании нейтронных звезд была, насколько удалось установить, высказана [108] в 1934 г. и затем широко обсуждалась многие годы (см. [109] и указанную там литературу), но лишь в теоретическом аспекте. Попытки обнаружить нейтронные звезды сначала казались почти безнадежными*), потом появились надежды заметить такие звезды, пока они горячи ($T \sim 10^6 - 10^7$ К), по их рентгеновскому излучению. Фактически же нейтронные звезды были открыты в 1967—1968 гг. по их специфическому периодическому радиоизлучению — мы имеем в виду обнаружение пульсаров, идентификация которых с нейтронными звездами сейчас общепринята [110, 111]. С изучением нейтронных звезд и пульсаров (знак равенства здесь все же ставить нельзя, тем более что не все нейтронные звезды обязаны давать наблюдаемое пульсирующее излучение) связано очень большое число проблем. Но то же можно сказать и

*) Радиус нейтронной звезды $r_0 \sim 10 - 30$ км, т. е. на пять порядков величины меньше радиуса Солнца $r_{\odot} = 7 \cdot 10^5$ км. Поэтому при такой же, как у Солнца, температуре $T_{\odot} \approx 6000$ К фотосфера нейтронной звезды излучала бы на 10 порядков меньше света, чем Солнце.

о звездах любого класса. Поэтому нейтронные звезды и пульсары упоминаются в настоящей книжке в силу нескольких специальных обстоятельств.

Во-первых, бо́льшая часть нейтронной звезды состоит из вещества с плотностями, лежащими в пределах от 10^{14} до 10^{15} г/см³. Уравнение состояния и все свойства вещества при таких плотностях плохо известны, и их изучение составляет немаловажную задачу. Особо здесь можно отметить вопрос о сверхтекучести нейтронной жидкости и сверхпроводимости протонной жидкости в нейтронных звездах [17, 109, 112]. (При плотностях $\rho \sim 10^{13} - 10^{15}$ г/см³ протоны и, конечно, электроны примешаны к нейтронам в количестве нескольких процентов; поскольку нейтроны, протоны и электроны в таких условиях образуют вырожденные ферми-системы, в некотором приближении оказывается возможным считать, что эта смесь как бы состоит из независимых нейтронной, протонной и электронной ферми-жидкостей.)

Во-вторых, остается неясным вопрос о центральной области нейтронных звезд, где при плотностях $\rho \geq 5 \cdot 10^{14} - 10^{15}$ г/см³ (если они достигаются; это зависит от массы звезды), помимо нуклонов и электронов, в заметном количестве появляются мезоны и гипероны (т. е. большое число сортов сильно взаимодействующих частиц — адронов), в силу чего уравнение состояния совсем уже плохо известно [112].

Если говорить не о гипотетических состояниях типа возможных в области вблизи сингулярностей (космология, коллапс), то в центральных районах нейтронных звезд плотность вещества — наибольшая встречающаяся в природе. Это замечание, как можно думать, говорит само за себя*). Добавим, что гравитационные поля в нейтронных звездах также наибольшие (опять же за исклю-

*) В § 19 указывалось, что в случае существования фундаментальной длины l_f известные законы могут начать нарушаться при $\rho_f \sim \hbar / cl_f^4$. Поскольку в атомных ядрах $\rho_n \sim 3 \cdot 10^{14}$ г/см³, а резкие аномалии «фундаментального типа» не наблюдаются, приходим к оценке $l_f \leq (\rho_n c / \hbar)^{1/4} \sim 10^{-13}$ см, в которой трудно сомневаться и из более убедительных соображений (как указывалось, сейчас считается, что $l_f \leq 10^{-15} - 10^{-17}$ см). Тем не менее центральные области достаточно массивных нейтронных звезд, где $\rho > \rho_n$, явно представляют интерес и для микрофизики.

чением полей, с которыми приходится, пока лишь в теории, иметь дело при анализе космологической проблемы и коллапса). Тем самым, ясно, что отклонения от ОТО, если они существуют, должны были бы проявиться в первую очередь для нейтронных звезд.

В-третьих, остаются еще недостаточно ясными электродинамика пульсаров и механизм их излучения [110]. Особо можно выделить вопрос о строении коры нейтронных звезд [110, 111], в частности, при учете действия сильного магнитного поля [39], достигающего для пульсаров значений порядка 10^{11} — 10^{13} Э (см. также [113]).

В настоящее время известны уже сотни пульсаров. Однако если не говорить о двойных системах, лишь знаменитый пульсар PSR 0531 в Крабовидной туманности излучает не только в радиодиапазоне, но испускает довольно сильное оптическое и рентгеновское излучение. Несомненно, это связано с молодостью пульсара в Крабе, возникшего при вспышке сверхновой в 1054 г. нашей эры (период вращения пульсара в Крабе — наименьший из известных и составляет 0,033 с).

С проблемой нейтронных звезд и пульсаров тесно связан, очевидно, вопрос о механизме образования и взрыва сверхновых звезд. Эта задача имеет много сторон (эволюция звезды до вспышки, сама вспышка и характер «остатка» сверхновой, разлет оболочки, образование ряда химических элементов при вспышках и др.). Подчеркнем лишь, что продуктом взрыва сверхновой может быть не только нейтронная звезда, но и «черная дыра» и белый карлик; возможен и взрыв без остатка, т. е. полный разлет звезды. Какая из возможностей реализуется, зависит в первую очередь от массы звезды и ее химического состава [114]. Взрыв сверхновой является, вообще говоря, источником не только электромагнитного излучения во всех диапазонах, но также нейтрино и гравитационных волн. Естественно, что проблема сверхновых занимает в астрономии исключительно важное место.

В 1971 г. с помощью спутника «Ухуру» (см. § 22) были открыты рентгеновские пульсары (источники строго периодического рентгеновского излучения). Вначале были обнаружены наиболее известные рентгеновские пульсары Сеп X-3 (Центавр X-3) с периодом 4,8 с и Нег X-1 (Геркулес X-1) с периодом 1,2 с. Сейчас извест-

но около десятка таких пульсаров, причем не приходится сомневаться в том, что они, как и радиопульсары, представляют собой намагниченные и вращающиеся нейтронные звезды *), но находящиеся в довольно тесных двойных системах [115]. По последней причине (т. е. в связи с близостью второй звезды, не являющейся нейтронной) происходит эффективное перетекание (падение, аккреция) плазмы на нейтронную звезду. При этом достигающая поверхности или окрестности нейтронной звезды плазма имеет большую скорость (результат ее притяжения нейтронной звездой). Естественно, что вынужденная остановиться у нейтронной звезды плазма сильно разогревается (температура ее $T \sim 10^7 - 10^8$ К и выше) и излучает в основном в рентгеновском диапазоне. О наблюдении «рентгеновских звезд», а они в значительной своей части представляют собой двойные системы, речь еще пойдет в § 22.

Все перечисленные проблемы и вопросы, связанные с нейтронными звездами и пульсарами, содержат много сложных и совершенно неясных элементов. Связи этой тематики с рядом узловых задач физики и астрономии очевидны. Поэтому изучение нейтронных звезд и пульсаров еще многие годы будет, вероятно, находиться в центре внимания. Но если до 1967—1968 гг. обнаружение нейтронных звезд было мечтой, то теперь нейтронные звезды постепенно переходят (и это естественно) на роль более или менее знакомых объектов, пусть еще мало «освоенных».

Внимание же охотников за новинками в какой-то мере переключилось на поиски еще более экзотических звезд — «черных дыр». Впрочем, охотники за новинка-

*) Роль компактной звезды может, в принципе, играть также белый карлик. Радиопульсарами также могли бы в некоторых случаях оказаться белые карлики, но лишь когда период пульсара $P > 1 - 3$ с. Отметим, что в литературе упоминаются также «кварковые» звезды [116]. Речь идет, по существу, о том, что при достаточно больших плотностях (больших ядерной плотности $\rho_{\text{я}} \sim 3 \cdot 10^{14}$ г/см³) нейтроны, быть может, «раздавлены» и мы имеем дело с «кварковым веществом». Ясно, что такие звезды, если они существуют, непосредственно примыкают по своим характеристикам к нейтронным или, правильнее сказать, относятся к общему классу нейтронных звезд, которые могут обладать разными значениями параметров (эти параметры, например плотность в центре, в первую очередь зависят от массы звезды).

ми здесь упомянуты лишь для красоты слога (автор понимает, что эта красота кажущаяся, но хочет облегчить переход к новой теме). На самом деле вопрос имеет сорокалетнюю историю (как мы увидим, в каком-то смысле ее начало было положено даже еще раньше — в XVIII веке) и связан с исследованием устойчивых конфигураций остывших, «умерших» звезд.

Звезды нагреты и светят благодаря происходящим в их недрах ядерным реакциям. Имеющийся в горячей звезде градиент давления не дает ей сжаться под влиянием гравитационных сил, т. е. поддерживает состояние квазиравновесия. Но когда ядерное горючее выгорает, звезда сжимается и должна перейти в какое-то окончательное («холодное») состояние. Если звезда лишь медленно вращается (или практически совсем не вращается), остывание происходит без взрывов, а масса звезды $M < 1,2 M_{\odot}$ ($M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33}$ г — масса Солнца), то конечным состоянием является конфигурация белого карлика (радиус 10^3 — 10^4 км, средняя плотность $\rho \sim 10^5$ — 10^{10} г/см³). Равновесие звезды поддерживается при этом за счет «нулевого» давления электронного газа *). Однако звезда «не хочет» умирать — в процессе выгорания ядерного горючего она иногда взрывается (такие взрывы наблюдаются как появление новых и сверхновых звезд), выбрасывая часть массы. Быть может (это еще не ясно), при подобном взрыве звезда вообще исчезает (т. е. вся ее масса выбрасывается), но имеются и другие, более правдоподобные возможности. Одна из них — сохранение какой-то звезды с $M < 1,2 M_{\odot}$, которая затем эволюционирует в состояние белого карлика. Другая возможность — появление нейтронной звезды, образующейся в результате сильного сжатия центральных частей исход-

*) Такие звезды наблюдаются в состоянии, когда некоторое количество «горючего» в них еще осталось. В сочетании с малой площадью поверхности (по сравнению с обычными звездами) это приводит к тому, что температура поверхности (фотосферы) у белых карликов обычно довольно велика и они кажутся «белыми», т. е. в их спектре доминирует коротковолновое оптическое излучение. Но известны и красные «белые карлики», а конечная стадия жизни любого белого карлика (при отсутствии аккреции) — это «черный карлик», т. е. совершенно холодная, а потому и неизлучающая плотная звезда. Вопрос об эволюции звезд, особенно на последних стадиях, подробно освещен в [109a].

ной звезды при взрыве. Если масса нейтронной звезды $M < 1,2 M_{\odot}$, то мы сталкиваемся с ситуацией, при которой у звезды в остывшем состоянии имеются два устойчивых положения равновесия. Какое из них достигается (белый карлик или нейтронная звезда), зависит от «истории» образования звезды (при медленной эволюции образуется, конечно, белый карлик)*). Ну, а что должно случиться с более массивной звездой ($M > 1,2 M_{\odot}$), если она не смогла сбросить оболочку и освободиться таким образом от части массы?

В силу недостаточного знания уравнения состояния сейчас еще не ясно, какой максимальной массой может обладать нейтронная звезда. Твердо установлено, однако, что такая масса M_{\max} существует и в рамках ОТО не превосходит $(2-3)M_{\odot}$. Поэтому для звезд с массой $M > 1,2 M_{\odot}$, но меньшей $M_{\max} \approx (2-3)M_{\odot}$, конечное состояние — нейтронная звезда**). В случае еще более массивных холодных звезд никакое вещество не может противостоять силам тяготения, и звезда будет неограниченно сжиматься — она коллапсирует, превращается в «черную дыру». Кратко и в то же время понятно осветить вопрос о «черных дырах», да еще с минимальными ссылками на общую теорию относительности (ОТО), дело весьма трудное. Кроме того, это как-то нарушило бы стиль изложения, принятый в других параграфах настоящей книжки. Поэтому приведем здесь только ссылки на литературу (см. [88, 93б, 117, 118] и сделаем несколько замечаний.

Важную роль в процессе релятивистского коллапса играет гравитационный радиус

$$r_g = 2GM/c^2 \approx 3M/M_{\odot} \text{ км}, \quad (19)$$

*) Разумеется, и для массы $M < 1,2 M_{\odot}$ одно из состояний энергетически более выгодно. Но эти состояния разделены, вообще говоря, гигантским потенциальным барьером. Только при взрыве или в результате взрыва звезда может «проскочить» состояние белого карлика и превратиться в нейтронную звезду.

**) Не исключено, что максимальная масса нейтронных звезд M_{\max} меньше максимальной массы белых карликов, равной $(1,2-1,3)M_{\odot}$. Кроме того, предполагается, что звезды вращаются не слишком быстро (судьба быстро вращающихся звезд во многом еще не ясна; вполне возможно, что они по мере сжатия теряют устойчивость и распадаются на несколько звезд). Легко видеть, что эти оговорки малосущественны в рамках нашего изложения.

где M — масса тела, $G=6,67 \cdot 10^{-8}$ см³/(г·с²) — гравитационная постоянная, $c=3 \cdot 10^{10}$ см/с — скорость света; для Солнца (масса $M_{\odot}=2 \cdot 10^{33}$ г) гравитационный радиус $r_g \approx 3$ км, тогда как радиус фотосферы $r_{\odot} \approx 7 \cdot 10^5$ км. Для «внешнего наблюдателя», т. е. при приеме излучения звезды вдали от нее, гравитационный радиус играет роль наименьшего радиуса поверхности сжимающейся звезды, поскольку свет (и сигналы любой другой природы) может уйти от звезды лишь с расстояний $r > r_g$. Если же радиус звезды в сопутствующей ей (т. е. связанной с материалом звезды) системе отсчета меньше r_g , то свет наружу не выходит, он как бы захватывается звездой и вместе с составляющим ее веществом «падает» к центру.

Не нужно думать, что этот эффект неразрывно связан с ОТО в том смысле, что получается лишь в ее рамках. Напротив, еще в 1798 г. Лаплас (опираясь, разумеется, лишь на ньютоновскую механику и закон всемирного тяготения) заметил, что в случае достаточно массивной звезды лучи света не смогут от нее уходить и «по этой причине самые большие светящиеся тела во Вселенной будут для нас невидимыми». Аргументация Лапласа была при этом правильной, и, более того, на таком пути получилось правильное выражение для гравитационного радиуса!

В самом деле, будем считать, что свет состоит из корпускул с массой m (в согласии с современными представлениями можно положить $m = \hbar\omega/c^2$, где $\hbar\omega$ — энергия фотона). Такая корпускула может удалиться с расстояния r от тела с массой M на бесконечность при условии, что $GmM/r = mv^2/2$, где v — радиальная скорость корпускулы. Полагая $v=c$ — скорости света, получаем, таким образом, условие $r = 2GM/c^2$, причем масса m роли не играет. Отсюда как раз и следует, что с расстояний $r < r_g = 2GM/c^2$ свет выйти наружу не может. Расчет этот непоследователен, хотя бы уже потому, что фактически для тел со скоростью v , сравнимой со скоростью света c , кинетическая энергия равна $\frac{mc^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - mc^2$, а не $mc^2/2$. Если же в проведенном расчете считать энергию корпускулы равной mc^2 , то для r_g получилось бы значение GM/c^2 . В этом отношении точное совпадение предельного радиуса Лапласа с r_g в каком-то смысле случайно.

Но тот факт, что ньютоновская теория способна качественно, а иногда и количественно описывать эффекты ОТО, далеко не случаен — не следует забывать, что классическая механика и теория тяготения содержатся в ОТО как предельный случай *).

