

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

53

КАКИЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ И АСТРОФИЗИКИ ПРЕДСТАВЛЯЮТСЯ СЕЙЧАС ОСОБЕННО ВАЖНЫМИ И ИНТЕРЕСНЫМИ? (ДЕСЯТЬ ЛЕТ СПУСТЯ)

В. Л. Гинзбург

СОДЕРЖАНИЕ

I. Введение	469
II. Макрофизика	471
1. Управляемый термоядерный синтез (471). 2. Высокотемпературная сверхпроводимость (472). 3. Новые вещества (проблема создания металлического водорода и некоторых других веществ) (474). 4. Металлическая экситонная (электронно-дырочная) жидкость в полупроводниках (475). 5. Фазовые переходы второго рода (критические явления). Некоторые примеры (475). 6. Физика поверхности (478). 7. Поведение вещества в сверхсильных магнитных полях. Изучение очень больших молекул. Жидкие кристаллы (479). 8. Разеры, газеры и лазеры новых типов (481). 9. Сверхтяжелые элементы (далекие трансураны). «Экзотические» ядра (482).	
III. Микрофизика	483
10. Кварки и глюоны. Квантовая хромодинамика (484). 11. Единая теория слабого и электромагнитного взаимодействия. $W^{\pm,0}$ -бозоны. Лептоны (488). 12. Великое объединение. Распад протона. Суперобъединение. Масса нейтрино (491). 13. Фундаментальная длина. Взаимодействие частиц при высоких и сверхвысоких энергиях (493). 14. Нарушение CP -инвариантности. Нелинейные явления в вакууме в сверхсильных магнитных полях. Несколько замечаний о развитии микрофизики (495).	
IV. Астрофизика	498
15. Экспериментальная проверка общей теории относительности (499). 16. Гравитационные волны (500). 17. Космологическая проблема (501). 18. Нейтронные звезды и пульсары. Физика «черных дыр» (502). 19. Квазары и ядра галактик. Образование галактик (506). 20. Происхождение космических лучей и космического гамма- и рентгеновского излучения (508). 21. Нейтринная астрономия (511).	
V. Заключительные замечания	512
Цитированная литература	513

I. ВВЕДЕНИЕ

В 1971 г. в разделе «Физика наших дней» УФН была опубликована статья ¹ с таким же названием, как и настоящая, но, разумеется, без подзаголовка («десять лет спустя»). Статья ¹ (цит. ниже как 1) превратилась в небольшую книжку, переведенную в дальнейшем на несколько языков и выпущенную у нас третьим изданием в 1980 г.² Такая судьба статьи 1, как мне кажется, не оставляет сомнений в том, что содержащаяся в ней постановка вопроса и его обсуждение действительно интересуют многих, в первую очередь, по-видимому, молодых физиков и астрономов. Вместе с тем совершенно очевидно, что выделение какого-то небольшого числа

проблем, возводимых в ранг особенно интересных и важных, имеет условный характер и не должно приводить к пренебрежению огромным количеством других задач. Ясен и субъективный характер отбора, производимого автором, который никогда не претендовал и не претендует на то, чтобы статья 1 и книжка ² рассматривались как нечто выходящее за пределы сочинений научно-популярного типа. Все это в достаточной мере оговорено в 1 и ², и здесь нет нужды еще раз более подробно развивать эти замечания. Разве что отмечу следующее: если бы статья 1 писалась заново, то, дабы не раздражать некоторых читателей (если допустить, что все, критиковавшие статью, ее действительно читали), для статьи было бы выбрано более нейтральное название (например, такое: «О некоторых интересных и важных проблемах физики и астрофизики»). К сожалению, по самому характеру настоящей, второй, статьи изменить ее название невозможно.

Из сказанного ясно, что автор уже десять лет, в процессе переработки статьи 1 для новых изданий, следит за трансформацией ряда направлений и проблематики в области физики и астрофизики. Поэтому естественным образом возникла идея написать настоящую статью, имеющую своей целью отразить те изменения, которые произошли в физике и астрофизике за последние десять лет. Но, разумеется, речь идет не о физике и астрофизике в целом, а в основном только о проблемах, обсуждавшихся в 1. Поэтому и статья построена по той же схеме, как и статья 1, в которой было выделено 17 проблем; в ² их уже 21, но некоторые из них следовало бы расчленить. В общем, ниже речь пойдет примерно о 25 проблемах и научных направлениях.

Наконец, хотелось бы подчеркнуть следующее. Настоящая статья, очевидно, не только не принадлежит к той категории, которую физики называют «работами», но и не является обзором литературы. Поэтому не следует предъявлять к ней некоторых требований, уместных в других случаях. Так, во-первых, автор считает возможным не касаться ниже (в том числе в списке цитированной литературы) вопросов приоритета. Появление многочисленных фамилий или приоритетных ссылок помешало бы чтению. Кроме того, не раз приходилось убеждаться в том, что принятые в литературе «в результате многократного повторения» (*adapted by repetition*) приоритетные утверждения часто оказываются неточными или даже несправедливыми. Предпринимать же специальное историческое исследование по многочисленным приоритетным вопросам здесь совершенно неуместно. Во-вторых, автор не следует «безличному стилю» изложения, принятому в научной литературе, особенно на русском языке. Согласно требованиям этого стиля не только нельзя употреблять личные местоимения (я, мне и т. д.), но и вообще автор должен скрыться с глаз читателей как можно дальше. Вспоминаю, как на своих семинарах Л. Д. Ландау всегда прерывал докладчиков, начинавших говорить о том, что они думали, предполагали и т. п., следующим замечанием: «Не забывайте, что Ваша биография интересует только Вашу жену». Безличный стиль выработался в результате длительного опыта развития науки, и я считаю его совершенно правильным в научных статьях, обзорах, монографиях и учебниках (позволю себе заметить, что моя собственная практика этому не противоречит). Но совсем другое дело публицистические статьи, воспоминания или статьи типа настоящей, которую неизвестно к какому жанру отнести. Во всяком случае, настоящая статья уже по замыслу является «личной», она посвящена моей (т. е. по определению, субъективной) оценке некоторых тенденций и направлений в физике и астрофизике. Мне известны коллеги, считающие уже сам такой подход неуместным или нескромным. Другие не согласятся с многими оцен-

ками. Все это их дело и их право. Меньше всего я претендую на какую-то безапелляционность суждений и, более того, сам считаю ряд замечаний весьма спорными. Отстаиваю я лишь право иметь свое мнение и не бояться его высказывать. В такой ситуации автор не может, да и не хочет пытаться «и невинность соблюсти, и капитал приобрести». Приходится поэтому и употреблять личные местоимения и в какой-то мере не скрывать свою «биографию». Очень хотелось бы надеяться на то, что принятая форма изложения не вызовет у читателей отрицательной реакции.

II. МАКРОФИЗИКА

Макрофизика в целом покоится на надежном фундаменте (классическая и квантовая механика, классическая и квантовая электродинамика, включая сюда и частотную теорию относительности). Естественно поэтому, что развитие макрофизики, если говорить о качественно новом и принципиальном, происходит медленнее и менее драматично, чем в случае микрофизики и астрономии (включая космологию). Правда, к макрофизике мы, несколько опережая события, отнесли (см. 1 и 2) также ядерную физику, тесно соприкасающуюся с микрофизикой. С другой стороны, общая теория относительности (имеется в виду классическая теория Эйнштейна) по сути дела относится к макрофизике, но в полную силу «работает» лишь в космосе и поэтому обсуждается в астрофизическом разделе статьи. Но даже с учетом успехов ядерной физики и общей теории относительности за прошедшее десятилетие макрофизика по количеству полученных глубоких и важных новых результатов уступает микрофизике. Впрочем, успехи и результаты в науке на весах не взвесишь, многие из них как-то вообще плохо соизмеримы. Не будем поэтому делить «места» и перейдем к конкретным проблемам.