Вернемся, однако, к «черным дырам». Само это название связано с тем, что по прошествии некоторого времени τ коллапсирующая звезда для внешнего наблюдателя потухает, становится невидимой. Время τ зависит от начальных условий, чувствительности аппаратуры и т. п., но по порядку величины

$$\tau \sim r_g/c \approx 10^{-5} M/M_\odot \text{ с}, \quad (20)$$

т. е. угасание происходит очень быстро — по крайней мере для звезд с массой $M \sim M_\odot$, а не, скажем, для галактических ядер и квазаров (если бы они оказались «черными дырами») с массой $M \sim 10^9 M_\odot$, хотя и в этом случае время τ ничтожно по астрономическим масштабам **). Никак нельзя тем не менее сказать, что «черная дыра» исчезает. Прежде всего, нужно иметь в виду, что ее гравитационное поле полностью сохраняется и на расстояниях $r \gg r_g$ гравитационный потенциал звезды описывается обычным выражением $\varphi = -GM/r$. Поэтому входящая в состав двойной звезды «черная дыра» действует на вторую звезду совершенно так же, как обычная звез-

*) В § 19 уже упоминалось о том, что нестационарность Вселенной носит, по сути дела, классический характер (более того, из ньютоновской теории можно получить законы эволюции фридмановских моделей Вселенной [93]). На отклонение световых лучей в поле Солнца, предсказанное Эйнштейном в 1911 г., впервые было указано еще в 1801 г. Золднером, получившим тот же количественный результат (расчет и ссылку см. в [119], поскольку статья Золднера труднодоступна). В дальнейшем (в 1915 г.) Эйнштейн, правда, выяснил, что фактически отклонение лучей должно быть вдвое больше, чем указывалось им в 1911 г. и Золднером в 1801 г. Наблюдения, как упоминалось в § 17, находятся в согласии с результатом Эйнштейна 1915 г., вытекающим из ОТО (в 1911 г. построение ОТО еще не было закончено и Эйнштейн пользовался лишь соображениями, основанными на принципе эквивалентности, которых в данном случае недостаточно).

**) Во избежание недоразумений заметим, что время $\tau \sim r_g/c$ характеризует последнюю, релятивистскую фазу коллапса, когда радиус звезды $r \sim r_g$ (скажем, $r \lesssim 3r_g$). Сжатие же звезды до радиуса $r \sim r_g$ может происходить медленно, но все это время звезда еще видна.

да. Таким путем и предполагается в первую очередь искать «черные дыры»: нужно найти двойные системы, в которых одна из звезд не излучает, а ее масса $M > 3M_{\odot}$ и поэтому она не может быть нейтронной звездой или потухшим (черным) белым карликом. Задача эта не из легких, но, быть может, уже привела к успеху — к обнаружению «черной дыры» в случае рентгеновского источника Cyg X-1 (Лебедь X-1) [120].

В данном случае, правда, нельзя сказать, что «черная дыра» не видна. И тем лучше, конечно! Но остается объяснить, почему это не противоречит сказанному выше. Дело в том, что «черная дыра» действительно не может быть видна сама по себе (для времени $t \gg \tau$; см. (20)), но это не обязательно относится к веществу, падающему на звезду — «черную дыру». При таком падении (при аккреции) падающий газ скапливается вблизи «дыры» в виде вращающегося диска. Газ в диске сильно нагрет и излучает, в основном, в рентгеновской области. Кроме того, при определенных условиях газ вблизи «дыры» может турбулизироваться и в нем по мере приближения к области с $r \sim r_g$ нарастают магнитные поля и происходит ускорение частиц. В результате должно возникать синхротронное излучение. В общем, аккрецируемое «черной дырой» вещество излучает и будет образовывать вокруг нее некоторый «ореол». Характерная черта возникающего излучения — его переменность, причем с квазипериодом $P \sim \tau \sim r_g/c \sim 3 \cdot 10^{-5} - 10^{-4}$ с (при $M \sim (3-10)M_{\odot}$). Поэтому светящиеся в результате аккреции «черные дыры» иногда называют «флуктуарами». Рентгеновский источник Cyg X-1, во-первых, входит в состав довольно тесной двойной системы (период 5,6 дня), что обеспечивает мощную аккрецию и, почти несомненно, как раз и приводит к рентгеновскому излучению (то же можно сказать о рентгеновских пульсарах Cen X-3, Her X-1 и некоторых других, где компактная компонента двойной звезды является не «черной дырой», а нейтронной звездой; см. выше). Во-вторых, в отличие от только что упомянутых рентгеновских пульсаров, в случае Cyg X-1 излучение хотя и сильно флуктуирует, но без определенного периода [120]. К сожалению, флуктуации с характерным временем $\tau \sim 10^{-4}$ с еще не наблюдались (не было соответствующей аппаратуры) и зафиксированы лишь

более медленные колебания. С другой стороны, оценка массы компактной компоненты приводит к значению $M \sim 10M_{\odot}$, что также свидетельствует в пользу ее идентификации с «черной дырой». Однако нет еще полной уверенности в том, что Cyg X-1 является фактически двойной, а не тройной системой. Высказывались также предположения, что излучение в Cyg X-1 связано не с аккрецией газа на компактную звезду, а с магнитными эффектами в двойной звездной системе (ссылки см. в [87]). В целом, как и пять лет назад, вопрос о природе источника Cyg X-1 остается нерешенным, хотя наиболее вероятной и считается гипотеза о присутствии в этом источнике «черной дыры» [120]. Но, несомненно, столь важное утверждение требует солидного доказательства, а его еще нет.

В «черную дыру» может, в принципе, превратиться не только обычная звезда (с массой $M \sim 3-50 M_{\odot}$), но и такое еще более массивное образование, как квазар или галактическое ядро. В частности, была высказана гипотеза о том, что в центре нашей Галактики и в некоторых других галактиках находятся малоактивные ядра, представляющие собой умершие квазары, т. е. квазары, превратившиеся в «черные дыры». Некоторая сохранившаяся активность таких галактических ядер должна быть связана с аккрецией, и в этом смысле они аналогичны рассмотренной выше модели «флуктуара», но отличаются гораздо большим масштабом.

В последнее время удалось, однако, показать [121], что ни в центре нашей Галактики, ни в ряде других «спокойных» галактик большая «черная дыра» ($M > 10^2 M_{\odot}$) присутствовать, по-видимому, не может, так как вызываемое ею притяжение газа и звезд приводило бы к активности ядер, которая, однако, не наблюдается. В случае квазаров и активных галактик гипотеза о «чернодырной» природе их активности хотя и весьма популярна, но совершенно не доказана, поскольку имеется альтернативное и отнюдь не менее вероятное объяснение [104]. Только в 1978 г. были получены интересные данные, касающиеся эллиптической галактики M 87, являющейся вместе с тем радиогалактикой Дева А (Virgo A). В центре этой галактики (ее расстояние от нас составляет 15 Мпк) сконцентрирована большая масса

($M \sim 5 \cdot 10^9 M_{\odot}$), которая сравнительно слабо светится [122]. Такая картина согласуется с предположением о наличии «черной дыры», но еще не доказывает его. Действительно, при достигнутом разрешении можно лишь утверждать, что избыточная масса расположена в области с размером порядка $100 \text{ пк} \approx 3 \cdot 10^{20} \text{ см}$. Между тем гравитационный радиус для массы $M \sim 5 \cdot 10^9 M_{\odot}$ составляет всего $r_g \sim 10^{15} \text{ см}$. Поэтому роль слабо светящихся масс в центре М 87 могло бы, в принципе, играть компактное скопление нейтронных звезд или белых карликов. Хотя, несомненно, в этом случае кандидатура «черной дыры» представляется сравнительно солидной, в целом вопрос остается совершенно открытым даже в отношении галактики М 87.

В ближайшем будущем следует ожидать интенсивных поисков «черных дыр», а затем и изучения особенностей возникающего вблизи них излучения и других их проявлений. Существен при этом учет вращения «черных дыр» и возможности того, что при достаточно быстром вращении вместо «черной дыры» возникают конфигурации с качественно отличными особенностями (имеются в виду «голые» сингулярности; см. [98, 117, 123]). Так или иначе, изучение «черных дыр», впервые в явном виде рассмотренных еще в 1939 г. [124], стало сейчас реальной астрофизической проблемой и привлекает к себе большое внимание. Думаю, что в ближайшем будущем интерес к физическим и астрономическим процессам и эффектам, связанным с «черными дырами», только возрастет.

Вблизи гравитационного радиуса поле тяготения становится сильным (параметр $|f|/c^2$ не мал, и, собственно, им уже нельзя пользоваться; см. § 17). Поэтому именно вблизи «черных дыр» (и практически, вероятно, только в этом случае) можно проверять ОТО в сильных гравитационных полях. С этой точки зрения, впрочем, особенно важно само обнаружение (конечно, вполне надежное) хотя бы одной «черной дыры». Дело в том, что в рамках ОТО «черные дыры» безусловно могут существовать (хотя вовсе и не обязаны образовываться в тех или иных конкретных условиях). Предложены вместе с тем некоторые теории гравитационного поля (правда, они недостаточно развиты и встречаются с возражениями; см.

[87], где указана литература), в которых решения, соответствующие «черным дырам», не появляются. В такой ситуации, очевидно, обнаружение «черных дыр» хотя и не доказывает справедливость именно ОТО, но свидетельствовало бы в ее пользу. Если же «черные дыры» не будут обнаружены (что логически в настоящее время не исключено), то такой результат еще не находился бы в прямом противоречии с ОТО — его можно попытаться объяснить трудностью образования «черных дыр» в условиях конкуренции других возможных процессов (взрывов сжимающейся массы с образованием обычных или нейтронных звезд и т. п.).

Помимо «черных дыр» в астрономическом словаре сравнительно недавно появились и «белые дыры». Представим себе, что звезда или сверхзвезда (масса $M \gg \gg M_{\odot}$) не сжимается и не коллапсирует, а, напротив, расширяется — антиколлапсирует. Конечно, для этого нужно сообщить веществу начальную скорость, направленную от центра. С одним родственным «случаем» астрономия уже столкнулась — вся наблюдаемая Вселенная расширяется, поскольку около 10—20 миллиардов лет назад она с огромной «начальной» скоростью вышла из еще непонятого и неизвестного нам состояния. Не могли ли с тех времен сохраниться под гравитационным радиусом расширяющиеся массы, которые лишь в наше время «проходят» гравитационный радиус и становятся видимыми «белыми дырами», наблюдаемыми как взрыв?

На эту тему было опубликовано довольно много статей. Вначале «белые дыры» рассматривались как нечто реальное в том смысле, что их наблюдение в космических условиях возможно. В последнее время, напротив, появились утверждения о ненаблюдаемости «белых дыр».

Мне, естественно, не хочется писать о том, чего я не понимаю. Именно так, к сожалению, обстоит дело с «белыми дырами», и поэтому я ограничусь ссылкой на последние известные статьи [125] и констатацией негативного в них отношения к «белым дырам» как возможному объекту наблюдений.

В заключение — о самом важном событии в физике «черных дыр», происшедшем за последнее время. Более того, речь идет об открытии (пока, правда, лишь в об-

ласти теории), имеющем большое общезначимое значение, а возможно, существенное и в космологии. Само свое название «черные дыры» получили, как известно, в связи с возможностью сказать «что в черную дыру попало, то пропало» и с утверждением об отсутствии какого-либо излучения из «черной дыры». И вот в 1974 г. было выяснено [118], что такое заключение неверно, правда, лишь при учете квантовых эффектов. По последней причине, спешу это подчеркнуть, упоминавшиеся выше «черные дыры» с массой порядка солнечной массы или еще большей практически ничего не излучают и никаких корректив в классическую физику «черных дыр» вносить не нужно. Но в принципе могут существовать «черные дыры» с весьма маленькой массой и, более того, такие «дыры» (их называют обычно реликтовыми «черными дырами» с малой массой или просто мини-«черными дырами») могли бы образовываться на ранних (плотных) стадиях эволюции Вселенной. Излучение «мини-дыр» уже вполне значительно и определяет их поведение. Конкретно, невращающаяся «черная дыра» с массой M излучает как абсолютно черное тело с температурой (см. [117, 118])

$$T = \frac{\kappa \hbar}{2\pi c k} = \frac{c^3 \hbar}{8\pi G M k} = \frac{GM \hbar}{2\pi c r_g^2 k} \approx 10^{-7} \left(\frac{M_{\odot}}{M} \right) = 10^{-7} \left(\frac{2 \cdot 10^{33}}{M(\text{г})} \right) \text{К.} \quad (21)$$

Здесь $\kappa = c^4/4GM = GM/r_g^2$ — «поверхностная гравитация» (ускорение тела при свободном падении в гравитационном поле на поверхности «черной дыры»; точнее см. [117]) и $k = 1,38 \cdot 10^{-16}$ эрг/К — постоянная Больцмана. Характерная частота для фотонов, излучаемых телом с температурой T , $\omega \sim kT/\hbar$, и, следовательно, в условиях (21) $\omega \sim GM/cr_g^2$ и характерное время $\tau \sim \frac{1}{\omega} \sim \frac{c}{GM/r_g^2}$ имеет смысл времени, за которое частица приобретает скорость порядка c в поле тяжести с напряженностью (ускорением) GM/r_g^2 . По своей природе излучение фотонов (а при достаточно высокой температуре и частиц с отличной от нуля массой покоя) «черной дырой» носит такой же характер, как и рождение частиц в сильных электромагнитных полях. В данном случае фотоны и другие частицы порождаются крайне сильным полем

тяжести, существующим вблизи гравитационного радиуса (например, для «черной дыры» с массой $M = M_{\odot}$ ускорение $GM/r_g^2 \sim 10^{15} \sim 10^{12}g$, где $g = 981$ см/с² — ускорение свободного падения на поверхности Земли).

Как очевидно из (21), «черная дыра» с массой Солнца $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33}$ г излучает как черное тело с температурой 10^{-7} К. Поскольку Вселенная в нашу эпоху заполнена реликтовым тепловым излучением с температурой $T \approx 3$ К, собственным излучением макроскопических «черных дыр» можно полностью пренебречь*), а заметить его невозможно. Ситуация изменяется для «мини-дыр». Так, «дыра» с массой $M = 2 \cdot 10^{15}$ г излучает уже как черное тело с $T \sim 10^{11}$ К. Мощность теплового излучения «черной дыры»

$$\frac{dE}{dt} = \frac{10^{16} f(M)}{M^2} \text{ эрг/с,}$$

где M — масса «дыры» в граммах и $f(M)$ — фактор, учитывающий излучение частиц с отличной от нуля массой покоя (при $M > 10^{17}$ г фактор $f(M) \approx 1$, при $M \sim 10^{14}$ г уже $f(M) \sim 10$). Следовательно, «дыра» с массой $M = 10^{14}$ г излучает примерно 10^{19} эрг/с. В силу столь мощного излучения «мини-дыры» живут сравнительно недолго — характерное время их жизни (при $f(M) \sim 10$) равно

$$\tau \sim 10^{-27} (M(\text{г}))^3 \text{ с} \sim 10^{10} \left(\frac{M(\text{г})}{10^{15}} \right)^3 \text{ лет.}$$

Отсюда ясно, что лишь «мини-дыры» с массой $M \geq 10^{15}$ г могут сохраниться до наших дней, если они были созданы на ранних стадиях космологической эволюции, когда плотность вещества была гигантской. Поскольку других путей образования «мини-дыр» не видно, в нашу эпоху можно ожидать какого-то проявления процесса «испарения» как раз «мини-дыр» с массой $M \sim 10^{14} - 10^{15}$ г («мини-дыра», дожившая до наших дней с массой такого порядка, затем сравнительно быстро сгорает; уже при $M \sim 10^{13}$ г время жизни «дыры» составляет только 10^3 —

*) Мы не касаемся здесь очень далекого будущего в случае открытых космологических моделей [154]. Вопрос о будущем Вселенной, кстати сказать, начал обсуждаться совсем недавно, хотя и представляется исключительно интересным.

10^4 лет). «Дыра» с $M \sim 10^9$ г живет лишь доли секунды, причем за это время выделяется энергия $Mc^2 \sim 10^{30}$ эрг. Такой взрыв должен сопровождаться излучением в различных диапазонах, и его могли бы заметить даже на значительном расстоянии от Земли. Анализ соответствующих возможностей посвящено уже довольно большое число статей (см., например, [126]), но никаких указаний на существование «мини-дыр» еще не получено.

Несомненно, искать взрывы «мини-дыр» вполне целесообразно, но нужно иметь в виду, что само их образование в заметном количестве находится под вопросом. Даже если ОТО применима лишь при плотностях $\rho < \rho_g \sim 10^{94}$ г/см³ (см. (18)), «мини-дыры» вполне могли бы не образовываться при тех или иных (еще неизвестных) условиях, царящих на подобных стадиях космологической эволюции. Но «мини-дыры», по-видимому, отсутствуют и в том случае, если существует фундаментальная длина $l_f \gg l_g \sim 10^{-32}$ см. В самом деле, гравитационный радиус «дыры» с массой $M \sim 10^{15}$ г составляет всего $r_g \sim 10^{-13}$ см, а плотность $\rho \sim 3M/4\pi r_g^3$ при этом порядка 10^{23} г/см³. Уже здесь макрофизика сталкивается с микрофизикой. Далее, вряд ли имеет смысл вводить гравитационный радиус r_g , меньший l_f , и, следовательно, для минимальной массы «черной дыры» имеем

$$M_f \sim \frac{r_g c^2}{G} \sim \frac{l_f c^2}{G} \sim \frac{l_g c^2}{G} \left(\frac{l_f}{l_g} \right) \sim 10^{-5} \left(\frac{l_f}{l_g} \right) \text{ г.}$$

Если $l_f = l_g$, то $M_f = M_g \sim 10^5$ г, и меньшие «дыры», возможно, существовать не могут, т. е. возникает стабильная частица («максимон»; см. [36]). Но при $l_f \sim 10^{-17}$ см уже $M_f \sim 10^{11}$ г. Более того, как уже упоминалось в § 19, длине l_f отвечает, видимо, предельная плотность

$$\rho_f \sim \frac{\hbar}{cl_f^4} \sim 10^{30} \left(\frac{10^{-17}}{l_f(\text{см})} \right)^4 \text{ г/см}^3.$$

Если при образовании «черной дыры» ее плотность не может превосходить значения ρ_f , то минимальная масса «дыры» $M_{\min} \sim \rho_f r_g^3$, $r_g = 2GM_{\min}/c^2$. Отсюда

$$M_{\min} \sim \frac{c^3}{VG^3 \rho_f} \sim 10^{27} \left(\frac{l_f(\text{см})}{10^{-17}} \right)^2 \text{ г.}$$

При $l_f \sim l_g$, очевидно, $M_{\min} \sim M_g \sim 10^{-5}$ г. Но уже, скажем, при $l_f \sim 10^{-20}$ см масса $M_{\min} \sim 10^{21}$ г и $r_{g, \min} = 2GM_{\min}/c^2 \sim 10^{-7}$ см. Подобные соображения [127] не являются, конечно, каким-либо доказательством. Но они свидетельствуют о том, что при $l_f \gg l_g$ «мини-дыры» с $M < 10^{15}$ г вполне могли бы вообще не образовываться. Поэтому обнаружение «мини-дыр» с $M \leq 10^{15}$ г, во-первых, было бы известным подтверждением ОТО. Во-вторых, оно указывало бы на характер развития Вселенной в фазе ее высокой плотности. И, в-третьих, получалось бы некоторое ограничение на значение фундаментальной длины l_f . К сожалению, как и во многих аналогичных случаях, отсутствие «мини-дыр» значительно менее информативно, поскольку может быть следствием ряда причин, ясных из сказанного. Решить же, в чем именно дело (скажем, что длина $l_f \gg l_g$), на основании отсутствия «мини-дыр» еще никак нельзя.

Анализ проблемы «мини-дыр» и их испарения тесно переплетается с исследованием сингулярностей, границ применимости ОТО, вопроса о рождении частиц в гравитационном поле. Другими словами, как уже отмечалось, этот аспект физики «черных дыр» сильно повышает и без того большой интерес к «черным дырам». Сегодня «черные дыры», подобно кваркам, хотя и не могут еще считаться объектами, существование которых доказано, но уже заняли в физике и астрономии совершенно исключительное место.

§ 22. Происхождение космических лучей и космического гамма- и рентгеновского излучения

Уже более 50 лет назад было установлено, что на Землю из космоса приходит сильно проникающее излучение — космические лучи. Природа (состав) этого излучения долгие годы оставалась неясной. Но сейчас известно, что космические лучи — это заряженные частицы: протоны, ядра, электроны и позитроны. Правда, из космоса к нам приходят также рентгеновские и гамма-лучи и, несомненно, нейтрино. Сейчас принято, однако, называть космическими лучами только заряженные частицы космического происхождения (такое условие тем более оправдано, что в области больших энергий роль

заряженных частиц является доминирующей, например, если говорить о величине потока или энерговыделении).

Концентрация космических лучей (скажем, с кинетической энергией $E_{к.л}$ порядка и больше 1 ГэВ) у Земли и в значительной части Галактики $N_{к.л} \sim 10^{-10}$ см $^{-3}$, что ничтожно мало по сравнению с концентрацией частиц газа в галактическом диске ($n \sim 1$ см $^{-3}$) и даже в галактическом гало ($10^{-3} \leq n \leq 10^{-2}$ см $^{-3}$) или в межгалактической среде ($10^{-7} \leq n \leq 10^{-5}$ см $^{-3}$). Однако плотность энергии космических лучей

$$\omega_{к.л} \sim E_{к.л} N_{к.л} \sim 10^{-12} \text{ эрг/см}^3,$$

что уже не меньше плотности внутренней (кинетической) энергии газа

$$\omega_{г} = \frac{3}{2} knT \sim 10^{-14} - 10^{-12} \text{ эрг/см}^3$$

($n \leq 1$ см $^{-3}$, $T \leq 10^4$ К в диске и $T \leq 10^6$ К в гало). Плотность энергии магнитного поля $\omega_H = H^2/8\pi$ в диске (где $H \leq 5 \cdot 10^{-6}$ Э) также не превосходит $\omega_{к.л}$. Таким образом, релятивистские частицы — космические лучи — уже в нашей Галактике являются существенным энергетическим и динамическим фактором (речь идет, разумеется, о межзвездной среде). Еще бóльшую роль космические лучи играют в оболочках сверхновых звезд, в радиогалактиках и квазарах. Установление этих фактов, тесно связанное с развитием радиоастрономии, является одним из важнейших достижений астрофизики за последнюю четверть века (см. [128, 129]).

Проблема происхождения космических лучей дискутируется десятилетия, но остается достаточно «важной и интересной», поскольку споры на этот счет продолжаются, а большое значение самого вопроса не вызывает сомнений. Основным для проблемы происхождения космических лучей до последнего времени представлялся выбор между моделями трех типов: метагалактическими, галактическими с гало и дисковыми галактическими. В метагалактических моделях предполагается, что основная часть достигающих Земли космических лучей приходит из Метагалактики, т. е. втекает в Галактику извне. В галактических же моделях считается, что кос-

мические лучи (быть может, за исключением частиц с энергией $E_{\text{к. л.}} \geq 10^{17}$ эВ) образуются в самой Галактике, в первую очередь при взрывах сверхновых звезд, а также вблизи пульсаров, находящихся в оболочках сверхновых, а возможно, и при взрывах галактического ядра. По моему мнению, которого я придерживаюсь с 1953 г., приемлемыми являются только галактические модели. Однако опровергнуть метагалактические модели весьма нелегко, и они обсуждались до недавнего времени. В этих моделях в какой-то окружающей Галактику области (а, быть может, и во всей Метагалактике) $\omega_{\text{к. л. мг}} \sim \omega_{\text{к. л.}} \sim 10^{-12}$ эрг/см³ ($\omega_{\text{к. л.}}$ — плотность энергии космических лучей в Галактике; см. выше). В галактических же моделях происхождения основной части космических лучей, наблюдаемых у Земли, $\omega_{\text{к. л. мг}} \leq 10^{-12}$ эрг/см³ (вероятно, даже $\omega_{\text{к. л. мг}} \leq 10^{-13}$ эрг/см³). Но, к сожалению, измерить значение $\omega_{\text{к. л. мг}}$ до последнего времени не представлялось возможным и приходилось довольствоваться различными оценками и косвенными соображениями. Теперь же не только появилась реальная надежда решить вопрос с помощью прямых наблюдений — речь идет о применении гамма-астрономии, — но на этом пути получены первые результаты (см. ниже), и они свидетельствуют против метагалактических моделей. Что касается галактических моделей, то многолетняя дискуссия концентрируется на выборе между моделями с гало и дисковыми моделями. В моделях с гало космические лучи заполняют некоторую квазисферическую или даже более уплощенную, но большую область вокруг галактического диска (характерный размер гало $R \sim 3-10$ кпк $\approx 1-3 \cdot 10^{22}$ см; напомним, что расстояние от Солнца до центра Галактики составляет 10 кпк). В дисковых моделях космические лучи считаются захваченными в области дискообразной формы (радиус $R \sim 10$ кпк, толщина диска $h \sim 0,3-0,5$ кпк). Различие между моделями обоих типов сильнее всего сказывается на среднем времени жизни космических лучей в Галактике $\tau_{\text{к. л.}}$ (это время для протонов и легких ядер определяется скоростью их выхода из системы, т. е. из области захвата). В моделях с гало $\tau_{\text{к. л.}} \sim 1-3 \cdot 10^8$ лет, в типичных дисковых моделях $\tau_{\text{к. л.}} \sim 1-3 \cdot 10^6$ лет. Только модели с гало (главное здесь, что $\tau_{\text{к. л.}} \geq 10^8$ лет) представляются непротиворечивыми,

но «закрывать» некоторые дисковые модели оказалось не легким делом. Впрочем, споры продолжаются, хотя я лично считаю, что в 1977 г. проблема в основном была решена в пользу моделей с гало. В дальнейшем такие модели нашли новое подтверждение. Решающими здесь оказались радиоастрономические наблюдения (см. [129]).

Помимо выбора между моделями, проблема происхождения космических лучей имеет, конечно, и ряд других сторон. Упомянем о плазменных эффектах в астрофизике [130], механизмах ускорения частиц при взрывах сверхновых звезд и вблизи пульсаров [131], солнечных космических лучах и их распространении в Солнечной системе, проблемах химического состава космических лучей и энергетического спектра различных их компонент (включая электронно-позитронную). Особо нужно выделить область сверхвысоких энергий $E \geq 10^{17}$ эВ. Происхождение космических лучей с такой энергией (наблюдаются частицы с энергией, достигающей 10^{20} эВ) представляется сейчас совершенно неясным [132].

Астрофизика космических лучей — порождение послевоенной астрофизики и занимает в ней все более и более важное место.

В последнее время, впрочем, чаще говорят не об астрофизике космических лучей, а об астрофизике высоких энергий, к которой относятся также вопросы рентгеновской и гамма-астрономии (сюда следует присоединить и астрономию нейтрино высоких энергий).

Рентгеновская астрономия, если не говорить об изучении Солнца, родилась в 1962 г. в результате случайного и неожиданного открытия (при измерениях на ракете) мощного рентгеновского источника Sco X-1 (Скорпион X-1). Затем был обнаружен целый ряд других космических рентгеновских источников (рентгеновских «звезд»), причем особенно успешными оказались наблюдения с помощью первого же спутника, специально предназначенного для целей рентгеновской астрономии (спутник был запущен в конце 1970 г. и получил название «Ухуру», что на языке суахили — этот американский спутник был запущен из Кении — означает «свобода»). Сейчас известно уже больше 500 рентгеновских «звезд» — среди них пульсар в Крабовидной туманности, рентгеновские пульсары Cen X-3 и Her X-1 и кандидат в «флукту-

ары» Cyg X-1 (см. § 21), другие галактические источники, связанные со звездами, сама Крабовидная туманность, и другие оболочки сверхновых звезд, а также различные внегалактические источники (галактики и квазары). Обнаружен также диффузный рентгеновский фон (т. е. излучение, не связанное, по крайней мере при достигнутом угловом разрешении, с дискретными источниками).

Известен целый ряд механизмов рентгеновского излучения: тормозное излучение горячей плазмы, синхротронное излучение релятивистских электронов, рассеяние радио-, инфракрасного и оптического излучения на релятивистских электронах с трансформацией этого излучения в рентгеновское (такой процесс часто называют обратным комптоновским рассеянием). Все эти механизмы, несомненно, вносят свой вклад в наблюдаемый поток, но он различен в разных случаях (например, для Крабовидной туманности основное значение имеет синхротронное излучение, для целого же ряда других рентгеновских источников преобладает, видимо, тормозное излучение). Безусловно, выдающуюся роль при образовании мощного рентгеновского излучения играет аккреция, особенно в двойных системах. Нужно учитывать поглощение рентгеновских лучей в межзвездном газе, можно искать линии характеристического рентгеновского излучения атомов и т. д. и т. п. В общем, рентгеновская астрономия после примерно 8—10 лет накопления сил и разгона вырвалась на широкий простор [115, 133]. Сегодня это уже третья, после оптической и радиоастрономии, важнейшая ветвь астрономии, если говорить о классификации по диапазонам или методам исследования. За короткий срок рентгеновская астрономия принесла первоклассные открытия (см., в частности, ниже об обнаружении рентгеновских всплесков). Трудно поверить, что их поток прекратится.

В случае гамма-астрономии положение иное. Хотя вопрос о возможностях гамма-астрономии был поднят еще в 1958 г. [134] и с тех пор неоднократно обсуждался [135], вполне надежных данных в этой области не было до последнего времени (в частности, в предыдущем издании книжки говорилось, что таких данных еще нет). Причина, если угодно, техническая. Измеряемый числом фотонов поток гамма-лучей весьма слаб (другое дело, что поток энергии при этом не так уж мал вследствие относитель-

но большой энергии каждого фотона *)). Так, в случае фотонов с энергией $E_\gamma > 100$ МэВ нужно измерять плотности потоков, меньшие 10^{-5} см $^{-2}$ ·с $^{-1}$ (и желательно, составляющие лишь 10^{-7} см $^{-2}$ ·с $^{-1}$). Для таких измерений требуются приборы (счетчики, искровые камеры и т. д.) с большой площадью и способные работать («летать») достаточно долго. Поэтому ракеты, сыгравшие выдающуюся роль на первом этапе развития рентгеновской астрономии, для целей гамма-астрономии не подходят. Измерения же на высотных баллонах и на спутниках сопряжены с большими трудностями, которые еще не полностью преодолены. Тем не менее сейчас ряд важных результатов уже получен [136]. Так, обнаружены дискретные источники космических гамма-лучей, не осталось сомнений в наличии заметного гамма-излучения из области галактического диска, установлено существование изотропного фона гамма-излучения явно метагалактического происхождения.

Ограничусь здесь тем, что поясню, почему некоторые гамма-астрономические наблюдения потенциально исключительно важны и многообещающи. Так, значительная доля гамма-излучения с энергией $E_\gamma > 50—100$ МэВ должна генерироваться протонно-ядерной компонентой космических лучей в межзвездной и межгалактической средах. Дело в том, что протоны и ядра, входящие в состав космических лучей, при соударениях с протонами и ядрами в газе порождают, в частности, π^0 -мезоны. Последние моментально (среднее время жизни π^0 -мезона $0,84 \cdot 10^{-16}$ с) распадаются на два гамма-фотона с энергией $E_\gamma = m_\pi c^2 / 2 = 67,5$ МэВ каждый (здесь имеются в виду покоящиеся π^0 -мезоны). Гамма-лучи образуются также при распаде Σ^0 -гиперона (процесс $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda + \gamma$) и в результате распада ряда мезонов и гиперонов с образованием π^0 -мезонов ($K^\pm \rightarrow \pi^\pm + \pi^0$, $\Lambda \rightarrow p + \pi^0$ и т. д.). Такие гамма-лучи «ядерного» происхождения отличаются своим спектром (они имеют в основном энергию, бóльшую 30—50 МэВ), и поэтому их можно, в принципе, отделить от гамма-лучей, образующихся в результате других про-

*) Гамма-лучами называем электромагнитное излучение с длиной волны, меньшей 0,1 Å, т. е. фотоны с энергией $E_\gamma \geq 100$ кэВ = 0,1 МэВ.