1. Управляемый термоядерный синтез

Этой проблемой занимаются уже 30 лет. Первоначальный «розовый оптимизм» довольно скоро сменился нередко даже пессимистическими оценками после того, как выяснилось, сколь капризна горячая плазма, сколь трудно ее удерживать в ловушках. Но постепенно стало ясно, что при тщательном контроле однородности магнитного поля (точнее, должны отсутствовать непредусмотренные в расчетах неоднородности поля), а также при удалении из водородной плазмы более тяжелых примесей, различные магнитные ловушки (токамаки, стеллараторы и некоторые другие) в общем работают в согласии с ожиданиями^{3а}. В результате особых сомнений в возможности достичь успеха в системах с магнитным удержанием плазмы сейчас уже нет. Но для проверки расчетов и преодоления различных трудностей приходится строить все большие и большие установки. Естественно, что это требует больших средств, усилий и времени. В настоящий период токамаки остаются фаворитами, но, насколько я могу судить, их превосходство, например, над стеллараторами не доказано. Продолжается и исследование «открытых» магнитных ловушек, носящих жаргонное название «пробкотроны». Вряд ли кто-либо возьмется гарантировать, что открытие системы, в известном отношении самые простые и удобные, никогда не смогут конкурировать с тороидальными установками.

За последнее десятилетие резко возрос интерес к системам с инерциальным удержанием плазмы, в которых должен осуществляться микро-взрыв пылинки (капелек) из смеси дейтерия $D \equiv d$ и трития $T \equiv t$ (не исключено, конечно, в будущем использование и чистого D). Первоначаль-

ное обжатие пылинок можно, в принципе, производить светом (лазеры), электронными и ионными пучками³⁶. Электроны использовать особенно трудно, лазерные системы в данное время изучены лучше всего, возрастает интерес к использованию ионных пучков. К сожалению, как и в случае магнитных ловушек, для исследования возможностей «инерциального термояда» нужны, вообще говоря, очень крупные установки. В общем, изучение возможностей управляемого термоядерного синтеза в 70-е годы еще в большей мере, чем ранее, превратилось из физической задачи одновременно в техническую проблему индустриального масштаба. Однако физика все еще лидирует, поскольку идет соревнование различных принципов и методов удержания плазмы, а действующий реактор, поставляющий энергию, не создан еще ни на одном из обсуждаемых путей.

2. Высокотемпературная сверхпроводимость

Эта проблема была поставлена, по крайней мере на современных основах, в 1964 г. Цель ясна — создать, найти сверхпроводники или какие-то неоднородные сверхпроводящие «элементы», которые оставались бы сверхпроводящими по крайней мере при температуре жидкого азота $T_{b, N_2} = 77,4$ К (такова температура кипения азота при атмосферном давлении). Однако состояние теории сверхпроводимости, несмотря на ее огромные успехи в различных направлениях, еще не такое, чтобы она могла предсказывать критическую температуру сверхпроводящего перехода T_c для более или менее сложных соединений или «сэндвичей» диэлектрик-металл-диэлектрик. Поэтому и рекомендации, которые можно было сделать в отношении поиска высокотемпературных сверхпроводников, носят качественный и не слишком четкий характер. В какой-то мере под влиянием этих рекомендаций (в какой точно мере — сказать трудно) было синтезировано довольно много квазидвумерных и слоистых (квазидвумерных) соединений, найдено немало новых сверхпроводников. Но пока что (с ясной из дальнейшего оговоркой относительно $CuCl$ и CdS) наивысшей критической температурой $T_c \approx 23,2$ К обладает, как было обнаружено в 1973 г., соединение Nb_3Ge . Вместе с тем нельзя не отметить, что поиски все новых сверхпроводников привели к таким интересным результатам, как открытие металлической проводимости (и сверхпроводимости с $T_c \approx 0,3$ К) в полимерном нитриде серы $(SN)_x$, не содержащем, очевидно, атомов металлов. В 1980 г. была открыта сверхпроводимость органического кристалла ditetramethyltetraselenafulvalene—hexafluorophosphate $[(TMTSF)_2PF_6]$. Правда, этот кристалл обладает металлической проводимостью при низкой температуре, а также сверхпроводимостью с $T_c \sim 1$ К, только под давлением в несколько килобар⁴. Тем не менее речь идет, по-видимому, о новом классе металлов и сверхпроводников, поскольку известна возможность в ряде случаев сравнительно легко варьировать органические соединения. Кроме того, для органических соединений имеются некоторые основания ожидать получения довольно высоких критических температур⁵. Конечно, никакой гарантии успеха в этом отношении дать нельзя, но появление нового класса даже низкотемпературных сверхпроводников достаточно интересно. Заслуживают быть упомянутыми здесь и опыты, приведшие к заключению о сверхпроводимости серы (S) под высоким давлением и при определенной обработке ее давлением, причем T_c лежит в диапазоне 26—31 К⁶.

Возвращаясь непосредственно к проблеме высокотемпературной сверхпроводимости, нужно отметить, что теоретический анализ⁵ не дает оснований отрицать возможность существования равновесных (или, быть

может, метастабильных) материалов с $T_c \leq 300$ К. Вместе с тем ясно, что для достижения критических температур $T > T_{b, N_2} = 77,4$ К должны выполняться довольно жесткие условия, и гарантии успеха дать нельзя. В этой области нужно пробовать, искать, проверять «на сверхпроводимость» все новые вещества, сэндвичи и т. д.

Возможно, что успехи на таком пути уже имеются. В 1978 г. появились сообщения⁷ 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 настоящего сверхдиамагнетизма, еще, к сожалению, недостаточно 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.⁵, гл. 5). Другая возможность — образование «сэндвичей» из Cu и CuCl или появление истинно-поверхностной сверхпроводимости⁸. 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 сверхпроводников⁸. Последняя возможность недостаточно еще ясна даже в теоретическом отношении, не говоря уже об эксперименте. Однако нельзя не отметить, что хотя дальнейшее изучение CuCl и не внесло ясности, но наличие высокотемпературного сверхдиамагнетизма в этом материале при некоторых не вполне определенных пока условиях⁷ подтверждено еще в одной лаборатории⁹. Как справедливо, по моему мнению, подчеркивается в обзоре¹⁰, трудность выяснения поведения CuCl не является чем-то исключительным. Подобные затруднения имели прецеденты (например, в случае ряда полупроводников), когда речь идет о материалах с плохо контролируемыми свойствами. Роль здесь могут играть и примеси, и различные дефекты решетки или остаточные напряжения. Поэтому совсем не исключено, что в CuCl наблюдается именно высокотемпературная сверхпроводимость.

К тому же в 1980 г. аналогичный описанному для CuCl сильный диамагнитный эффект при температуре жидкого азота ($T_{b, N_2} = 77,4$ К) наблюдался в кристаллах CdS, обработанных методом «закалки давлением» (pressure quenching). В этом методе давление около 40 кбар снималось со скоростью, большей 10^6 бар/с¹¹. Какие-либо подробности использованной методики приготовления образцов в статье¹¹ не приводятся (можно думать, что это объясняется местом работы авторов — U.S. Army Armament Research and Development Command, Large Caliber Weapons Systems). Несомненно, результат для CdS повышает интерес как к CuCl, так и вообще к какому-то пока еще совершенно таинственному механизму высокотемпературного сверхдиамагнетизма.