цессов, например при тормозном излучении релятивистских электронов. Поток «ядерных» гамма-лучей пропорционален интенсивности генерирующих их космических лучей, и, таким образом, появляется возможность определить эту интенсивность вдали от Земли, в районе галактического центра, в радиогалактиках и т. д. Между тем, если не говорить о гамма-астрономическом методе, все сведения об основной, протонно-ядерной компоненте космических лучей вдали от Земли либо получались путем экстраполяции околосемных данных о космических лучах, либо оценивались с привлечением дополнительных гипотез (пусть часто и вполне правдоподобных) из радиоастрономических измерений *). Значение такого шага — более или менее непосредственного определения интенсивности (и плотности энергии) протонов и ядер в космических лучах вдали от Земли — трудно переоценить. В частности, именно на таком пути можно надеяться окончательно решить затянувшийся спор о галактическом или метагалактическом происхождении космических лучей [129]. Конкретно, в метагалактических моделях плотность энергии космических лучей в ближайших к нам сравнительно небольших галактиках — в Магеллановых Облаках — должна быть такой же, как в Галактике и окружающем ее пространстве, т. е. составлять $\omega_{к. л., мг} \sim 10^{-12}$ эрг/см³. Отсюда следует, что Магеллановы Облака, содержащие известное нам количество газа, должны испускать гамма-лучи, плотность потока которых на Земле равна $F_{\gamma} \sim 3 \cdot 10^{-7}$ см⁻²·с⁻¹ (при энергии $E_{\gamma} > 100$ МэВ). Если будет наблюдаться меньший поток гамма-лучей, метагалактические модели будут решительно опровергнуты. Если же будет наблюдаться поток, равный или больший указанного, то положение останется неясным, так как гамма-излучение в этом случае могло бы создаваться космическими лучами, которые генерируются в самих Магеллановых Облаках.

Гамма-астрономические наблюдения Магеллановых Облаков — дело будущего, хотя, можно думать, и недалекого. Вместе с тем уже измерения потока гамма-лучей

*) Из радиоданных, также не без дополнительных предположений, но все же более непосредственно, удается получить сведения о релятивистских электронах в радиоизлучающих областях (подробнее см. [128, 129]).

галактического происхождения, приходящих из направления на антицентр Галактики, свидетельствуют о том, что с удалением от Солнечной системы (в направлении на антицентр) плотность энергии космических лучей заметно убывает [136]. Такой результат естествен и, собственно, несомненен для галактических моделей, но противоречит моделям метагалактическим (см. выше).

Помимо гамма-лучей от распада π^0 -мезонов, большой интерес представляют и гамма-лучи иного происхождения: генерируемые релятивистскими электронами, возникающие при переходах в ядрах [137] и другими путями. Таким образом, в превращении (в будущем) гамма-астрономии в многогранную область исследований сомневаться не приходится. Сейчас остановлюсь еще только на одном открытии, сделанном в этой области.

В прошлом десятилетии американцы запустили четыре спутника «Вела», предназначенные для контроля над соблюдением соглашения о запрещении ядерных взрывов в космосе и снабженные поэтому детекторами гамма-лучей. Ядерные взрывы при этом не были обнаружены, но в период с июля 1969 г. по июль 1972 г. было зарегистрировано 16 всплесков (bursts) гамма-излучения [138a] с продолжительностью от долей секунды до десятков секунд. Особенно существенно при этом, что всплески наблюдались сразу на нескольких спутниках «Вела», находившихся друг от друга на больших расстояниях. Поэтому не приходилось опасаться того, что всплеск появился в результате неисправности аппаратуры на одном из спутников. В дальнейшем просмотрели «записи», сделанные на других спутниках с подходящей аппаратурой, летавших в тот же период [138b], и также обнаружили некоторые из всплесков, зарегистрированных спутниками «Вела» (регистрации всех всплесков на всех спутниках трудно ожидать, поскольку аппаратура работает не все время, может находиться в «тени» Земли и т. п.). Не нужно думать, что на разных спутниках гамма-всплески детектируются строго одновременно. Напротив, это не так в силу конечной скорости света (равной, разумеется, и скорости гамма-фотонов) и немалого расстояния между спутниками (так, спутники «Вела» летают на расстоянии около 120 000 км от центра Земли, вследствие чего расстояние между спутниками может

достигать 240 000 км, что приведет к максимальному запаздыванию всплесков, равному почти секунде; аппаратура же регистрировала приход всплесков с точностью до сотых долей секунды). Кстати, по времени запаздывания всплесков и, разумеется, с учетом известного положения спутников, удастся установить, что всплески не приходят от Солнца или от Земли.

Материала еще сравнительно мало, но пока в направлениях, откуда приходят всплески, никаких «необычных» видимых объектов (например, остатков вспышки сверхновой звезды) не обнаружено. Между тем обсуждаемые всплески гамма-лучей (они наблюдались в интервале энергий 0,1—1,5 МэВ, а в некоторых случаях и в рентгеновской области) являются весьма сильными, так что им должен отвечать какой-то мощный космический взрыв. Действительно, для всплеска, лучше всего изученного на первом этапе, полная принятая энергия на 1 см² за время около 80 с (такова была продолжительность этого всплеска τ) составляла $\Phi \sim 5 \cdot 10^{-4}$ эрг. Если источник излучения находится в Галактике, скажем, на расстоянии $R \sim 100$ пк $\sim 3 \cdot 10^{20}$ см, то полное энерговыделение в источнике $W \sim 4\pi R^2 \Phi \sim 10^{39}$ эрг и его мощность $L \sim W/\tau \sim 10^{37}$ эрг/с. Для источника в других близких галактиках (например, для вспыхнувшей там сверхновой звезды) при $R \sim 3$ Мпк $\sim 10^{25}$ см уже $W \sim 10^{48}$ эрг и $L \sim 10^{46}$ эрг/с. Наконец, для самых далеких возможных источников (типа коллапсирующих галактических ядер) $R \sim 10^{28}$ см, $W \sim 10^{54}$ эрг $\sim M_{\odot} c^2$ и $L \sim 10^{52}$ эрг/с. Напомним, что полная мощность электромагнитного излучения (светимость) Солнца $L_{\odot} = 3,8 \cdot 10^{33}$ эрг/с, и, следовательно, источники обнаруженных гамма-всплесков очень мощны даже по космическим масштабам.

К настоящему времени получен, естественно, ряд новых данных о гамма-всплесках [111]. Тем не менее вопрос об их природе и источниках остается открытым. Вероятнее всего, однако, эти всплески образуются в Галактике и как-то связаны со звездами, в частности нейтронными звездами и, более конкретно, пульсарами.

Изучение гамма-всплесков за последние 2—3 года оказалось в известном смысле в тени в связи с открытием несравненно более частых рентгеновских всплесков (первые публикации на эту тему появились в 1975 г.; обзор

см. в [133]). Источники рентгеновских всплесков, несомненно, находятся в Галактике, поскольку они концентрируются вблизи галактической плоскости. Вероятно, рентгеновские всплески связаны с нерегулярностью аккреции плазмы на нейтронные звезды (и, быть может, также на белые карлики и «черные дыры»); какую-то роль могут играть и термоядерные реакции, идущие в веществе, упавшем на нейтронные звезды [133]. Не исключено, что гамма-всплески по своей природе не отличаются от рентгеновских всплесков и образуются в тех случаях, когда энергия излучаемых фотонов особенно велика — лежит уже в гамма-диапазоне (напомним, что гамма-всплески наблюдаются в области мягкого гамма-излучения с энергией преимущественно всего в сотни кэВ). Такая гипотеза встречает, однако, некоторые возражения, по крайней мере в отношении большинства источников рентгеновских всплесков (их известно уже несколько десятков). Открытие гамма- и рентгеновских всплесков, наряду с обнаружением рентгеновских пульсаров, можно считать крупнейшими достижениями в области наблюдательной астрономии после открытия радиопульсаров в 1967—1968 гг.

Если у читателей в результате всего сказанного не сложилось впечатление, что развитие астрофизики высоких энергий представляет захватывающий интерес, то автору придется признать свое неумение отразить своеобразие, значительность и перспективность этой новой области астрономии. Откровенно говоря, надеюсь, что этого не произошло.

§ 23. Нейтринная астрономия

Гипотеза о существовании нейтрино была высказана Паули в 1931 г. Только через четверть века — срок немалый в наше бурное время — нейтрино удалось зарегистрировать вблизи ядерных реакторов. Естественно, возник и такой вопрос: нельзя ли также зарегистрировать нейтрино внеземного происхождения?

Поскольку источниками звездной энергии являются ядерные реакции, совершенно очевидно, что нейтрино должны испускаться всеми звездами. В первую очередь речь идет, конечно, о Солнце (расстояние от Земли до

Солнца составляет $1,5 \cdot 10^{13}$ см, а до ближайших звезд оно порядка $4 \cdot 10^{18}$ см; отсюда ясно: при прочих равных условиях поток солнечных нейтрино должен быть в 10^{11} раз больше их потока от ближайших звезд). Попытки детектировать солнечные нейтрино путем использования ядерной реакции $^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$ (ν_e — электронное нейтрино и e^- — электрон) были начаты десять лет назад [128, 139], но долгое время не приводили к положительным результатам. Конкретно, ожидалось, что регистрируемый поток нейтрино достигает десятка SNU — солнечных нейтринных единиц (при потоке в 1 SNU 10^{36} ядер ^{37}Cl захватывают в среднем одно нейтрино в секунду). По современным данным [140], поток регистрируемых хлорным детектором нейтрино от Солнца должен составлять 4,7 SNU (для так называемых стандартных моделей Солнца). Между тем наблюдался явно меньший поток, который в пределах ошибок наблюдения может даже равняться нулю. Это породило повышенный интерес к проблеме и целый ряд гипотез и домыслов. Между тем для далеко идущих выводов никогда не было оснований, поскольку хлорный детектор эффективно регистрирует лишь нейтрино с довольно высокой энергией (большей 0,81 МэВ), образующиеся в основном лишь в ходе редкой для солнечных недр реакции радиоактивного распада ядра ^8B . Поток таких нейтрино весьма чувствителен к температуре в глубине Солнца и вообще к выбору солнечных моделей. Правда, меньше примерно 0,5—1 SNU и, особенно, меньше 0,25 SNU хлорный детектор не должен регистрировать даже при далеко идущих предположениях о строении Солнца. Если бы поток оказался ниже указанного предела, пришлось бы допустить, что Солнце нестационарно (в частности, что его температура в центральной области колеблется и в настоящее время ниже, чем в моделях стационарного Солнца) или же что нейтрино нестабильны (т. е. заметно распадаются за те 8 мин, в течение которых они движутся от Солнца к Земле); высказывались и еще более радикальные гипотезы [140, 141].

С какой-то точки зрения это был бы самый интересный случай, но вряд ли мы действительно сталкиваемся здесь с чем-то принципиально новым. В самом деле, последние данные [140] свидетельствуют о том, что поток солнечных

нейтрино зарегистрирован и равен $(1,6 \pm 0,4)$ SNU. Конечно, такая точность недостаточна, но вполне совместима с потоком, лишь в 2—3 раза меньшим «стандартного» потока в 4,7 SNU. Подобное расхождение может оказаться следствием каких-то не слишком глубоких причин. Однако вопрос еще не только не снят с повестки дня, но и остается животрепещущим.

Работа с хлорными детекторами будет продолжена [140], но должна быть дополнена измерениями с помощью других детекторов, в первую очередь из ${}^7\text{Li}$ и, особенно, из ${}^{71}\text{Ga}$. Изотоп ${}^{71}\text{Ga}$ поглощает нейтрино с энергией, превышающей всего лишь 0,23 МэВ, причем превращается в ${}^{71}\text{Ge}$. Поэтому галлиевый детектор сможет регистрировать основную часть испускаемых Солнцем нейтрино, образующихся при реакции $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$ и обладающих энергией, достигающей 0,42 МэВ. Поток таких нейтрино в хорошем приближении определяется светимостью Солнца и, следовательно, уже не зависит от модели Солнца (в предположении, что поток стационарен). Отделение германия от галлия вполне осуществимо, и, таким образом, галлиевый детектор (он должен весить 20—40 т) очень перспективен [140].

Зарождение нейтринной астрономии — большое событие, поскольку прием нейтрино — это единственный известный способ заглянуть в центральные области звезд. Однако надеяться на возможность приема нейтрино от «обычных» звезд (кроме Солнца) в обозримое время довольно трудно. Другое дело — вспышки сверхновых звезд и образование нейтронных звезд *): при этом могут возникать мощные потоки нейтрино [128, 139, 140]. То же можно сказать о пока еще несколько гипотетических событиях — коллапсе сверхмассивных звезд (в том числе галактических ядер). Наконец, исключительно важно было бы зарегистрировать нейтрино, образовавшиеся на ранних стадиях эволюции Вселенной [93б, 139, 140]. К сожалению, перспективы здесь пока не слишком радужные (чувствительность известных детекторов нужно повысить на несколько порядков величины). Однако как раз

*) Это не одно и то же, поскольку вспышка сверхновой может приводить также к образованию белого карлика, сколлапсировавшего объекта («черной дыры») или полному исчезновению звезды.

в отношении перспектив усовершенствования методов измерений пессимизм, как нас учит история физики и астрономии, меньше всего оправдан. К тому же существующие оценки потока «космологических» нейтрино могут оказаться заниженными. Ко всем этим направлениям нейтринной астрономии примыкают уже упоминавшиеся в § 13 (см. [72, 140, 142]) исследования нейтрино высоких энергий.

Итак, нейтринная астрономия «стучится в дверь», она представляет собой одну из самых интересных новых областей научных исследований, обещающую принести ценные результаты, а быть может, и открытия.

§ 24. О современном этапе развития астрономии

Только за 15—20 последних лет в астрономии сделано несколько открытий первостепенного значения (квазары, реликтовое тепловое излучение, рентгеновские «звезды», космические мазеры на линиях молекул OH, H₂O и других молекул, пульсары, рентгеновские и гамма-всплески), не говоря уже о многих крупных достижениях несколько меньшего масштаба. Если отнести к астрономии также часть достижений в области космических исследований (изучение Луны и планет), то победное шествие астрономии в наши дни станет еще более впечатляющим.

Различные научные направления, если говорить о качественной стороне дела, развиваются неравномерно. Конкретно, можно констатировать, что астрономия после второй мировой войны вступила в период особенно блистательного развития, в период «второй астрономической революции» (первая такая революция связывается с именем Галилея, начавшего использовать телескопы). Об этом автору (как и многим другим) не раз уже приходилось писать [143], но астрофизическую часть настоящей книжки также кажется необходимым закончить несколькими замечаниями на этот счет.

Во-первых, успехи астрономии, несомненно, обусловлены развитием физики и космической техники, позволившим создать и использовать фантастически чув-

ствительную аппаратуру *), а в ряде случаев и поднимать ее за пределы атмосферы. Во-вторых, содержание второй астрономической революции можно видеть в процессе превращения астрономии из оптической во всеволновую. В-третьих, как ни замечательны последние астрономические открытия, они еще не вывели нас за пределы известных физических представлений и законов, не заставили что-либо пересмотреть в фундаменте физики.

Второе и третье утверждения разделяются не всеми. Так, приходится сталкиваться также с мнением, что главная черта современного этапа развития астрономии — появление новых представлений, переворот во взглядах. Между тем, полностью отдавая дань перечисленным последним открытиям в астрономии, никак нельзя считать их более глубокими и значительными, чем открытие расширения Вселенной и выяснение ее характерных масштабов (время $T \sim 10^{10}$ лет, расстояние $R \sim cT \sim 10^{28}$ см). Сделано же это было в основном в двадцатые годы нашего века. Таким образом, содержание второй астрономической революции, если вообще пользоваться таким термином, можно видеть только в превращении астрономии из оптической во всеволновую. Что касается вопроса о том, породила ли астрономия за последний период «новую физику», то в § 20 было упомяну-

*) В качестве примера приведу эпизод, который произвел на меня впечатление, хотя к тому времени я уже много лет занимался радиоастрономией. На небольшой выставке, устроенной на радиоастрономической обсерватории вблизи Кембриджа (Англия), посетителей приглашали к стенду, где лежали небольшие белые листки бумаги. Взяв листок и перевернув его, посетитель видел такую надпись: «Взяв со стола этот листок бумаги, Вы затравили больше энергии, чем та энергия, которую за всю историю радиоастрономии приняли все существующие во всем мире радиотелескопы».