Поиски высокотемпературных сверхпроводников, в отличие от исследований в области управляемого термоядерного синтеза, не требуют

*) 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 для идеального диамагнетика, равна $\chi_{ид} = -1/4\pi$. В обычных диамагнитных веществах $\chi \sim 10^{-4} - 10^{-6}$. Сверхдиамагнетиками я называю (думаю, это уместно), вещества, для которых χ сравнимо с $\chi_{ид} = -1/4\pi$, скажем, если $\chi \sim (0,01 - 0,1)/4\pi$. Сверхпроводники являются сверхдиамагнетиками, но обратное утверждение, быть может, и не справедливо, т. е. сверхдиамагнетизм не должен обязательно сопровождаться сверхпроводимостью (в смысле отсутствия сопротивления при протекании электрического тока)⁸.

создания гигантских установок. Поэтому успех может прийти в небольшой лаборатории и оказаться совершенно неожиданным для других физиков. Более того, быть может, такой успех уже достигнут в случае CuCl и CdS . Если это действительно так, то перспективы получения и изучения высокотемпературных сверхпроводников можно считать самыми радужными.

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

Создание новых веществ относят обычно к области материаловедения или химии. Но положение меняется, когда речь заходит о веществах вроде металлического водорода. Это уже, бесспорно, физическая задача, причем неизвестно, как ее решить.

Нет сомнений в том, что металлическая фаза водорода существует при давлениях, превосходящих 1,5—2 Мбар. Вероятно, металлический водород будет сверхпроводником, причем высокотемпературным ($T_c \sim 100\text{—}200\text{ K}$), что еще больше повышает интерес к этому металлу. Некоторые указания на получение металлического водорода в литературе уже появлялись (ссылки см. в ²), но в целом вопрос не ясен. Конкретно, нет полной уверенности в том, что металлическая фаза водорода действительно наблюдалась, и, главное, ее свойства (в частности, в отношении сверхпроводимости) остаются еще заведомо неизвестными. Главная трудность связана с необходимостью создать давления больше 2—3 Мбар. С помощью ударных волн это легко достижимо, но при этом, вообще говоря, происходит нагрев, не говоря уже о трудности измерений ряда параметров металла за очень короткое время. В квазиравновесных же условиях нужное давление в малых объемах (между миниатюрными наковальнями) можно создать простыми прессами, но для этой цели нет подходящих материалов. Даже алмаз при таких давлениях начинает «течь» ¹². Видимо, здесь нужен какой-то новый подход. Так или иначе, но до того времени, когда будет получен «кусочек» металлического водорода, по-видимому, еще далеко.

В качестве другого примера «экзотического» вещества в 1 была упомянута аномальная (сверхплотная или полимерная) вода, вопрос о существовании которой широко тогда дебатировался в литературе. По этому поводу в 1 было отмечено, что «вопрос нужно считать открытым, хотя, на мой взгляд, работы (здесь были даны ссылки на литературу — В. Г.) оставляют не так уж много надежды на существование чистой полимерной (сверхплотной) воды. Но, независимо от окончательного ответа, уже проведенные исследования ясно свидетельствуют о том, сколь трудно решить даже такой вопрос, как возможность появления новой фазы одного из самых распространенных веществ... Этот пример поучителен во многих отношениях, в частности как напоминание о необходимости любое открытие считать окончательно установленным лишь после многократной и всесторонней проверки».

Процитированное замечание, в котором выражалось сомнение в существовании аномальной воды, хотя вопрос в целом считался открытым, побудило некоторых авторов работ об аномальной воде написать в УФН специальное письмо (УФН, 1971 т. 105, с. 179). В этом письме мне советовали «не делать поспешные негативные выводы, хотя и привлекающие простотой, но сделанные на основании неполного, одностороннего и некритического использования литературы вопроса». Прошло, однако, еще лишь немного времени, и вопрос об аномальной воде был «закрыт»: ока-

залось, что исследовавшаяся жидкость представляла собой обыкновенную воду, содержащую ряд примесей.

На этом эпизоде я здесь остановился только потому, что хотелось бышний раз подчеркнуть, сколь важна многосторонняя проверка экспериментальных данных, особенно когда на их основании делаются далеко идущие выводы. Авторы соответствующих работ вправе их публиковать, ибо они при этом рискуют больше всех. Кроме того, что объективно еще более важно, публикация позволяет быстрее провести проверку в других лабораториях. Поэтому, по моему мнению, не следует строго осуждать (как это иногда делается) авторов, опубликовавших неверную работу, если, конечно, они искренне заблуждались и экспериментировали в целом на должном уровне. Но вот чего никто не вправе требовать, так это признания «открытий» до их подтверждения в нескольких местах. В разумных пределах, авторы имеют право на ошибку, но все окружающие имеют не меньшее право на сомнения.

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

В 1 фигурирующая в заголовке проблема была выделена из всех других из области физики полупроводников, и, как мне кажется, для этого имелись основания. Но в настоящее время задача в основном решена (или, если угодно, «оправдала доверие») — металлическая экситонная жидкость в полупроводниках была создана и во многом исследована. Этой проблеме посвящена даже специальная монография^{13a}, появившаяся в английском оригинале в 1977 г. Правда, далеко не все еще сделано (но так бывает почти во всех случаях), возникли существенно новые задачи (они связаны с квазиодномерными и квазидвумерными полупроводниками; см.² и указанную там литературу). Тем не менее сегодня уже вряд ли было бы обоснованно упомянуть проблему металлической экситонной жидкости в качестве единственной представительницы физики полупроводников и почти всей физики твердого тела. Очень интересны и широким фронтом исследуются фазовые переходы металл—диэлектрик, неупорядоченные полупроводники^{13b}. Сюда же можно отнести так называемые спиновые стекла и квантовые кристаллы, а также слоистые и нитевидные соединения (материалы).

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

Фазовые переходы, это собственно, не одна проблема, а нечто более широкое. Правда, поскольку у всех фазовых переходов есть общие черты, можно выделить и общую теорию фазовых переходов. При этом типичные переходы первого рода, в которых (и вблизи которых) термодинамические потенциалы фаз не имеют особенностей, ничем не примечательны (впрочем, это неверно, если иметь в виду перегрев и переохлаждение, образование зародышей и кинетику переходов). Но переходы второго рода, близкие к чистейшей форме первого рода (имеется в виду, например, недостаточная малость скрытой теплоты перехода, равной нулю для переходов второго рода) и критические точки, напротив, имеют особенности и давно привлекают к себе пристальное внимание. Правда, особенность в термодинамическом потенциале ярко проявляется далеко не всегда, и в целом ряде случаев (например, для перехода в сверхпроводящее состояние и, обычно, для магнитных и сегнетоэлектрических переходов) оказывается пригодной

довольно простая теория, в которой пренебрегается флуктуациями и особенностью игнорируется. Такой подход, восходящий в Ван-дер-Ваальсу, Вейссу и другим, был систематически развит Ландау и часто называется теорией фазовых переходов Ландау¹⁴. Тот факт, что такая теория расходится с опытом вблизи критической точки в жидкости, отмечался еще в конце прошлого века^{15a}. Ярким примером перехода, для описания которого теория Ландау неприменима, является λ -переход в жидком гелии (речь идет о переходе $\text{HeI} \rightleftharpoons \text{HeII}$ в жидком ^4He).

Создание теории фазовых переходов второго рода и критических явлений, должным образом учитывающей флуктуации и, вообще, позволяющей описать, хотя бы в принципе, все реальные переходы, превратилось в одну из самых фундаментальных проблем физики конденсированных сред. Задача оказалась при этом очень трудной. Однако еще в 60-е годы удалось заметно продвинуться вперед, и эти успехи были закреплены в истекшем десятилетии. Введение так называемых критических индексов, использование гипотезы о масштабной инвариантности, развитие довольно мощных методов приближенного вычисления критических индексов в сочетании с многочисленными более точными измерениями различных величин вблизи точек перехода — все это продвинуло теорию фазовых переходов далеко вперед. Поскольку основные достижения теории в этой области уже отражены в курсе теоретической физики^{14a} (см. также^{14b}), останавливаться на них не будем.