Плотность потока (точнее, спектральную плотность потока) радиоизлучения принято измерять в единицах 10^{-23} эрг/(см²·с·Гц) = 10^{-26} Вт/(м²·Гц). При такой плотности потока в полосе шириной $\Delta\nu = 10^{10}$ Гц на площадь в 1 км² = 10^{10} м² за 1 год = $3 \cdot 10^7$ с поступает энергия, равная $3 \cdot 10^4$ эрг = $3 \cdot 10^{-3}$ Дж. Источники, поток от которых равен единице (и даже на 2—3 порядка слабее), уже обнаруживаются существующей аппаратурой. Однако обычно работа ведется с источниками раз в 10 мощнее, причем полное их число измеряется всего лишь сотнями. Сказанное позволяет убедиться в правильности приведенного примера и делает более осязаемым утверждение о поразительной чувствительности радиоаппаратуры.

то о наличии здесь разных мнений, а также был до известной степени мотивирован отрицательный ответ на этот вопрос.

Что будет дальше, какова тенденция развития астрономии? Пытаться дать ответ на такие вопросы очень рискованно. Но лучше ошибиться, чем молчать из осторожности. Поэтому позволю себе сделать некоторый прогноз, впрочем, отнюдь не претендующий на оригинальность.

Можно думать, что довольно скоро (скажем, к 1985 г.) вторая астрономическая революция завершится — астрономия станет всеволновой, а те открытия, которые в каком-то смысле «лежали на поверхности», будут сделаны. После этого должен, казалось бы, наступить более мирный период (речь идет об изучении далеких объектов; исследования планет и захватывающей проблемы внеземных цивилизаций [144] мы здесь не касаемся). Другими словами, пройдет героический период и развитие астрофизики (пусть лишь на время) выйдет на некоторое плато. Впрочем, нельзя не отметить, что у астрономии имеются богатые резервы, связанные с возможностью расцвета нейтринной астрономии и астрономии гравитационных волн, а также с созданием гигантских радиотелескопов в космосе.

Наконец, главный вопрос (по крайней мере главный с точки зрения физиков): приведет ли астрономия к столь желанному для ряда ее представителей изменению каких-либо фундаментальных физических представлений? Примерами таких изменений могли бы явиться необходимость введения скалярного поля в релятивистскую теорию тяготения, отказ от законов сохранения барионного и лептонного зарядов, обнаружение изменения физических констант со временем [145] *) или отклонений от извест-

*) Особенно интересен в этом плане вопрос о возможности того, что от времени зависит гравитационная постоянная G [146]. Вселенная нестационарна (расширяется), и вместе с тем ее динамика определяется гравитационным взаимодействием. Поэтому предположение о зависимости этого взаимодействия от времени хотя и ни в какой мере не обязательно (как с логической точки зрения, так и на основе имеющихся данных экспериментов и наблюдений), но по крайней мере не кажется совершенно беспочвенным. Так или иначе, решающее слово здесь принадлежит измерениям, причем общая теория относительности может быть поло-

ных физических законов при больших плотностях внутри или вблизи огромных масс (ядра галактик, квазары, нейтронные звезды) и т. п.

Поиски новых фундаментальных идей и представлений в астрономии (включая космологию) заслуживают, конечно, самого пристального внимания, но по самой сути дела предвидеть здесь ничего не дано. Таким образом, поставленный выше «главный вопрос», по существу, остается без ответа. Могу лишь отметить, что сам я несколько не был бы удивлен (и, более того, склонен верить именно в такую возможность), если бы «новая физика» в астрономии понадобилась (и появилась, так сказать, на астрономической почве) только вблизи классических сингулярностей, т. е. оказалась существенной лишь в космологии и для понимания заключительной фазы гравитационного коллапса, а также, для «прогнозирования» далекого будущего Вселенной [154].

Вполне может оказаться, что это не так, что астрономические открытия обогатят сам фундамент физики и в других отношениях, и в других «местах». Здесь отстаивается лишь тезис, что такой ответ вовсе не обязателен и ссылок на общие соображения, историю и известные сейчас факты в этом отношении еще совершенно недостаточно.

жена в основу космологических исследований, только если $\frac{1}{G} \left| \frac{dG}{dt} \right| < 10^{-11}$ год⁻¹. (Точность измерений пока еще недостаточна для надежного установления такого предела, но приближается к нему.) Определить dG/dt (или найти верхний предел для этой величины) можно в результате наблюдения орбит естественных и искусственных планет и их спутников, а также с помощью высокочувствительных гравиметров [146в]. Впрочем, широко обсуждаемая в последнее время (см., например, [156]) возможность нестабильности протонов (время жизни $\tau_p > 10^{30}$ лет) отнюдь не менее животрепещуща и важна, чем вопрос о переменности G .

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

§ 25. Несколько замечаний о характере развития науки

Наука занимает весьма значительное место в современном мире. В частности, с научной деятельностью в той или иной степени связаны уже миллионы людей. Естественно поэтому, что и сама наука — характер ее развития и различные особенности — стала объектом большого числа статей и исследований, которые часто относятся к «науке о науке» (или науковедению), а также к методологии и истории науки. Правда, насколько я могу судить, активно работающие физики и астрономы (и, вероятно, представители других естественнонаучных дисциплин) сравнительно мало интересуются науковедением и историей науки. В известной мере это понятно, поскольку каждая конкретная проблема, скажем, в области физики твердого тела, для специалиста достаточно резко очерчена и изолирована от общего мирового потока научных исследований и их истории. Вместе с тем, не говоря уже о том, что многие науковедческие и историко-научные вопросы весьма любопытны, они неизбежно возникают перед всеми, кто задумывается о будущем науки и путях ее развития как «в целом» (в мировом масштабе), так и в более узких рамках (скажем, в условиях СССР). Один из широко дебатированных вопросов науковедения — структура научных революций и, собственно, само понятие о научной революции. Мы уже коснулись этой темы в предыдущем § 24, а подробнее мнение автора на этот счет изложено в статье [147], в значительной мере посвященной критике весьма известной книги Т. Куна «Структура научных революций». Однако споры о том, что такое научная революция, представляются в целом несколько схоластическими и, во всяком случае, не имеют особого значения в рамках настоящей книжки.

Напротив, как мне кажется, здесь будет уместно сделать несколько замечаний, касающихся темпов роста науки.

Темп развития науки как в целом, так и в отношении широких дисциплин (физика, математика, биология и т. д.) уже лет 300 отличается довольно большим постоянством и характеризуется приростом на 5—7% в год. Это означает, что различные научные «показатели» или «продукты» — число научных работников, количество статей, число журналов и т. п. — возрастают по экспоненциальному закону

$$y_i(t) = y_i(0) e^{t/T_i}; \quad (22)$$

здесь $y_i(t)$ — количество рассматриваемого «продукта» (скажем, число физических журналов) в момент t , $y_i(0)$ — количество того же «продукта» в момент $t=0$ (т. е. в момент, принимаемый за начало отсчета времени) и T_i — время, за которое «продукт» возрастает в $e=2,72\dots$ раза. Прирост на 7% в год означает, для примера, что характерное время $T_i=15$ лет — «продукт» за 15 лет возрастет в 2,72 раза, за 30 лет — в 7,4 раза, за 60 лет — примерно в 50 раз и за 120 лет — уже в 2500 раз. Справедливость в большом числе случаев (хотя и далеко не всегда) экспоненциального закона развития (22) вполне естественна: это означает, что прирост продукта dy_i за некоторое небольшое время dt , близкое к моменту t , пропорционален количеству «продукта» в момент t , т. е.

$$dy_i = \frac{y_i(t)}{T_i} dt.$$

При отсутствии ограничивающих факторов так и происходит, например, с количеством публикаций и с числом научных работников: чем их больше, тем больше они готовят себе подобных и больше пишут статей. Несмотря на то, что экспоненциальная зависимость хорошо известна и весьма проста, к ней как-то трудно «привыкнуть», полностью осознать ее следствия. Поскольку в развитых странах продолжительность «жизни» одного поколения составляет около 30 лет (примерно такова, например, средняя разница в возрасте между родителями и детьми), то при экспоненциальном росте с $T_i=15$ лет за время

деятельности лишь одного поколения ученых их число возрастает в 7,4 раза, и за всю предыдущую историю рода человеческого было произведено научного «продукта» в $\frac{y_i(2T_i) - y_i(0)}{y_i(0)} = 6,4$ раза меньше, чем за последний период в 30 лет. Другой пример: около 90% всех ученых, работавших на земном шаре во все времена, живы в настоящее время*). Или вот такой конкретный факт: в 1913 г. в России было менее 12 тыс. научных работников, численность же их в СССР в середине настоящего десятилетия составляла около 1,2 млн. человек, т. е. за 60 лет возросла в 100 раз. Если бы такой темп роста продолжался еще 60 лет, то почти треть населения СССР должна была бы стать научными работниками.

Совершенно очевидно, что это невозможно и, несомненно, раньше или позже развитие науки или, по крайней мере, рост количества научных работников и некоторых других «показателей» должен замедлиться или даже выйти на режим насыщения. В развитых странах эффект насыщения в развитии науки чувствуется в известных отношениях уже и сегодня. С другой стороны, требования к науке, предъявляемые жизнью, техникой, всем обществом, отнюдь не снижаются. Таким образом, возникает известное противоречие между необходимостью замедлить темп роста числа ученых и требованиями к самой науке.

Выход из положения можно видеть, разумеется, только в одном — в повышении эффективности научной работы. Однако решение такой задачи сталкивается с трудностями принципиального характера. В самом деле, возможности повышения производительности труда в промышленности и в сельском хозяйстве почти безграничны или, по крайней мере, огромны. В области же творческой деятельности, в частности творческой научной деятельности, аналогичных возможностей явно

*) Этот известный пример был приведен и в моей статье [147]. И вот что любопытно и показывает, сколь на самом деле нелегко воспринять тяжелую поступь экспоненциального закона: то ли корректор, то ли кто-то еще так и не поверил в то, что 90% ученых живы в настоящее время, и в тексте статьи поставил слово «живы» в кавычки (!). Другие примеры, свидетельствующие о трудности «воспринять» экспоненциальный закон, приведены в статье [155].

нет. Конечно, практически еще очень многое можно сделать, улучшая условия работы в научных учреждениях и, что более принципиально, широко используя вычислительные машины. Но все равно в науке «узким местом» остается сам человек. Рассчитывать на то, что человек за десятилетия изменится (в смысле возрастания его способностей), конечно, не приходится. Но здесь нужно сделать одну оговорку. Известны случаи, когда у людей наблюдалась феноменальная память или способность исключительно быстро производить в уме довольно сложные математические операции. Поскольку речь при этом идет не об инопланетянах, а о людях, в других отношениях таких же, как и все мы, обнаружение феноменальных способностей свидетельствует об огромных резервах, тающихся в человеческом мозге. Такой вывод подтверждается и другими аргументами. Наличие больших резервов мозга представляется естественным результатом биологической эволюции — мозг, как и другие органы тела, должен работать надежно и, значит, обладать большим «запасом прочности». Но в наше время вполне разумно, по-видимому, ставить вопрос о мобилизации резервов мозга и их использовании для повышения эффективности творческого труда. Нелегко сказать, в какой мере здесь можно ожидать практических результатов, но, вторгаясь в чужую область, позволю себе отнести вопрос о мобилизации ресурсов мозга к числу особенно важных и интересных проблем биологии.

В заключение — об одном психологическом «эффекте», вызванном быстрым ростом числа ученых. В силу такого роста средний возраст научных работников сравнительно невелик. Точной цифры я не знаю, но, вероятно, средний возраст физиков не превосходит 35—40 лет. Человеку 35-летнего возраста все, что было лет 30 и более назад, кажется чем-то доисторическим, а в области науки представляется предысторией многое, происшедшее лет 15 назад и более, т. е. до начала активной профессиональной работы (нужно бы здесь сделать ряд оговорок, но, надеюсь, и так ясно, что имеется в виду). Следствием такой ситуации является широко распространенная в научных кругах переоценка темпов развития науки. Конкретно, молодому человеку кажется, что 10, 15 и уже давно 25 лет — это очень длительный срок не только

в человеческой жизни, но и в науке. Последнее же справедливо лишь в весьма ограниченном смысле. Достаточно напомнить, что специальной теории относительности более 70 лет, общей теории относительности уже более 60 лет, нерелятивистская квантовая механика создана 50 с небольшим лет назад, сверхпроводимость была открыта в 1911 г., а космические лучи открыты в 1912 г. И несмотря на шесть с лишним десятилетий, и сверхпроводимость, и космические лучи остаются в центре внимания, а их исследование в тех или иных аспектах упомянуто в нашем списке важнейших и интереснейших проблем современных физики и астрофизики (см. §§ 2 и 22). Более того, история этих двух направлений, с которыми я достаточно хорошо знаком, свидетельствует о том, что для решения некоторых возникших вопросов приходилось ждать и 25, и 45 лет (достаточно напомнить, что микроскопическая природа сверхпроводимости была выяснена лишь в 1957 г.).

Какую мораль автор хотел бы извлечь из сказанного? Только ту, что не нужно ждать переворотов в науке не только каждый год, но и каждое десятилетие. Например, за пять последних лет, отделяющих настоящее издание книжки от предыдущего, в области физики и астрофизики достигнут, разумеется, немалый прогресс, но не приходится говорить о переворотах.

Что произойдет до 1 января 2001 г., когда начнется XXI век? Ждать осталось ведь всего два десятилетия. Для сегодняшних школьников это очень много, но для людей, работающих уже лет 40, это совсем не такой длительный срок — достаточно вспомнить путь, пройденный, скажем, с 1955 или 1960 г. (Разве тогда физика была существенно иной, чем сегодня?)

У автора этой книжки мало шансов увидеть начало следующего века и еще меньше шансов находиться тогда в форме, позволяющей правильно оценивать состояние науки. Но подавляющее большинство читателей, как я надеюсь, встретит XXI век в расцвете сил. И мне хотелось бы, чтобы они подумали тогда о том, как следовало бы изменить список «особенно важных и интересных проблем» физики и астрофизики. Я не был бы удивлен, если бы добрая половина проблем, фигурирующих в нашем списке, сохранилась и в списке 2001 года.

§ 26. Вместо заключения

Выше было затронуто много тем, много проблем. Подвести здесь какие-то итоги вряд ли возможно, да и нужно ли? Так или иначе, не будем пытаться это сделать и ограничимся лишь еще несколькими замечаниями общего характера, рассчитанными на так называемых неискушенных читателей.

История науки сплошь пестрит неверными прогнозами. В качестве иллюстрации приведем такой пример. 11 сентября 1933 г. на съезде Британской ассоциации содействия развитию науки (аналог нашего общества «Знание») выступил Резерфорд, как известно, открывший атомные ядра и их расщепление. Резерфорд в своей речи заявил, однако (это было широко освещено в газетах), что «всякий, кто ожидает получения энергии в результате трансформации атомов, говорит вздор». Иными словами, Резерфорд отрицал реальность использования атомной (ядерной) энергии. В этом он был не одинок и совершенно прав в том смысле, что в 1933 г. действительно не было видно никакого пути для использования ядерной энергии. Однако всего через пять лет ситуация полностью изменилась — было открыто деление урана, а через девять лет (в 1942 г.) заработал первый атомный котел.

Этот пример и другие, аналогичные ему, могут породить глубокое недоверие ко всякому планированию и прогнозированию в науке. В частности, становится сомнительной сама возможность говорить о каких-то «особенно важных», но еще совсем нерешенных проблемах. В этой связи, как мне кажется, уместно подчеркнуть следующее. В науке, когда речь идет о фундаментальных исследованиях, планирование и прогнозирование в смысле указания каких-то сроков во многих случаях (и даже как правило) действительно не представляется возможным. Когда, например, будет открыта высокотемпературная сверхпроводимость? В согласии со сказанным в § 2 мой ответ на поставленный вопрос был бы таким: может быть, высокотемпературная сверхпроводимость уже открыта в какой-то лаборатории (но мы еще об этом не знаем), может быть, она будет открыта завтра, а может быть, подобное явление существовать вообще не может и,

следовательно, никогда не будет открыто. Иными словами, срок (время) научного открытия или решения научной проблемы есть понятие «неустойчивое», и обычно им лучше вообще не пользоваться.

Совсем другое дело сама проблема! После обнаружения дефекта масс в атомных ядрах стало ясно, что эти ядра являются кладовыми энергии. Так в двадцатые годы возникла проблема ядерной (атомной) энергии. Естественно, такую проблему нужно было бы упоминать в любом разумном списке «важнейших физических проблем» вплоть до начала сороковых годов, когда она оказалась решенной, просуществовав около 20 лет. Вообще, научная проблематика, как таковая, представляется довольно устойчивым понятием.