Вопрос, который здесь не следует обходить, таков: насколько теорию фазовых переходов можно в настоящее время считать завершенной в своей основе? Возможность точного вычисления, скажем, критических индексов для утвердительного ответа на этот вопрос, конечно, вовсе не обязательна — в области физики конденсированного состояния сколько-нибудь точное вычисление тех или иных констант или коэффициентов является исключением, а не правилом. Но, безусловно, от теории можно требовать, чтобы она давала возможность единым образом рассматривать все термодинамические и кинетические процессы и явления в области вблизи точки перехода. При этом коэффициенты в соответствующих уравнениях в определенных пределах могут подбираться на основе экспериментальных данных. Если подойти к теории фазовых переходов даже с такими несколько ограниченными требованиями, то ее нельзя не признать еще далеко незавершенной. Не говоря о кинетике, уже в отношении термодинамики при использовании критических индексов часто остаются без ответа вопросы об области применимости тех или иных предельных законов при удалении от точки перехода *). Главное же, обычно ограничиваются однородными средами, между тем как интерес представляют также многочисленные задачи, в которых имеются гранулы или дефекты, присутствуют неоднородные внешние поля и т. д. Наконец, существует ряд кинетических и динамических задач (течение в жидких кристаллах и в жидком гелии, распространение звука, релаксация ряда величин), которые нужно решать и вблизи точки фазового перехода и, более того, приобретающих особый интерес именно вблизи этой точки. В свете подобных естественных требований незавершенность теории фазовых переходов выступает вполне вышукло. Конкретно, это можно видеть на примере исследований сверхтекучести гелия II вблизи λ -точки¹⁶, хотя в этом случае теория продвинута вперед, видимо, дальше, чем в других.

*) Например, плотность сверхтекучей части гелия II вблизи λ -точки, которой отвечает температура T_λ , записывают в виде $\rho_s(T) = \text{const} (T - T_\lambda)^{2\beta}$, где критический индекс β близок к $1/3$ (из опытных данных следует, что $2\beta = 0,67 \pm 0,01$). Но какова точность такого выражения для $\rho_s(T)$, особенно при удалении от λ -точки?

Итак, проблема фазовых переходов сохраняет свою выделенность и значимость еще и в плане развития общей теории. Но, кроме того, к этой проблеме в той или иной мере относят как конкретные переходы, так и некоторые явления вблизи точек перехода. Примером последних может служить рассеяние света, обладающее вблизи точек перехода рядом интересных особенностей¹⁷. То же можно сказать о рассеянии рентгеновских лучей и нейтронов.

Что касается отдельных фазовых переходов или даже переходов в целом классе веществ, то истекшее десятилетие принесло много нового. Упомянем здесь о «несоразмерных» фазах в сегнетоэлектриках¹⁵⁶ и магнетиках, о фазовых переходах в жидких кристаллах, фазовых переходах в квантовых кристаллах, квазиодномерных и квазидвумерных веществах, о фазовых переходах на поверхности, фазовых переходах в жидком ^3He и в атомарном водороде. Каждому из этих вопросов можно и нужно посвятить отдельную статью, и частично это уже сделано на страницах УФН и других журналов. Не буду поэтому даже пытаться что-то пояснять в применении ко всем перечисленным случаям и ограничусь (см., однако, ниже раздел 6) несколькими замечаниями о жидком ^3He и атомарном водороде.

Возможность того, что в жидком ^3He могут (подобно тому, как это имеет место в сверхпроводниках) образовываться «пары» из двух атомов ^3He , обладающие целым спином, обсуждалась уже довольно давно. Образование пар с целым спином и их последующая бозе-эйнштейновская конденсация должны приводить к сверхтекучести, аналогичной сверхпроводимости (как известно, сверхпроводимость можно считать сверхтекучестью заряженной электронной жидкости в металлах или протонной жидкости в нейтронных звездах). Однако надежно теоретически оценить температуру сверхтекучего перехода в свое время не удалось, и экспериментальные результаты оказались в значительной мере неожиданными. Так, в 1972 и 1973 гг. выяснилось¹⁸, что в жидком ^3He (правда, под давлением, достигающим 34 атм) происходит даже не один, а два фазовых перехода соответственно при температурах, равных приблизительно $2,6 \cdot 10^{-3}$ и $2,0 \cdot 10^{-3}$ К. Затем было установлено, что речь идет о переходе в сверхтекучие состояния, отличающиеся друг от друга полным моментом количества движения «пар». Притяжение, приводящее к образованию пар, является, по-видимому, в основном, обменным (силы такого же типа приводят к ферромагнетизму). Исследования сверхтекучести и других эффектов в жидком ^3He (кстати сказать, этот изотоп является весьма редким — его распространенность в природе на несколько порядков меньше распространенности изотопа ^4He), проведенные за последние годы, поражают своей тонкостью и размахом¹⁸. Речь ведь идет о работе в области температур меньше 3 мК от абсолютного нуля 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 десять лет.

Остановимся также на возможном сверхтекучем переходе в газе из атомарного водорода, так как этот пример довольно любопытен, хотя и имеет, по-видимому, гораздо меньшее общезначимое значение, чем переходы в ^3He . Газ из атомарного водорода, если его как-то создать, в обычных условиях быстро превратится в газ из молекулярного водорода (H_2). Однако при низкой температуре $T \lesssim 1$ К в сосуде, стенки которого покрыты сверхтекучим гелием II, газ из атомарного водорода «живет» много минут¹⁹. Если же, кроме того, поместить газ в доста-

точно сильное магнитное поле, то стабильность атомарного водорода повышается²⁰, и, по-видимому, в достижимых условиях с его рекомбинацией можно не считаться (причина здесь хорошо известна: в молекуле H_2 спины электронов направлены противоположно друг другу; в сильном магнитном поле спины всех электронов направлены в одну сторону, и для образования молекулы H_2 спин в одном из атомов H необходимо перевернуть, что нелегко сделать). Атомы H с параллельными спинами в основном состоянии отталкиваются (точнее, на больших расстояниях между атомами существует некоторое ван-дер-ваальсово притяжение, но оно слабо). Поэтому такой газ при атмосферном давлении не сжижается вплоть до температуры абсолютного нуля. В то же время в бозе-газе атомов H при низкой температуре, зависящей от его плотности, должна произойти бозе-эйнштейновская конденсация, причем образующаяся фаза должна быть сверхтекучей (здесь существенно, что газ не является идеальным, а учет соответствующего взаимодействия как раз и приводит к сверхтекучести).

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

6. Физика поверхности

Физика поверхностей и различных процессов и явлений на поверхности привлекает внимание и развивается не одно десятилетие. Уже из весьма общих соображений ясно, что атомы и электроны на и вблизи поверхности находятся в других условиях, чем в объеме, и поэтому имеются основания думать, что на поверхности возможно существование новых фаз, различных переходов между этими фазами, новых типов и ветвей возбуждений и т. п. При этом под «новыми» понимаются фазы и возбуждения, отличные от объемных. Например, на поверхности (относим сюда и тонкий приповерхностный слой) кристаллическая решетка может иметь другую структуру и(или) параметры, в поверхностном слое может существовать магнитное упорядочение, отсутствующее при данной температуре в объеме и т. д. Известна и возможность распространения различных поверхностных волн (акустических волн, поляритонов, магнонов)²¹. Сюда же тесно примыкают свойства тонких пленок и слоев, в частности мономолекулярных, а также вопрос о поведении на поверхности отдельных атомов, молекул, дефектов и неоднородностей.

Тем не менее десять лет назад в статье 1 раздела «Физика поверхности» не было, а позже он хотя и появился², но в весьма скромном виде. Оправдано ли было такое недостаточное внимание (в плане статьи 1 и книжки²) к физике поверхности, является, разумеется, спорным вопросом. Это, впрочем, относится и к ряду других выделенных здесь проблем. Но, так или иначе, в настоящее время особое упоминание и подчеркивание роли физики поверхности представляется совершенно необходимым. Причина в общем та, что в последние годы то, что казалось только возможным, становится реальным благодаря прогрессу экспериментальной техники. Научились, по крайней мере в ряде случаев, получать и контролировать чистоту и состояние поверхности (степень шероховатости и т. п.), появились вновь или были заметно усовершенствованы методы исследования поверхности, приповерхностного слоя, атомов на поверхности и неоднородностей поверхности (ступенек и т. д.). Упомянем такие методы, как LEED (low energy electron diffraction) — диффракцию медленных электронов, ARPS (angle resolved photoemission spectroscopy) — фотоэмиссионную или фотоэлектронную спектроскопию с угловым разрешением, неупругое

рассеяние ионов с энергией порядка 1 МэВ, электронную микроскопию, изучение поверхностных акустических волн и поверхностных поляритонов (поверхностных электромагнитных волн)²². Известны и некоторые другие методы, связанные с использованием света, рентгеновских лучей и нейтронов.

Уже получено очень много результатов. Обнаружено поверхностное магнитное упорядочение. Особого упоминания заслуживают исследования инверсионных слоев на границе Si и SiO₂, свойств электронов на поверхности жидкого гелия²², изучение поверхностных поляритонов²¹ и реконструкции ряда кристаллических поверхностей^{22, 23}.

При этом под реконструкцией поверхности понимается изменение параметра решетки для атомов, расположенных на поверхности. Например, на поверхности Si (грань 111) в определенных условиях параметр решетки в 7 раз больше, чем в объеме. Возможно, что при рассмотрении явления реконструкции в ряде случаев существен учет роли поверхностных электронных уровней.

Впечатляющими, как по масштабам, так и по значению, являются исследования фазовых переходов в двумерных и квазидвумерных системах. Проблема эта, собственно, не очень новая, но, так сказать, все время набирает силу^{22, 24, 25}. Задачи здесь весьма разнообразны и, естественно, тесно связаны с физикой поверхности.

Нет сомнений в том, что физика поверхности находится на крутом подъеме и принесет много нового.

7. Поведение вещества в сверхсильных магнитных полях. Изучение очень больших молекул. Жидкие кристаллы

Стоящие в заголовке проблемы мало связаны между собой, все они отсутствовали в 1, но упоминаются в 2. Объединение этих трех проблем в одном разделе объясняется лишь нежеланием сколько-нибудь подробно на них здесь останавливаться. Вместе с тем просто опустить эти вопросы, как это сделано с многими другими, оказавшимися за пределами настоящей статьи, не хотелось бы.

Сверхсильные магнитные поля — это поля, в которых строение атомов, молекул или образующихся из них конденсированных веществ во многом определяется не кулоновскими силами, а магнитным полем. Такая ситуация возникает, когда зеемановское (магнитное) расщепление между уровнями превосходит расстояние между уровнями при отсутствии магнитного поля. Для атома водорода характерная разность энергий между уровнями при отсутствии поля (или в слабом поле) $E_a \sim e^4 m / 2 \hbar^2 \sim 10$ эВ. Зеемановское же расщепление $E_H \sim e \hbar H / mc \sim 10^{-8} H$ эВ (здесь напряженность поля H измеряется в эрстедах или в гауссах, поскольку под H можно понимать и магнитную индукцию B). Очевидно, $E_H \gg E_a$ при $H \gg e^3 m^2 c / \hbar^3 = (e^2 / \hbar c)^2 (mc / e \hbar) mc^2 \sim 3 \cdot 10^9$ Э. Для тяжелых атомов в правой части этого неравенства появляется множитель Z^3 (Z — порядковый номер).

Как ясно из приведенной оценки, вопрос о поведении вещества в сверхсильных магнитных полях до открытия пульсаров (1967—1968 гг.) оставался в достаточной мере абстрактным. Но теперь мы знаем, что на поверхности намагниченных нейтронных звезд — пульсаров — магнитные поля достигают значений $H \sim 10^{12} - 10^{13}$ Э. Таким образом, поверхностный слой нейтронных звезд и особенно пульсаров (у некото-

рых нейтронных звезд поле на поверхности может быть не столь сильным) находится в сильном поле. Если, как это весьма вероятно, в этом слое доминирует железо, то такое железо — совсем непривычный нам материал, состоящий, по-видимому, из вытянутых по полю молекул железа Fe_2 , образующих некоторую полимерную структуру с большой энергией связи. Последнее существенно для всей электродинамики пульсаров, так как определяет возможность вырывания электронов и ионов с поверхности (некоторые ссылки на литературу см. в ²).

Свойствами поверхности далеких от нас нейтронных звезд дело, к счастью, не ограничивается. Для атомов и молекул создать сверхсильные поля (в указанном выше смысле) в лаборатории мы не можем. Но существуют ситуации, в которых действие магнитного поля сильнее влияния кулоновских сил уже в доступных на Земле полях. Так, энергия связи водородоподобных экситонов в полупроводниках в $m_{\text{эфф}}/m\varepsilon^2$ раз меньше, чем для атома водорода (здесь $m_{\text{эфф}}$ — эффективная масса электрона и дырки, m — масса электрона и ε — диэлектрическая проницаемость вещества). Расщепление уровней в магнитном поле в этом случае больше в $m/m_{\text{эфф}}$ раз, чем для атома. В результате поле является сверхсильным при условии $H \gg 3 \cdot 10^9 \times m_{\text{эфф}}^2/m^2\varepsilon^2$ Э. При вполне реальных для полупроводника значениях $m_{\text{эфф}} \sim 0,1 m$, $\varepsilon \sim 10$ действие поля доминирует при $H \gg 3 \cdot 10^5$ Э, т. е. уже в доступных полях. В общем «экситонное вещество» можно исследовать в сильных и даже сверхсильных полях уже в лаборатории.

Можно надеяться, что даже сказанного достаточно, чтобы увидеть своеобразие и примечательность проблемы поведения вещества в сверхсильных магнитных полях.

Биологических вопросов, несмотря на их исключительную важность для науки и развития всего человеческого общества, мы здесь (как и в 1 и ²) совершенно не касаемся. В качестве оправдания, если оно нужно, достаточно сослаться на известный совет не пытаться объять необъятное. Упоминание об имеющих в основном биологическое значение гигантских молекулах (белки, нуклеиновые кислоты), которое здесь все же имеется, связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, такие молекулы занимают какое-то промежуточное место между «обычными» молекулами и конденсированной средой или капельками и нитями из конденсированной среды. С известными оговорками в таких условиях могут быть применимы понятия о фазовых переходах, упорядочении, зонах проводимости и т. д. Во-вторых, насколько я могу судить, еще имеется большое отставание (по сравнению с некоторыми другими областями физики) в отношении разработки эффективных методов анализа строения гигантских молекул, в частности в условиях, когда их очень мало и они находятся в растворе или смеси с другими молекулами. Потенциальная важность соответствующих исследований столь велика, что физики не должны об этом забывать.

Жидкие кристаллы — объект давно известный. Но я помню время, когда на них физики смотрели скорее как на некоторый курьез: вот ведь что бывает — одновременно кристалл и жидкость. Наличие большого числа более простых объектов для исследования, отсутствие технических применений — все это способствовало тому, что изучение жидких кристаллов находилось в тени. Сейчас положение совсем иное. Жидкие кристаллы широко используются в технике, велика их роль в биологии, и, наконец, жидкие кристаллы разных типов и фазовые переходы в них оказались интересными в плане различных исследований в области физики конденсированных сред. Внимание к жидким кристаллам не ослабевает.