Таким образом, нет оснований возражать против планирования и прогнозирования и в области фундаментальных научных исследований, если только понимать под этим выявление стоящих на повестке дня проблем, предварительную оценку их потенциальной значимости и т. п., но не указание «сроков исполнения» (мы не касаемся здесь, конечно, сроков пуска каких-то установок и т. д.).

Даже с учетом сказанного любой список «особенно важных и интересных проблем» условен и не абсолютен. Совершенно очевидно, в частности, что различные «важные» проблемы не равноценны и трудносопоставимы, а их список должен изменяться со временем. Если бы, например, был получен хотя бы один сверхпроводник с комнатной критической температурой и было понятно, за счет каких факторов это достигнуто, то проблему высокотемпературной сверхпроводимости, скорее всего, можно было бы из нашего списка исключить. Так же нужно поступить, если получится отрицательный ответ на поставленный вопрос, скажем, выяснится, что высокотемпературные сверхпроводники нельзя создать или что долгоживущих сверхтяжелых ядер не существует.

Далее, во избежание недоразумения, следует еще раз подчеркнуть, что заниматься вопросами, не включенными в наш список, также совершенно необходимо. Не говоря уже об отсутствии сколько-нибудь жестких перегородок между множеством различных физических и технических вопросов, исследований и разработок, до-

статочно вспомнить о том, как рождается новая «особенно важная» проблема. В большинстве случаев ее родителями, как и источниками открытий, являются «рядовые» проблемы, подобно тому как гении рождаются у обыкновенных родителей. Вряд ли кто-либо назвал бы в тридцатые годы особенно важным изучение люминесценции жидкостей под влиянием гамма-лучей. Но именно на этом пути был открыт эффект Вавилова — Черенкова. То же можно сказать об эффекте Мёссбауэра, о ряде последних астрономических открытий (например, об обнаружении пульсаров) и т. д.

Иными словами, многие замечательные открытия и научные достижения оказываются непредвиденными и неожиданными.

В общем, если определенная концентрация внимания на известных «особенно важных проблемах» сегодняшнего дня естественна и разумна, то это никак не должно приводить к забвению других направлений, к негармоничному развитию физики и астрофизики в целом *).

Более того, если выделение «особенно важных и интересных проблем» даже в целом содержит, как уже подчеркивалось, немалую условность — не может быть однозначным, четким и определенным, — то последнее утверждение и подавно справедливо в применении к частным случаям, к отдельным людям и небольшим коллективам. Если, например, физик обнаружил (на эксперименте или «на кончике пера») какой-то новый эффект или придумал новый метод измерений, то для него, естественно, этот эффект или метод на некоторое время становятся особенно важными и интересными. При этом принадлежность проблемы к числу модных или фигурирующих в каких-то «списках», как правило, не имеет существенного значения. Позволю себе здесь сослаться и на собственный опыт. Хотя я давно стал и остаюсь адвокатом известного выделения ведущих проблем и т. п.,

*) Обеспечить гармоничное развитие — задача, конечно, очень не простая. Анализом этой проблемы в применении к США занимались специальные комиссии (физическая и астрономическая), образованные Американской национальной академией наук. Соответствующие отчеты содержат интересный материал [148] (о путях развития физики в США см. также статью [149]).

но отнюдь не занимаюсь сам (и не советую заниматься связанным со мной коллегам) только или даже в основном такими проблемами. Важное и интересное для себя лично физик может найти и фактически находит во многих задачах разных рангов, что не противоречит выделенности ряда проблем с точки зрения развития физики в целом.

Наконец, о «человеческом факторе» в еще более непосредственном смысле этого понятия.

Естественные науки имеют своей целью изучение природы, многочисленных объектов и процессов, управляющих ими законов. В этом отношении, скажем, физика совершенно не зависит, выражаясь философским стилем, от познающего субъекта. Но наукой занимаются именно эти субъекты — люди, причем их сейчас уже миллионы. Некоторые научные исследования требуют больших средств, связаны с экономикой, с промышленностью и т. д. и т. п. Все это приводит к тому, что развитие науки окрашено в человеческие тона, связано и переплетено с политикой, экономикой, техникой, социологией, психологией. Такие связи часто сложны, трудно поддаются анализу, недостаточно ясны. В результате им уделяется, по крайней мере в научной литературе, относительно очень мало внимания. Стремление (в значительных пределах вполне оправданное и естественное) освободить и отделить собственно науку, ее содержание, от всех надстроек, связей и лесов сильно повлияло на формирование научного стиля, на то, как пишутся книги и статьи. Далеко не самый важный, но характерный пример — изгнание из научной литературы личного местоимения «я». Например, автор настоящей книжки в научной статье просто не может написать «я», а выше иногда буквально заставлял себя это делать, ибо писать без конца «мы», «как нам кажется» и «по нашему мнению» тоже как-то странно, а быть может, и смешно, когда речь идет о попытке популярного изложения.

Но от того, что все личное, «человеческое», не относящееся к делу стараются скрыть от глаз, чтобы оно не мешало сосредоточиться на самой науке, значение этого «человеческого» в процессе научной деятельности отнюдь не уменьшается. Если бы невидимка, вооруженный магнитофоном, побывал в научной или студенческой среде,

то, вероятно, не более половины магнитофонной ленты было бы занято разговорами о самой науке.

Какую выбрать специальность или специализацию, чем заняться, какая область или научное направление перспективны, что сегодня особенно важно, интересно, привлекательно (а то и выгодно, удобно и т. п.)? Эти вопросы широко обсуждаются и не могут не обсуждаться.

Единственным стимулом написать эту книжку явилась мысль: сколько есть интересного в разных областях физики и астрофизики, а многие молодые физики или будущие физики об этом не знают, и им нелегко это узнать. Возник вопрос, а нельзя ли здесь сделать что-либо позитивное, хотя бы кратко перечислив и прокомментировав некоторые животрепещущие проблемы физики и астрофизики. Но затем, как часто бывает, все начало усложняться, ибо оказалось неясным, что и как отбирать и и упоминать, на кого рассчитывать и, наконец, кому все это нужно. Это трудные вопросы, о них уже шла речь в предисловии и во введении, и, заканчивая книжку, которая уже несколько раз переделывалась, я все равно не могу дать на них ясный и четкий ответ. Отсюда многочисленные оговорки, боязнь, что тебя не так поймут, делают неверные выводы.

Среди возможных неверных выводов самый, пожалуй, необоснованный и беспочвенный — это подозрение в том, что автор пытается кого-то поучать, навязывать свое мнение о том, что «важно и интересно» и что не важно и не интересно. Напротив, совершенно несомненно, что в таком деликатном деле неизбежны расхождения во мнениях, должны возникать разные взгляды и суждения. Поэтому прийти к какой-то более или менее общей позиции и тем самым принести пользу развитию науки можно только в результате коллективного обсуждения аргументов и контраргументов, путем выявления неясных и дискуссионных вопросов и попыток как-то в спорах родить истину или хотя бы приблизиться к ней. Нужно, правда, добавить, что споры бывают разные и речь не идет о спорах с теми (а таких людей, к сожалению, не так уж мало), для кого всякий оппонент и научный противник — это враг, которого желательно оскорбить, унижить и, если можно, заставить замолчать. Разумеется, я призываю

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

к обсуждению и спорам о путях развития науки, о важном и интересном в науке не со скрежетом зубным, а в атмосфере терпимости и доброжелательности. Конкретно, хочу закончить призывом к коллегам — к физикам и астрофизикам: «не проходите мимо» и почаще высказывайте свои взгляды по общим вопросам развития науки. Помимо всего прочего, только тогда широкие круги читателей смогут познакомиться с разными мнениями и сделать для себя действительно обоснованные выводы.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА *)

1. а) Гинзбург В. Л. Теоретическая физика и астрофизика.— М.: Наука, 1975.
- б) Гинзбург В. Л., Цытович В. Н.— УФН, 1978, т. 126, с. 553.
2. Дайсон Ф.— УФН, 1971, т. 103, с. 529 (Physics Today, 1970, v. 23, № 9, p. 23).
3. а) Природа материи. Цели физики высоких энергий.— УФН, 1965, т. 86, с. 591; Марков М. А.— УФН, 1973, т. 111, с. 719.
- б) Марков М. А. О природе материи.— М.: Наука, 1976.
4. Anderson P.— New Scientist and Sci. J., 1971, v. 51, p. 510; Арцимович Л. А.— Природа, 1972, № 9, с. 2.
5. Phillips J. C.— Comm. Solid State Phys., 1972, v. 4, p. 91.
6. Рабинович М. С.— В сб.: Школьнику о современной физике.— М.: Просвещение, 1974, с. 111; Новости термоядерных исследований в СССР; Информационные бюллетени ИАЭ им. И. В. Курчатова; Stickley C. M.— Physics Today, 1978, v. 31, № 5, p. 50; Arnold R. C.— Nature, 1978, v. 276, p. 19; Physics Today, 1979, v. 32, № 5.
7. Гинзбург В. Л.— УФН, 1968, т. 95, с. 91; 1970, т. 101, с. 185; 1976, т. 118, с. 315 (см. также популярное изложение в журнале «Природа», 1969, № 7, с. 11).
8. Проблема высокотемпературной сверхпроводимости / Под ред. В. Л. Гинзбурга, Д. А. Киржница. М.: Наука, 1977.
9. а) Phillips J. C.— Phys. Rev. Lett., 1972, v. 29, p. 1551.
- б) Cohen M. L., Anderson P. W.— Superconductivity of *d*- and *f*-Band Metals: AIP Conference, Rochester, 1971.— N.Y.: 1972, p. 17.
10. Киржниц Д. А.— УФН, 1976, т. 119, с. 357; Долгов О. В., Максимов Е. Г.— Письма ЖЭТФ, 1978, т. 28, с. 3.
11. Брандт Н. Б., Кувшинников С. В., Русаков А. П., Семенов М. В.— Письма ЖЭТФ, 1978, т. 27, с. 37.

*) В тексте было затронуто столь большое количество вопросов, что попытка снабдить книжку сколько-нибудь подробной библиографией была бы совершенно нереальной. Поэтому список литературы имеет лишь весьма ограниченное значение и в нем приводятся в первую очередь обзоры (преимущественно опубликованные в журнале «Успехи физических наук»). Кроме того, цитируются отдельные статьи и заметки, оказавшиеся в поле зрения автора в процессе работы над рукописью. Именно в результате такого подхода, а не в силу каких-либо претензий, в списке литературы фигурирует относительно большое количество статей самого автора.

12. *Chu C. W., Rusakov A. P. et al.*—Phys. Rev., 1978, v. B 18, p. 2116.
13. *Волков Б. А., Гинзбург В. Л., Копаев Ю. В.*—Письма ЖЭТФ, 1978, т. 27, с. 221; *Волков Б. А., Копаев Ю. В., Тугушев В. В.*—Письма ЖЭТФ, 1978, т. 27, с. 615; 1979, т. 30, с. 317; *Гинзбург В. Л.*—Письма ЖЭТФ, т. 30, с. 345.
14. *Степанов А. В.*—ФТТ, 1959, т. 1, с. 671.
15. *Schneider T.*—Helv. Phys. Acta, 1969, v. 42, p. 957.
16. *Бровман Е. Г., Каган Ю. М., Холас А.*—ЖЭТФ, 1971, т. 61, с. 2429; 1972, т. 62, с. 1492; см. также ЖЭТФ, 1977, т. 73, с. 967.
17. *Гинзбург В. Л.*—УФН, 1969, т. 97, с. 601.
18. а) *Salpeter E. E.*—Phys. Rev. Lett., 1972, v. 28, p. 560; *Charline G. F.*—Phys. Rev., 1972, v. B 6, p. 2067.
б) *Harris F. E., Delhalle J.*—Phys. Rev. Lett., 1977, v. 39, p. 1340; *Авилов В. В., Иорданский С. В.*—ФТТ, 1977, т. 19, с. 3516.
19. а) *Верещагин Л. Ф., Яковлев Е. Н., Тимофеев Ю. А.*—УФН, 1975, т. 117, с. 183; Письма ЖЭТФ, 1975, т. 21, с. 190.
б) *Нашке R. S. et al.*—Phys. Rev. Lett., 1978, v. 41, p. 994; *Григорьев Ф. В., Кормер С. Б. и др.*—ЖЭТФ, 1978, т. 75, с. 1683; *Стишев С. М.*—УФН, 1979, т. 127, с. 719.
20. *Келдыш Л. В.*—УФН, 1970, т. 100, с. 514.
21. *Гинзбург В. Л.*—УФН, 1972, т. 108, с. 749; 1974, т. 113, с. 335; *Гинзбург В. Л., Келле В. В.*—Письма ЖЭТФ, 1973, т. 17, с. 428; *Ключник А. В., Лозовик Ю. Е.*—ФТТ, 1978, т. 20, с. 625.
22. *Thomas G. A.*—Sci. Amer., 1976, v. 234, № 6, p. 28; *Багаев В. С., Покровский Я. Е.*—Природа, 1978, № 3, с. 3; *Андрюшин Е. А., Силин А. П.*—Физика низких температур, 1977, т. 3, с. 1365; *Rice T. M.*—Solid State Phys., 1977, v. 32, p. 1.
23. *Андрюшин Е. А., Келдыш Л. В., Силин А. П.*—ЖЭТФ, 1977, т. 73, с. 1163; *Lerner I. V., Lozovik Yu. E.*—Phys. Lett., 1978, v. A64, p. 44; *Kuramoto Y., Morimoto M.*—Phys. Soc. Japan, 1978, v. 44, p. 1759.
24. *Anderson P. W., Edwards S. F.*—J. Phys.: F., 1975, v. 5, p. 965; *Suzuki M.*—Progr. Theor. Phys., 1977, v. 58, p. 1151; *Kinzel W., Fischer K. H.*—J. Phys.: F., 1977, v. 7, p. 2163; *Morandi G., Corbelli G.*—Lett. Nuovo Cimento, 1979, v. 24, p. 273; *Воловик Г. Е., Дзялошинский И. Е.*—ЖЭТФ, 1978, т. 75, с. 1102.
25. *Mott N. F.*—Contemp. Phys., 1977, v. 18, p. 225; *Chaudhari P., Turnball D.*—Science, 1978, v. 199, p. 11.
26. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Статистическая физика.— М.: Наука, 1976, ч. I, гл. 14.
27. *Reatto L.*—J. Low Temp. Phys., 1970, v. 2, p. 353; *Березинский В. Л.*—ЖЭТФ, 1970, т. 59, с. 907; 1971, т. 61, с. 1144; *Griffiths R. B.*—Phys. Rev. Lett., 1969, v. 23, p. 17; *McCoу В. М.*—Phys. Rev. Lett., 1969, v. 23, p. 383; *Kosterlitz J. M., Thouless D. J.*—J. Phys.: C, 1973, v. 6, p. 1181.
28. *Стенли Г.* Фазовые переходы и критические явления.— М.: Мир, 1973; *Паташинский А. З., Покровский В. Л.* Флуктуационная теория фазовых переходов.— М.: Наука, 1975; *Levelt Sengers A. H., Hocken R., Sengers J. V.*—Physics Today,