8. Разеры, газеры и лазеры новых типов

Такого раздела в 1 также не было, несмотря на то, что внимание к лазерам в науке и технике огромно и не ослабевает уже около двадцати лет. Однако, хотя развитие лазерной техники, а также применение лазеров (включая сюда нелинейную оптику) — это большая физическая и техническая проблема, этого еще мало в плане отбора вопросов, обсуждаемых в настоящей статье. Другое дело — лазеры принципиально новых типов и лазеры с мощностью, на несколько порядков превосходящей существующие (весьма вероятно, что для достижения последней цели нужны и новые пути или принципы).

Здесь, кстати, ясно видна условность любого списка «особенно важных и интересных проблем». В каждой, практически, области физики и астрофизики скачок на несколько порядков, а иногда даже на порядок, уже составляет большую проблему, хотя и далеко не всегда реальную. Примером (разумеется, одним из многих) может служить физика высоких давлений. Давления вплоть примерно до 1 Мбар в общем освоены, но, как уже упоминалось в разделе 3, намного дальше в статическом режиме пойти не удастся, и здесь встречаются принципиальные трудности. Переход к статическим давлениям до 10 Мбар в не слишком малых объемах и при наличии контроля явился бы принципиальным шагом вперед. Но такой проблемы нет в нашем списке (по крайней мере, ее нет в явном виде), поскольку реальная физическая проблема не может сводиться к одним пожеланиям и разговорам.

Возвращаясь к теме о лазерах, отметим, что в последние годы много пишут о лазерах на свободных электронах (free electron lasers)¹⁶. Речь идет о реализации и в некоторых схемах существенном развитии довольно старой идеи о генерации электромагнитных волн пучком релятивистских электронов, проходящим через ондулятор или wiggler (в простейшем варианте это система магнитов, создающих вдоль пучка переменное поле, колеблющее электроны в пучке). Усмотреть в системах такого типа аналогию с лазером нелегко, и термин «лазер на свободных электронах» представляется мало удачным. Но дело, конечно, не в названии. Вполне возможно, что «лазер на свободных электронах» окажется практически интересным в области микрорадиоволн и в оптике. Что же касается перехода в рентгеновскую область спектра, то здесь эффективность устройства типа ондулятора с использованием плотных релятивистских электронных пучков остается еще совершенно проблематичной.

Нужно заметить, что задача создания очень мощных источников рентгеновских лучей в общем решена в результате использования синхротронов (можно для той же цели применить и линейный электронный ускоритель в сочетании с ондулятором или сделать ондуляторный участок в синхротроне). Но при этом обычно речь идет о некогерентном излучении отдельных электронов. Хотелось бы, однако, использовать когерентное излучение, как это имеет место в лазере и открывает возможность достичь высокую степень монохроматичности. Такое устройство — аналог лазера в рентгеновской области — можно назвать разером, а в случае гамма-лучей можно использовать термин газер *).

*) Как известно, 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» и «гамма-лазере», конечно, непоследовательно. Термины «разер» и «газер» возникают в результате замены в слове «лазер» буквы «л» (light) на «р» (рентген) или «г» (гамма). Но, конечно, терминология — дело второстепенное, тем более что в случае разеров и газеров речь еще не идет о каких-то реальных приборах.

В системах с электронным пучком когерентность «работает» лишь в достаточно плотных пучках и при ряде других условий, трудно осуществимых в рентгеновском диапазоне. Именно в этом смысле, т. е. в отношении когерентного «лазера на свободных электронах» (кстати, только при использовании когерентности такое название имеет какой-то смысл), выше и отмечено отсутствие ясности при переходе к рентгеновской части спектра.

Помимо плотных электронных пучков, предлагалось создать разеры на атомных переходах, а газеры — на переходах в атомных ядрах. Некоторая информация на этот счет содержится в ², § 7. За последнее время в этой области каких-то существенных достижений, насколько нам известно, не было. Все же пути, еще ранее освещенные в литературе, представляются очень сложными (к числу таких путей разумно отнести, например, связанные с использованием атомных взрывов).

Не всё, о чем мечтают, становится реальностью и тем более оказывается практически интересным. Вполне возможно поэтому, что разеры и газеры никогда не будут построены или, во всяком случае, не найдут широкого применения. Но кто знает... Какая-либо неожиданная идея, как это не раз бывало в истории физики, способна, в принципе, радикально изменить ситуацию.

9. Сверхтяжелые элементы

(далекие трансураны). «Экзотические» ядра

В 1 ядерная физика не только была включена в отдел «макрофизика», но и представлена только лишь одной проблемой (сверхтяжелые элементы). Спорно было и то, и другое, и сейчас ясно видно, что «особенно важных» вопросов в области ядерной физики во всяком случае больше. Поэтому уже в ² появился пункт «экзотические ядра».

Проблема поиска сверхтяжелых элементов не претерпела существенных изменений (с оговоркой, ясной из дальнейшего). Правда, в 1976 г. в одном из самых авторитетных физических журналов («Physical Review Letters») появилось сообщение об обнаружении весьма стабильных элементов с $Z = 116, 126$ и других. Однако эта работа оказалась ошибочной. Но от ошибок застрахованы только те, кто не работает. О том, что такие ошибки не следует драматизировать, речь уже была в разделе 3. Пути, на которых пытаются или надеются синтезировать, или обнаружить сверхтяжелые элементы, освещены в статьях, цитированных в ². Сейчас могу дополнительно указать лишь на то, что в конце 1980 г. появилось сообщение ²⁷ о возможном наблюдении трека ядра с $Z \geq 110$. Трек обнаружен в кристалле оливина метеоритного происхождения.

Ядра, входящие в состав космических лучей, оставляют в кристаллах следы, выявляемые при специальной обработке (в частности, при травлении и отжиге). Длина треков зависит от порядкового номера ядра. В работе ²⁷ наблюдалось около 150 треков ядер группы урана, длина которых составляет 180—240 мкм. Кроме того, наблюдался упомянутый один трек с длиной 365 мкм, который отвечает ядру с $Z \geq 110$. Разумеется, этот результат нуждается в подтверждении — нахождении и других таких треков, а также дополнительном доказательстве утверждения, что речь идет именно о ядре с $Z \geq 110$. Если наблюдаемый трек в самом деле принадлежит ядру с $Z \geq 110$, то распространенность таких ядер относительно распространенности ядер урана составляет величину порядка 10^{-3} .

Что касается различных других вопросов из области ядерной физики, то нужно отметить, что изучение ядра в ряде случаев проливает свет на характер взаимодействия между нуклонами и между нуклонами и леп-

тонами²⁸. Много внимания уделяется ядерной материи, существующей в первую очередь в нейтронных звездах. Здесь имеется очевидная связь с астрофизикой (см., например,²⁹). Очень интересна обсуждающаяся в литературе возможность существования ядерного вещества и атомных ядер с плотностью, превосходящей обычную в два и более раза (см. некоторые ссылки, приведенные в²). В известных ядрах, по-видимому, такая плотная фаза не реализуется, но обсуждаются перспективы наблюдения ее «предвестников» в некоторых ядрах (известно, что фазовый переход называется на свойствах вещества и до достижения точки перехода)^{30a}. Много внимания уделяется в последние годы соударениям релятивистских тяжелых ядер. В общем, нет сомнений в том, что изучение атомного ядра по-прежнему связано с рядом принципиальных физических проблем (см. также^{30б}).

III. МИКРОФИЗИКА

К микрофизике мы относим (в целом в согласии с общепринятым пониманием) физику «элементарных частиц» — изучение свойств, строения и взаимодействия протонов, нейтронов и других барионов, фотонов, мезонов, лептонов. Часто эту область называют физикой высоких энергий, что, конечно, односторонне, ибо далеко не всё при исследовании частиц непосредственно связано с высокими энергиями.

Статья 1 была написана в период, когда микрофизика переживала период некоторого разброда и шатаний, хотя уже зародились и зрели те идеи, которые привели в настоящее время к блестящим результатам и захватывающим дух перспективам. Ситуация, сложившаяся десять лет назад, и, несомненно, недостаточная компетентность автора в этой области привели к тому, что раздел «микрофизика» в 1 оказался бледным. Мне не удалось должным образом передать ту атмосферу, которую можно, говоря словами Эйнштейна³¹, охарактеризовать как «долгие годы поисков в темноте, полные предчувствий, напряженного ожидания, чередования надежд и изнеможения».

Впрочем, статья 1, ее дальнейшее развитие² и настоящая статья вовсе и не претендуют на адекватное решение столь высокой задачи. Что же касается содержащихся в 1 и² замечаний об изменении положения («места») микрофизики, о ее роли «вчера, сегодня и завтра», то, дабы к этому не возвращаться, отмечу, что мое мнение на этот счет не изменилось. «Проблематика микрофизики — это самые фундаментальные, принципиальные и поэтому для многих самые привлекательные вопросы физики» (1, с. 104). Понимая под микрофизикой передний фронт физики на каждом этапе ее усилий в изучении строения материи, сказанное было справедливо вчера, несомненно верно сегодня и будет верно завтра. Но изменились объекты исследования. Когда в центре внимания микрофизики находились атомы и атомные ядра, она доминировала во всем естествознании, определяла пути развития человечества. Кварки и глюоны, новые типы и виды частиц — все это захватывающе интересно и важно для физики, но занимает другое (по сравнению с атомами и ядрами) положение в науке в целом, в жизни человеческого общества. Это сегодняшнее место микрофизики в науке ближе всего, аналогично тому, которое принадлежит астрофизике (включая космологию). И какое же это замечательное положение, когда многие, читая о кварках и нестабильности протона, о нейтронных звездах и черных дырах, забывают о хлебе насущном, питаются интересом к науке. Вот такое, ясное из сказанного изменение ситуации в отношении микрофизики, собственно, только и подчеркивалось в 1 (раздел 12) и в² (§ 16). Я с полным уважением отношусь к иным мнениям и сообщал о них

в 1 и 2, но до настоящего времени считаю их либо неверными, либо плодом недоразумения (в спорах оппоненты весьма часто просто не понимают друг друга и имеют в виду совсем разные вопросы). Существует, конечно, вопрос о том, не возникнет ли в будущем у микрофизики новая исключительно важная область применений на практике (подобная, скажем, использованию ядерной энергии). Разумеется, отрицать такую возможность сколько-нибудь решительным образом невозможно. Я лишь считаю, что отнюдь не исключена и противоположная возможность (особенно в обозримом будущем), причем это не бросает на микрофизику никакой тени.

В отделе «микрофизика» статьи 1 фигурировали следующие проблемы: спектр масс (третья спектроскопия), фундаментальная длина (квантованное пространство), взаимодействие частиц при высоких и сверхвысоких энергиях, нарушение CP -инвариантности. Все эти проблемы можно упомянуть и сегодня, их значительность не померкла. Например, обнаруженное в 1964 г. несохранение CP -инвариантности не может еще считаться достаточно понятным, а за открытие этого несохранения присуждена Нобелевская премия по физике за 1980 г. Но в целом, даже при самом кратком освещении проблематики микрофизики, в настоящее время нужно в первую очередь выделять другие вопросы. Сделаем это здесь почти конспективно (помимо литературы, указанной в ², см. ³²⁻³⁸ и в особенности обзор современного состояния и перспектив физики высоких энергий ³⁹).

10. Кварки и глюоны. Квантовая хромодинамика

Вопрос о том, из каких простейших «элементов» состоит вещество, всегда находился в центре внимания микрофизики. На смену молекулам и атомам в качестве таких «элементов» сравнительно недавно пришли электроны, протоны, нейтроны, фотоны, а затем различные гипероны и мезоны, а также нейтрино. Таких частиц, которые часто называли элементарными (теперь этот термин встречается все реже), становилось все больше и больше (особенно это относится к сильно взаимодействующим частицам — адронам, в число которых входят как барионы, так и мезоны *). Естественно, что поэтому возникла или, правильнее сказать, усилилась тенденция к какой-то унификации и поиску «самых простейших» из элементарных частиц. Предлагались разные пути, и одним из них явилась зародившаяся в 1963—1964 гг. гипотеза кварков.

Вначале вводились три кварка, из которых, по предположению, «слеплены» все адроны. В последние годы, особенно после открытия в 1974 г. новых частиц ⁴⁰ со свойствами, успешно интерпретируемыми на основе кварковой модели с привлечением кварков четвертого типа — «очарованных» кварков, представление о кварках получило широкое признание. Поэтому известный итог многолетних поисков 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, некоторы-

*) Раньше мезонами называли не только адроны с целым спином (такие, как $\pi^{\pm,0}$ -мезоны), но и некоторые другие частицы, например мюоны (эти частицы назывались μ^{\pm} -мезонами). Здесь будет использоваться современная терминология, согласно которой сильно не взаимодействующие частицы с полуцелым спином называют лептонами (e^{\pm} -позитрон и электрон, μ^{\pm} -мюоны, τ^{\pm} -лептоны, нейтрино). Сильно не взаимодействующие частицы с целым спином называют, например, скалярными бозонами, векторными бозонами и т. д.

ми 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 $2/3$ и $-1/3$ (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), очень трудно. Однако очень похоже на то, и считается в настоящее время наиболее вероятным, что в свободном состоянии, т. е. как индивидуальные частицы 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 укрепила свои позиции и пока торжествует одну победу за другой.

Здесь нет возможности, да и неуместно подробнее излагать кварковую модель. Отсылая к статьям ^{35, 39-41} и указанным в ², приведем для удобства лишь табличку, содержащую квантовые числа кварков четырех типов или,

Аромат (тип кварка)	Заряд	Барионное число	Странность (S)	Очарование (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

как говорят, ароматов (flavors). Спин всех кварков равен $1/2$, 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. Для антикварков все квантовые числа меняют знак так, что, 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 $u\bar{d}$ (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 это и должно быть). К сожалению (?), дело не ограничивается указанными 4 частицами и 4 античастицами. Пришлось ввести еще одно квантовое число, совершенно условно называемое цветом (color), так что кварк каждого типа (flavor) может еще находиться в трех состояниях, отличающихся цветом (условно, например, красным, желтым 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 упомянутых кварков и антикварков, с учетом цвета, достигает уже 24. Впрочем, дело этим не ограничивается. Сейчас на основе как теоретических, так и экспериментальных данных (начиная с 1976 г.), вводится кварк пятого типа (аромата), а в теории появился и кварк с шестью ароматами. У этих двух (пятого и шестого) кварков, как и у четырех других (см. таблицу), барионное число равно $1/3$ и спин равен $1/2$. Заряд пятого кварка b (его называют bottom- или beauty-кварком) равен $-1/3$; этот b-кварк имеет массу порядка 5 ГэВ (масса c-кварка порядка 1,5 ГэВ и, по-видимому, значительно превосходит массы более

легких u -, d - и s -кварков *)). Как сказано, существование пятого кварка b подтверждается в эксперименте ⁴¹. Напротив, кварк шестого аромата t с зарядом $2/3$ (его называют top - или $truth$ -кварком) еще не обнаружен даже косвенно (как это, собственно, всегда можно сказать о кварках, связанных в адронах). По-видимому, дело в том, что масса t -кварка $m_t > 15$ ГэВ, т. е. существенно выше массы даже b -кварка, в силу чего на существующих ускорителях адроны, содержащие t - или \bar{t} -кварк, рождаться не могут ⁴².