- 1977, v. 30, № 12, p. 42; *Nelson D. R.*—*Nature*, 1977, v. 269, p. 379.
29. *Гинзбург В. Л.*—ФТТ, 1960, т. 2, с. 2031; *Леванюк А. П., Собынин А. А.*—Письма ЖЭТФ, 1970, т. 11, с. 540; *Вакс В. Г., Ларкин А. И., Пикин С. А.*—ЖЭТФ, 1966, т. 51, с. 361; 1969, т. 56, с. 2087; *Vausch B.*—*Z. Phys.*, 1972, Bd 254, S. 81; 1973, Bd 258, S. 423.
 30. *Levelt Sengers J. M. H.*—*Physica*, 1976, v. 82A, p. 319.
 31. *Гинзбург В. Л., Собынин А. А.*—УФН, 1976, т. 120, с. 153, 733; *Ginzburg V. L., Sobyenin A. A.*—*Phys. Lett.*, 1979, v. A69, p. 417.
 32. *Яковлев И. А., Величкина Т. С.*—УФН, 1957, т. 63, с. 411.
 33. *Гинзбург В. Л.*—УФН, 1962, т. 77, с. 621; *Леванюк А. П., Собынин А. А.*—ЖЭТФ, 1967, т. 53, с. 1024.
 34. *Sharigo S. M., Cummins H. Z.*—*Phys. Rev. Lett.*, 1968, v. 21, p. 1578; *Fritz I. J., Cummins H. Z.*—*Phys. Rev. Lett.* 1972, v. 28, p. 96.
 35. *Гинзбург В. Л., Леванюк А. П., Собынин А. А.*—УФН, 1980, т. 130, вып. 4; *Phys. Rep.*, 1980 (в печати).
 36. *Фабелинский И. Л.* Молекулярное рассеяние света.—М.: Наука, 1965; *Горелик В. С., Сущинский М. М.*—УФН, 1969, т. 98, с. 237.
 37. Сверхтекучесть гелия-3: Сборник статей.—М.: Мир, 1977; Квантовые жидкости и кристаллы. Сборник статей.—М.: Мир, 1979. *Wheatley J.*—*Physics Today*, 1976, v. 29, № 2, p. 32.
 38. а) *Гинзбург В. Л., Собынин А. А.*—Письма ЖЭТФ, 1972, т. 15, с. 343; *Акуличев В. А., Буланов В. А.*—ЖЭТФ, 1973, т. 65, с. 668; *Акуст. ж.*, 1974, т. 20, с. 817.
б) *Андреев А. Ф., Лифшиц И. М.*—ЖЭТФ, 1969, т. 56, с. 2057; *Greywall D. S.*—*Phys. Rev.*, 1977, v. B 16, p. 1291; Квантовые кристаллы: Сборник статей.—М.: Мир, 1975.
 39. а) *Кадомицев Б. Б., Кудрявцев В. С.*—Письма ЖЭТФ, 1971, т. 13, с. 15, 61.
б) *Гинзбург В. Л., Усов В. В.*—Письма ЖЭТФ, 1972, т. 15, с. 280.
в) *Hillbrandt W., Müller E.*—*Astrophys. J.*, 1976, v. 207, p. 589.
 40. *Гольданский В. И., Каган Ю. М.*—ЖЭТФ, 1973, т. 64, с. 90; УФН, 1973, т. 110, с. 445; *Летохов В. С.*—ЖЭТФ, 1973, т. 64, с. 1555; *Ильинский Ю. А., Хохлов Р. В.*—УФН, 1973, т. 110, с. 449; *Ильинский Ю. А.*—Природа, 1978, № 9, с. 49; *Чаплин Дж.*—УФН, 1977, т. 121, с. 331.
 41. а) *Юман М.* Молния.—М.: Мир, 1972.
б) *Сингер С.* Природа шаровой молнии.—М.: Мир, 1973.
в) *Wooding E. R.*—*Nature*, 1972, v. 239, p. 394; *Crawford J. E.*—*Nature*, 1972, v. 239, p. 395.
 42. *Стаханов И. П.*—Письма ЖЭТФ, 1973, т. 18, с. 193; ЖТФ, 1974, т. 44, с. 1373; 1976, т. 46, с. 82; *Смирнов Б. М.*—УФН, 1975, т. 116, с. 731; *Стаханов И. П.* Физическая природа шаровой молнии.—М.: Атомиздат, 1979.
 43. *Дэ Жен П.* Физика жидких кристаллов — М.: Мир, 1977; *Капустин А. П.* Электрооптические и акустические свойства

- жидких кристаллов.— М.: Наука, 1978; *Пикин С. А., Инден-бом В. Л.*— УФН, 1978, т. 125, с. 251.
44. а) *Дьюк К., Парк Р.*— УФН, 1978, т. 111, с. 139; *Somorgia G. A.*— Science, 1978, v. 201, p. 489. Методы анализа поверхностей. Сборник статей./Под. ред. А. Зондерны.— М.: Мир, 1979.
- б) *Агранович В. М., Гинзбург В. Л.* Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов.— М.: Наука, 1979, § 11.
45. *Флеров Г. Н., Друин В. А., Плева А. А.*— УФН, 1970, т. 100, с. 45; *Флеров Г. Н.*— Природа, 1972, № 9, 56; *Флеров Г. Н. и др.*— Ядерная физика, 1977, т. 26, с. 449.
46. *Сиборг Г., Блум Д.*— УФН, 1970, т. 101, с. 755; *Ghiorso A. et al.*—Phys. Rev. Lett., 1969, v. 22, p. 1317; 1970, v. 24, p. 1498; *Price P. B., Fleischer R. L., Woods R. T.*—Phys. Rev., 1970, v. 61, p. 1819; *Anders E., Larimer J. W.*—Science, 1972, v. 175, p. 981; *Nix J. R.*— УФН, 1973, т. 110, с. 405; *Г. Б. Жданов*— УФН, 1973, т. 111, с. 109; *Herrmann G.*— Nature, 1979, v. 280, p. 543.
47. *Поликанов С. М.*— УФН, 1972, т. 107, с. 685.
48. *Шапиро И. С.*— УФН, 1978, т. 125, с. 577.
49. *Мигдал А. Б.*— УФН, 1977, т. 123, с. 369; *Goldhaber A. S.*— Nature, 1978, v. 275, p. 115; *Галицкий В. М., Манько В. И.*— В сб.: Будущее науки.— М.: Знание, 1978, с. 23; *Ericson M., Delorme J.*—Phys. Lett., 1978, v. 76B, p. 182.
50. *Мюллер Э.*— УФН, 1967, т. 92, с. 293.
51. Physics Today, 1970, v. 23, № 8, p. 41.
52. *Эйнштейн А.* Собрание научных трудов.— М.: Наука, 1966, т. 2, с. 406.
53. *Вайскопф В.*— УФН, 1968, т. 96, с. 673; 1971, т. 104, с. 131.
54. Review of particle properties.—Rev. Mod. Phys., 1976, v. 48, pt. 2.
55. *Рихтер Б.*— УФН, 1978, т. 125, с. 201; *Тинг С.*— УФН, 1978, т. 125, с. 227; *Schwitters R. F.*—Sci. Amer., 1977, v. 237, № 4, p. 56; *Ледерман Л.*— УФН, 1979; т. 128, с. 693.
56. а) *Глэшоу Ш.*— УФН, 1976, т. 119, с. 715.
- б) *Намбу Й.*— УФН, 1978, т. 124, с. 147.
- в) *Волошин М. Б.*— Природа, 1979, № 1, с. 54.
57. а) *Кендал Г., Пановский В.*— УФН, 1972, т. 106, с. 315.
- б) *Дрелл С.*— УФН, 1972, т. 106, с. 331.
- в) *Litke A. M., Wilson R.*—Sci. Amer., 1973, v. 229, № 4, p. 104.
58. *Drell S. D.*—Physics Today, 1978, v. 31, № 6, p. 23.
59. *Salam A.*—Proc. Roy. Soc., 1977, v. A 355, p. 515.
60. *Гейзенберг В.*— УФН, 1977, т. 121, с. 657.
61. *Sachs R. G.*— Science, 1972, v. 176, p. 587.
62. *Гейзенберг В.* Введение в единую полевою теорию элементарных частиц.— М.: Мир, 1968.
63. *Киржниц Д. А.*— УФН, 1978, т. 125, с. 169; см. также *Linde A. D.*— Rep Progr. Phys., 1979, v. 42, p. 389.
64. *Гинзбург В. Л., Манько В. И.*— Физика элементарных частиц и атомного ядра, 1976, т. 7, вып. 1, с. 3.

65. *Perl M. L., Kirk W. T.*—*Sci. Amer.*, 1978, v. 238, № 3, p. 50;
Perl M. L.—*Nature*, 1978, v. 275, p. 273.
66. *Риман Б.* О гипотезах, лежащих в основе геометрии. Сочинения.— М.: Гостехиздат, 1948, с. 279.
67. *Эйнштейн А.* Собрание научных трудов.— М.: Наука, 1966, т. 2, с. 88.
68. *Snyder H.*—*Phys. Rev.*, 1947, v. 71, p. 38; *Тамм И. Е.*— Вестник АН СССР, 1968, № 9, с. 22; Проблемы теоретической физики: Сборник памяти И. Е. Тамма.— М.: Наука, 1972.
69. *Фейнберг Е. Л.*— УФН, 1965, т. 86, с. 733; *Amaldi U.*—*Sci. Amer.*, 1973, v. 229, № 5, p. 36.
70. *Амальди У.*— УФН, 1978, т. 124, с. 651.
71. *Фейнберг Е. Л.*— УФН, 1971, т. 104, с. 539.
72. *Бугаев Э. В., Котов Ю. Д., Розенталь И. Л.* Космические мюоны и нейтрино.— М.: Атомиздат, 1970; *Ермолов П. В., Мухин А. И.*— УФН, 1978, т. 124, с. 385.
73. *Клейн Д., Манн А., Руббин К.*— УФН, 1976, т. 120, с. 113.
74. Проблема нарушения *CP*-инвариантности.— УФН, 1968, т. 95, с. 401; *Sweetman T. P.*—*Amer. J. Phys.*, 1971, v. 39, p. 1320; *Sachs R. G.*—*Science*, 1972, v. 176, p. 587; *Barish B. C.*—*Sci. Amer.*, 1973, v. 229, № 2, p. 30.
75. *Фейнберг С.*— УФН, 1976, т. 118, с. 505; т. 120, с. 677; *Клейн Д., Манн А., Руббин К.*— УФН, 1976, т. 120, с. 97.
76. *Freedman D. Z., van Nieuwenhuizen P.*—*Sci. Amer.*, 1978, v. 238, p. 126; УФН, 1979, т. 128, с. 135.
77. *Илиопулос Дж.*— УФН, 1977, т. 123, с. 565; *Славнов А. А.*— УФН, 1978, т. 124, с. 487; Квантовая теория калибровочных полей: Сборник статей.— М.: Мир, 1977.
78. *Nature*, 1978, v. 274, p. 11; *Feinberg G.*—*Nature*, 1978, v. 271, p. 509.
79. *Weinberg S.*—*Physics Today*, 1977, v. 30, № 4, p. 42.
80. *Nature*, 1977, v. 267, p. 9; *Mulvey J.*—*Nature*, 1979, v. 278, p. 403.
81. *McKay D. W.*—*Phys. Rev.*, 1977, v. D16, p. 2861; *Mohapatra R. N., Sidhu D. P.*—*Phys. Rev.*, 1978, v. D 17, p. 1876.
82. *Никишев А. А., Ритус В. И.* Квантовая электродинамика явлений в интенсивном поле.— М.: Труды ФИАН, 1979, т. 111.
83. *Зельдович Я. Б., Попов В. С.*— УФН, 1971, т. 105, с. 403; *Зельдович Я. Б.*— В сб.: Будущее науки.— М.: Знание, 1972, вып. 5, с. 43.
84. *Lee H. C., Khanna F. C.*—*Canad. J. Phys.*, 1978, v. 56, p. 149; *Klein A., Rafelski J.*—*Z. Physik*, 1978, Bd A 284, S. 71.
85. *Гинзбург В. Л.*— УФН, 1963, т. 80, с. 207.
86. а) *Руденко В. Н.*— УФН, 1978, т. 126, с. 361.
б) *Коноплева Н. П.*— УФН, 1977, т. 123, с. 577.
87. а) *Гинзбург В. Л.*— УФН, 1979, т. 128, с. 435.
б) *Гинзбург В. Л.* О теории относительности: Сборник статей.— М.: Наука, 1979.
88. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теория поля.— М.: Наука, 1973.
89. *Эйнштейн А.* Собрание научных трудов.— М.: Наука, 1965, т. 1, с. 631.

90. Пресс Х., Торн К — УФН, 1973, т. 110, с. 569; Гришук Л. П. — УФН, 1977, т. 121, с. 629; Tyson J. A., Giffard R. P.—Ann. Rev. Astron. Astrophys., 1978, v. 16, p. 521.
91. Брагинский В. Б., Манукин А. Б. Измерение малых сил в физических экспериментах.— М.: Наука, 1974, *Braginsky V. B., Rudenco V. N.*—Phys. Rep., 1978, v. 46, p. 165; Брагинский В. Б., Воронцов Ю. И., Халили Ф. Я.— Письма ЖЭТФ, 1978, т. 27, с. 296; Thorne K. S.—In: Theoretical Principles in Astrophysics and Relativity/Ed. N. R. Lebovitz et al.—Chicago, 1978, p. 149; Hellings R. W.—Phys. Rev., 1978, v. D 17, p. 3158.
92. Weber J.—Phys. Rev. Lett., 1969, v. 22, p. 1320; 1970, v. 25, p. 180; Nature, 1972, v. 240, p. 28.
93. а) Фридман А. А.— УФН, 1963, т. 80, с. 439, 447.
 б) Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Строение и эволюция Вселенной.— М.: Наука, 1975; Новиков И. Д. Эволюция Вселенной,— М.: Наука, 1979.
 в) Вейнберг С. Гравитация и космология.— М.: Мир, 1975.
 г) Шама Д. Современная космология.— М.: Мир, 1973.
 д) Пиблс П. Физическая космология.— М.: Мир, 1975.
 е) Longair M. S.—Q. J. Roy. Astr. Soc., 1976, v. 17, p. 422.
94. Эйнштейн А. Собрание научных трудов.— М.: Наука, 1965, т. 1, с. 601.
95. Марков М. А.— УФН, 1973, т. 111, с. 3.
96. Уилер Дж. Предвидение Эйнштейна.— М.: Мир, 1970; Гинзбург В. Л., Киржниц Д. А., Любушин А. А.— ЖЭТФ, 1971, т. 60, с. 451; см. также в сб.: Гравитация.— Киев: Наукова думка, 1972, с. 40; Parker L.—Phys. Rev. Lett., 1972, v. 28, p. 705; Phys. Rev., 1973, v.D 7, p. 2357.
97. Hu B. L., Parker L.—Phys. Rev., 1978, v. D 17, p. 933; Ford L. H., Parker L.—Phys. Rev., 1978, v. D 17, p. 1485; Верешков Г. М. и др.— ЖЭТФ, 1977, т. 73, с. 1985; Зельдович Я. Б.— УФН, 1977, т. 123, с. 487; Gibbons G. W., Hawking S. M.—Phys. Rev., 1977, v. D 15, p. 2738.
98. Penrose R.—In: Theoretical Principles in Astrophysics and Relativity/Ed. N. R. Lebovitz et al.—Chicago, 1978, p. 217.
99. Canuto V., Hsieh S. H., Adams P. J.—Phys. Rev. Lett., 1977, v. 39, p. 429; Astrophys. J., 1978, v. 224, p. 302.
100. Steigman G.—Ann. Rev. Astron. Astrophys., 1976, v. 14, p. 339; Stecker F. W.—Nature, 1978, v. 273, p. 493.
101. Jeans J. H. Astronomy and Cosmogony.—Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1928, p. 352.
102. а) Происхождение и эволюция галактик и звезд: Сборник статей/Под ред. С. Б. Пикельнера.— М.: Наука, 1976.
 б) Озерной Л. М. Происхождение и жизнь галактик.— М.: Знание, 1978.
 в) Зонн В. Галактики и квазары.— М.: Мир, 1978.
 г) Oort J. H.— Ann. Rev. Astron. Astrophys., 1977, v. 15, p. 295.
103. а) Амбарцумян В. А.— УФН, 1968, т. 96, с. 3; The Structure and Evolution of Galaxies, In: Proc. 13th Solvay Conf. on Physics—Intersci. Publ., 1965, p. 1.

- б) Амбарцумян В. А., Казютинский В. В.—Природа, 1970, № 4, с. 16; см. также Вопросы философии, 1973, № 3, с. 91.
- в) Bahcall J. N., Joss P. C.—Comm. Astrophys. a. Space Phys., 1972, v. 4, p. 95.
104. Гинзбург В. Л., Озерной Л. М.—Astrophys. a. Space Sci., 1977, v. 48, p. 401; Озерной Л. М.—УФН, 1976, т. 120, с. 309; Bailey M. E., Clube S. V. M.—Nature, 1978, v. 275, p. 28.
105. а) Ostriker J. P.—Proc. Nat. Acad. Sci USA, 1977, v. 74, p. 1767.
- б) The Large Scale Structure of the Universe/Ed. M. S. Longair, Einasto J.—In: IAU Symposium 79, 1978.
Spinard H. et al.—Astrophys. J., 1978, v. 225, p. 56.
106. Cowshik R., McClelland J.—Astrophys. J., 1973, v. 180, p. 7.
107. Гинзбург В. Л.—Вопросы философии, 1972, № 11, с. 14; В сб.: Философские проблемы астрономии XX века.—М.: Наука, 1976, с. 57; Q. J. Roy. Astr. Soc., 1975, v. 16, p. 265.
108. Baade W., Zwicky F.—Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1934, v. 20, p. 259.
109. а) Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Теория тяготения и эволюция звезд.—М.: Наука, 1971.
- б) Baum G., Pethick C. J.—Ann. Rev. Nucl. Sci., 1975, v. 25, p. 27; Ann. Rev. Astron. Astrophys., 1979, v. 17, p. 415.
Lamb F. K.—Ann. New York Acad. Sci., 1977, v. 302, p. 482.
110. Хьюиш Э.—УФН, 1969, т. 97, с. 715; Гинзбург В. Л.—УФН, 1971, т. 103, с. 393; Тер Хаар Д.—УФН, 1976, т. 119, с. 525; Ginzburg V. L., Zheleznyakov V. V.—Ann. Rev. Astron. Astrophys., 1975, v. 13, p. 511; Manchester R. N., Taylor J. H. Pulsars.—San Francisco: Freeman and Co., 1977.
111. Усов В. В. Галактическая и внегалактическая астрономия: Астрофизика высоких энергий.—М.: ВИНТИ, 1977.
112. Куржниц Д. А.—УФН, 1971, т. 104, с. 489; Canuto V.—Ann. Rev. Astron. Astrophys., 1975, v. 13, p. 335. (см. также [17]); Sauls J. A., Serene J. W.—Phys. Rev., 1978, v. D 17, p. 1524; Takatsuka J. et al.—Progr. Theor. Phys., 1978, v. 59, p. 1933; Chela-Flores J.—Phys. Rev., 1978, v. D 18, p. 2632; Брук Ю. М. Фазовые переходы в сверхплотном веществе.—М.: Знание, 1979.
113. Trumper J. et al.—Astrophys. J. (Letters), 1978, v. 219, p. L 105; Coe M. J. et al.—Nature, 1977, v. 268, p. 508.
114. Герштейн С. С. и др.—Письма ЖЭТФ, 1977, т. 26, с. 189; Иванова Л. Н., Имшенник В. С., Четкин В. М.—Астрон. ж., 1977, т. 54, с. 1009; Barkt Z.—Rev. Astrophys., 1975, v. 13, p. 45; Arnett W. D.—Ann. Rev. Astron. Astrophys., 1973, v. 11, p. 73.
115. Гурский Г., Ван ден Хёвел Э.—УФН, 1976, т. 118, с. 673; Шакура Н. И. Нейтронные звезды и «черные дыры» в двойных звездных системах.—М.: Знание, 1976; Rappaport S., Joss P. C.—Nature, 1977, v. 266, p. 123.
116. Freedman B., McLerran L.—Phys. Rev., 1978, v. D 17, p. 1109; Fechner W. B., Joss P. C.—Nature, 1978, v. 274, p. 347.

117. Торн К.—УФН, 1976, т. 118, с. 453; Пенроуз Р.—УФН, 1973, т. 109, с. 355; Фролов В. П.—УФН, 1976, т. 118, с. 473; Черные дыры: Сборник статей.—М.: Мир, 1978; Фролов В. П. В сб.: Эйнштейновский сборник, 1975—1976.—М.: Наука, 1978, с. 82.
118. Hawking S. W.—Nature, 1974, v. 248, p. 30; Comm. Math. Phys., 1975, v. 43, p. 199; Phys. Rev., 1976, v. D 13, p. 191.
119. Гинзбург В. Л.—УФН, 1956, т. 59, с. 11.
120. Лайтман А. П., Сюняев Р. А. и др.—УФН, 1978, т. 126, с. 515; см. также *Samiti J. et al.*—Nature, 1979, v. 278, p. 434.
121. Докучаев В. И., Озерной Л. М.—Письма Астрон. ж., 1977, т. 3, с. 391; Астрон. ж., 1978, т. 55, с. 27.
122. Sargent W. L. W., Young P. J. et al.—Astrophys. J., 1977, v. 221, p. 721, 731; см. также Nature, 1978, v. 274, p. 419.
123. De Felice F.—Nature, 1978, v. 273, p. 429.
124. Oppenheimer J. R., Snyder H.—Phys. Rev., 1939, v. 56, p. 455.
125. Lohiya D., Pancharakesan.—Lett. Nuovo Cimento, 1978, v. 21, p. 81; Lake K., Roeder R. C.—Nature, 1978, v. 273, p. 449.
126. Rees M. J.—Nature, 1977, v. 226, p. 333; Blandford R. D.—Mon. Not. RAS, 1977, v. 181, p. 489; Porter N. A., Weeks T. C.—Mon. Not. RAS, 1978, v. 183, p. 205.
127. Гинзбург В. Л.—Письма ЖЭТФ, 1975, т. 22, с. 514; Гинзбург В. Л., Фролов В. П.—Письма Астрон. ж., 1976, т. 2, с. 474.
128. а) Уикс Т. Астрофизика высоких энергий.—М.: Мир, 1972.
б) Хайакова С. Физика космических лучей.—М.: Мир, 1974, ч. 2.
в) Озерной Л. М., Прилуцкий О. Ф., Розенталь И. Л. Астрофизика высоких энергий.—М.: Атомиздат, 1973.
129. а) Гинзбург В. Л., Птускин В. С.—УФН, 1976, т. 117, с. 585; Гинзбург В. Л.—УФН, 1978, т. 124, с. 307.
б) Гинзбург В. Л., Дорман И. В.—Природа, 1978, № 4, с. 10.
130. Каплан С. А., Цытович В. Н. Плазменная астрофизика.—М.: Наука, 1972; Ginzburg V. L., Ptuskin V. S., Tsyтович V. N.—Astrophys. a. Space Sci., 1973, v. 21, p. 13.
131. Дорман И. В. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей.—М.: Наука, 1975.
132. Христиансен Г. Б. Космические лучи сверхвысоких энергий.—М.: МГУ, 1974; Linsley J.—Sci. Amer., 1978, v. 239, № 1, p. 48.
133. Lewin W. H. G., Joss P. C.—Nature, 1977, v. 270, p. 211, 310; Forman W. et al.—Astrophys. J. (Letters), 1978, v. 225, p. L 1.
134. Morrison P.—Nuovo Cimento, 1958, v. 7, p. 858.
135. Гинзбург В. Л., Сыроватский С. И.—УФН, 1964, т. 84, с. 201; 1972, т. 108, с. 273; Фацио Г.—УФН, 1970, т. 102, с. 621; Гальпер А. М., Кириллов-Угрюмов В. Г., Лучков Б. И.—УФН, 1974, т. 112, с. 491; 1979, т. 128, с. 313.
136. Proc. 12th ESLAB Symposium of Astronomy: Recent Advances in Gamma-Ray Astronomy.—Frascati, 1977; 15th International Cosmic-Ray Conference: Conference papers—Plovdiv, 1977; Pinkau K.—Nature, 1979, v. 277, p. 17.

137. *Lingenfelter R. E., Ramaty R.*—*Physics Today*, 1978, v. 31, № 3, p. 40; *Розенталь И. Л., Усов В. В., Эстулин И. В.*—*УФН*, 1979, т. 127, с. 135; *Leventhal M. et al.*—*Astrophys. J. (Letters)*, 1978, v. 225, p. L 11.
138. а) *Klebesadel R. W., Strong I. B., Olsen R. A.*—*Astrophys. J. (Letters)*, 1973, v. 182, p. L 85.
б) *Cline T. L. et al.*—*Astrophys. J. (Letters)*, 1973, v. 185, p. L 1.
в) *Wheaton W. A. et al.*—*Astrophys. J. (Letters)*, 1973, v. 185, p. L 57.
139. *Бакал Дж.*—*УФН*, 1970, т. 101, с. 739; *Нейтрино: Сборник статей.*—М.: Наука, 1970; *Вульфендейл А.*—*УФН*, 1971, т. 103, с. 739.
140. *Neutrino 77: Proc. Intern. Conf. on Neutrino Physics and Neutrino Astrophysics.*—М.: Наука, 1978, v. 1; *Bahcall J. N. et al.*—*Phys. Rev. Lett.*, 1978, v. 40, p. 1351; *Bahcall J. N.*—*Rev. Mod. Phys.*, 1978, v. 50, p. 881.
141. *Биленький С. М., Понтекорво Б. М.*—*УФН*, 1977, т. 123, с. 181; *Ulrich R. K.*—*Science*, 1975, v. 190, p. 619.
142. *Березинский В. С., Зацепин Г. Т.*—*УФН*, 1977, т. 122, с. 3; *Eichler D., Schramm D. N.*—*Nature*, 1979, v. 277, p. 17; *Miller D. J.*—*Nature*, 1979, v. 280, p. 191.
143. *Гинзбург В. Л.* *Современная астрофизика.*—М.: Наука, 1970.
144. *Проблема СЕТИ: Связь с внеземными цивилизациями.*—М.: Мир, 1975; *Kuiper W. B. H., Morris M.*—*Science*, 1977, v. 196, p. 166; *Кардашев Н. С.*—*Вопросы философии*, 1977, № 2, с. 43; *Murray B., Gulbis S., Edelson R. E.*—*Science*, 1978, v. 199, p. 485; *Bates D. R.*—*Astrophys. a. Space Sci.*, 1978, v. 55, p. 7; *Cosmic Search*, 1979, v. 1, № 1.
145. *Крамаровский Я. М., Чечев В. П.*—*УФН*, 1970, т. 102, с. 141; *Dyson F.*—*Sci. Amer.*, 1971, v. 225, № 9, p. 51; *Davies P. C. W.*—*J. Phys.: A*, 1972, v. 5, p. 1296; *Novello M., Rotelli P.*—*J. Phys.: A*, 1972, v. 5, p. 1488; *Pagel B. E. J.*—*Mon. Not. RAS*, 1977, v. 179, p. 81p; *Blake G. M.*—*Mon. Not. RAS*, 1977, v. 181, p. 47; *Ganguli S. N. et al.*—*Phys. Lett.*, 1978, v. B 74, p. 130.
146. а) *Dirac P. A. M.*—*Proc. Roy. Soc.*, 1938, v. A 165, p. 199; 1973, v. A 333, p. 419.
б) *Дикки Р.*—В сб.: *Гравитация и относительность.*—М.: Мир, 1965, с. 251.
в) *Брагинский В. Б., Гинзбург В. Л.*—*ДАН СССР*, 1974, т. 216, с. 300.
г) *Obregon O. J., Pimentel L. O.*—*General Relativity and Gravitation*, 1978, v. 9, p. 585; *Barrow J. D.*—*Mon. Not. RAS*, 1978, v. 184, p. 677; *Blake G. M.*—*Mon. Not. RAS*, 1978, v. 185, p. 399.
д) *Линде А. Д.*—*Письма ЖЭТФ*, 1979, т. 30, с. 479 (см. также [96]).
147. *Гинзбург В. Л.*—*Природа*, 1976, № 6, с. 73.
148. *Bromeley D. A.*—*Physics Today*, 1972, v. 25, № 7, p. 23; *Astronomy and Astrophysics for the 1970's.: Rep. of the Astron. Survey Comm. Nat. Acad. Sci.*—Washington: 1972; см. также *Sky and Telescope*, 1972, v. 44, № 6, p. 391.
149. *Morse Ph.*—*Physics Today*, 1973, v. 26, № 4, p. 23.

150. *Brayshaw D. D.*—Phys. Rev. Lett., 1979, v. 42, p. 1106.
151. *Zweig G.*—Science, 1978, v. 201, p. 973.
152. *Vessot R. F. C., Levine M. W.*—General Relativity and Gravitation, 1979, v. 10, p. 181.
153. *Taylor J. H., Fowler L. A., McCulloch P. M.*—Nature, 1979, v. 277, p. 437.
154. *Islam J. N.*—Sky and Telescope, 1979, v. 57, p. 13; *Barrow J. D., Tipler F. J.*—Nature, 1978, v. 276, p. 453; *Dyson F. J.*—Rev. Mod. Phys., 1979, v. 51, p. 447.
155. *Bartlett A. A.*—Amer. J. Phys., 1978, v. 46, p. 876.
156. *Leorned J. R., Reines F., Soni A.*—Phys. Rev. Lett., 1979, v. 43, p. 907.

Виталий Лазаревич Гинзбург

О ФИЗИКЕ И АСТРОФИЗИКЕ

М., 1980 г., 160 стр.

Редактор *Н. А. Райская*
Технический редактор *В. Н. Кондакова*
Корректоры *Т. С. Плетнева, Т. С. Вайсберг*
ИБ № 11481

Сдано в набор 05.09.79. Подписано к печати
17.12.79. Т-21569. Бумага $84 \times 108^{1/32}$,
тип. № 1. Литературная гарнитура. Высокая
печать. Условн. печ. л. 8,4. Уч.-изд. л. 8,51.
Тираж 24 000 экз. Заказ № 601. Цена книги
60 коп.

Издательство «Наука»
Главная редакция
физико-математической литературы
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени
Первая Образцовая типография
имени А. А. Жданова Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли.
Москва, М-54, Валовая, 28

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

ВЫШЛА ИЗ ПЕЧАТИ:

АРЦИМОВИЧ Л. А., ЛУКЬЯНОВ С. Ю. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях.— М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1978, 12 л.

Книга написана на основе лекций, читавшихся авторами на протяжении ряда лет в МГУ. Содержание книги охватывает избранные вопросы прикладной электродинамики и может рассматриваться как введение в курс электронной и атомной физики. В книге последовательно обобщаются наиболее интересные и важные случаи движения частиц в электрических, магнитных и комбинированных полях, описываются принципы действия циклических ускорителей, рассматривается движение частицы в поле точечного заряда, дается краткое введение в физику плазмы. Во втором издании структура книги и большая часть текста сохранены неизменными. Внесены лишь небольшие добавления.

Книга рассчитана на студентов и аспирантов физических факультетов университетов, но будет с интересом прочитана научными работниками смежных специальностей.

Требуйте книгу в магазинах Книготорга и Академкниги, распространяющих научно-техническую литературу.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

ВЫШЛА ИЗ ПЕЧАТИ:

НОВИКОВ И. Д. Эволюция Вселенной.— М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979, 9 л.

Книга содержит научно-популярное изложение современной физической космологии — науки о строении и эволюции Вселенной в целом. Этот раздел астрофизики переживает сейчас бурное развитие, связанное с новыми открытиями астрономии, физики и теоретическими разработками. В ней рассказывается о расширяющейся Вселенной, о фотометрическом и гравитационном парадоксах, об открытии реликтового излучения и теории горячей Вселенной, о физике процессов в расширяющейся Вселенной, о новых открытиях наблюдательной космологии.

Книга рассчитана на читателей с полным средним образованием, интересующихся астрономией и физикой, преподавателей, лекторов, студентов.

Требуйте книгу в магазинах Книготорга и Академкниги, распространяющих научно-техническую литературу.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

ГОТОВИТСЯ К ИЗДАНИЮ В 1980 г.

ОКУНЬ Л. Б. Лептоны и кварки.— М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980, 20 л.

Книга представляет собой введение в теорию слабого взаимодействия элементарных частиц. Изложение основано на кварково-глюонной модели адронов. Книга содержит подробные расчеты слабых распадов элементарных частиц в (том числе распадов недавно открытых очарованных частиц и тяжелых лептонов) и реакций, идущих под действием нейтрино. Представлены основные идеи и уравнения единой модели слабого и электромагнитного взаимодействия. Исходя из этой модели, обсуждаются перспективы поисков промежуточных векторных и скалярных бозонов. Книга написана на основе курса лекций, читаемого автором в Московском физико-техническом институте.

Для студентов, аспирантов и научных работников, экспериментаторов и теоретиков, специализирующихся в области физики элементарных частиц.

Предварительные заказы принимаются всеми магазинами Книготорга и Академкниги, распространяющими научно-техническую литературу.

60 коп.

В.Л.ГИНЗБУРГ О ФИЗИКЕ И АСТРОФИЗИКЕ