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. Достаточно сказать, что кварки взаимодействуют между собой и это взаимодействие связано с обменом квантами некоторых полей (подобно тому, как электромагнитное взаимодействие связано с обменом фотонами). Но «склеивающих» кварки полей — они называются глюонными (от английского слова «glue» — клей) — приходится вводить несколько (обычно 8). Каждому такому полю отвечают свои кванты-частицы (глюоны). Недавно получены более или менее определенные экспериментальные указания на существование глюонов ³⁶.

Итак, 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 сомнение 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), не наблюдаемых 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 (состоял из трех) точечных частиц — их назвали партонами, и роль этих партонов вполне могут играть кварки.

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 полюса. Фактически же 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, казалось бы, весьма глубока: как ни дели магнит, полюса все равно остаются «спаренными» (т. е. любой магнитик имеет северный и южный полюса); 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. До недавнего времени предлагались даже схемы, в которых заряды кварков выбирались целочисленными. Но теперь уже получены вполне убедительные, по-видимому, экспериментальные указания в пользу дробности заряда кварков ⁴³.

Вопрос о существовании кварков можно считать одним из аспектов общей проблемы возможности различать простые (элементарные) и состав-

*) Поскольку кварки не существуют (и, уже заведомо, не обнаружены см., впрочем, ¹¹¹) в свободном состоянии, понятие об их массе имеет несколько условный или, если угодно, экстраполяционный характер.

ные (сложные) частицы. Мы можем утверждать, например, что атом водорода состоит из протона и электрона, поскольку разбить (ионизировать) этот атом легко — затратив лишь энергию больше 13,6 эВ и очень малую по сравнению с энергией 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 это 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 этом свойстве 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, но не носящими особенно фундаментального характера. Именно такую точку зрения высказывал, в частности, в конце своего пятидесятилетнего пути в физике один из создателей квантовой теории Гейзенберг⁴⁴. Осторожность в вопросе о «существовании» кварков и фундаментальности кварковой картины проявляют и физики, активно занимающиеся этой проблемой⁴⁵.

Сомнения в науке очень живучи. Как и осторожность, они, безусловно, полезны. Но жизнь, развитие идет своим чередом, как-то «не заботясь» об осторожности и сомнениях. Кварковая модель и построенная на ее основе теория сильных взаимодействий — квантовая хромодинамика — оказались очень плодотворными, эвристичными. Многие еще могут измениться, но трудно сомневаться в том, что пути назад уже нет: кварки и квантовая хромодинамика — большое завоевание физики.

Десять лет назад в статье 1 кваркам были посвящены лишь три строчки при перечислении различных направлений, на которых пытались решить проблему спектра масс «элементарных частиц». Несомненно, такое отношение к кваркам не свидетельствовало о проницательности автора в этом вопросе. Но я и сейчас считаю, что в 1971 г. кварковая модель была одной из многих, ее живучесть и плодотворность не были ясны (во всяком случае, это утверждение справедливо в отношении очень большого числа физиков). Теперь, однако, ситуация совершенно изменилась, в силу чего и оказалось целесообразным даже здесь остановиться на кварковой модели несколько подробнее (при этом был частично использован текст § 11 из²⁾).

О каких проблемах, связанных с кварками, речь идет в настоящее время?

Хотя некоторые эксперименты продолжаются, но почти уже нет сомнений в том, что кварки «удерживаются» в составе адронов и, следовательно, не существуют в свободном состоянии (впрочем, мыслима и такая

ситуация, при которой кварки могут «освободиться» лишь в каких-то исключительных условиях, скажем, при очень большой энергии; тогда, быть может, не возникнет противоречий с фактами — невозможностью освободить кварки имеющимися способами и их крайне малой концентрацией в природных веществах). Каков механизм удержания или конфайнмента (английское слово *confinement* часто употребляют и в русской литературе)? Определенного ответа еще нет, хотя, быть может, он содержится в уже используемой схеме квантовой хромодинамики. Дело в том, что соответствующие уравнения являются нелинейными и вообще весьма сложными (по сравнению, скажем, с уравнениями квантовой электродинамики). Поэтому далеко не все еще выяснено даже на базе уже существующей теории. Развитие квантовой хромодинамики — очень большая и актуальная проблема.

Вместе с тем, как уже подчеркивалось, даже при самом положительном отношении к кварковой модели число кварков еще нельзя считать окончательно установленным. Впрочем, это при невысоких энергиях не так уж важно, поскольку при этом «работают» в основном более легкие кварки и раньше всего кварки u и d . Более глубокий вопрос — являются ли кварки последними, наконец, «кирпичиками», из которых построены адроны? Уже тот факт, что кварков много, породил гипотезы о существовании протокварков или прекварков, фигурирующих в литературе под различными названиями (преоны и т. д.)³². В любом случае когда-то, казалось бы, с дальнейшим дроблением нужно «кончать». Трудно поверить в существование «бесконечной матрешки» — открыли одну куклу, а в ней другая, и так без конца. Собственно, такие факты, как взаимное превращение частиц друг в друга (в первую очередь превращение протона в нейтрон и наоборот), выясненное на предыдущем этапе развития микрофизики, и «удержание» кварков, фигурирующее на современном этапе, свидетельствуют о появлении в каждой следующей «матрешке» качественно новых черт. Это делает разговоры о «матрешках» в значительной мере условными. Но каков будет следующий этап? Во всяком случае, возможно, что на кварках «дробление» адронов остановится, но никаких реальных оснований против введения протокварков сейчас тоже нет. Что на этот счет будут думать еще десять лет спустя? Никто, конечно, не возьмется ответить на подобные вопросы.

11. Единая теория слабого и электромагнитного взаимодействия. $W^{\pm}, 0$ - бозоны. Лептоны

В последние три десятилетия своей жизни Альберт Эйнштейн посвятил много усилий созданию единой теории поля. Когда эта его деятельность начиналась, были известны лишь два взаимодействия — электромагнитное и гравитационное. К их объединению, естественно, и стремились. Правда, в дальнейшем стали известны также слабое и сильное взаимодействия, но, насколько я знаю, Эйнштейн не предпринимал каких-либо попыток расширить спектр своих усилий на единую теорию всех взаимодействий. Работа Эйнштейна над созданием единой теории поля не принадлежала к числу модных в то время направлений и к тому же не была успешной с прагматической точки зрения. Поэтому «в течение некоторого времени у ряда физиков было мнение, что идея объединения была всего лишь навязчивой идеей, овладевшей Эйнштейном на старости лет»⁴⁶. Но, говоря словами того же Янга: «Да, это была навязчивая идея, но с глубоким проникновением в суть фундаментальной структуры теоре-

тической физики. И, хочу я добавить, именно эта идея является стержнем современной физики»^{46 *}).

Действительно, единая теория слабого и электромагнитного взаимодействия (или, как всё чаще говорят, электрослабого взаимодействия), «великое объединение» (grand unification) — объединение слабого, электромагнитного и сильного взаимодействий — и, наконец, суперобъединение — объединение всех упомянутых взаимодействий с гравитационным — находится сейчас в центре внимания теоретической физики.

Еще в 30-е годы возникло предположение, что слабое взаимодействие переносится промежуточными векторными W^\pm -бозонами, 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 -бозонов должна быть весьма большой, и они еще не обнаружены (разумеется, последний факт связывают как раз с тем, что W^\pm -бозоны столь массивны, что их нельзя создать на существующих ускорителях). В таких условиях гипотеза промежуточных бозонов 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 -бозоны рассматриваются единым образом, причем дается объяснение различию в их массах^{32, 33, 48}.

В основе единой теории электрослабого взаимодействия, а также великого объединения и суперобъединения, лежат глубокие идеи, касающиеся симметрии, обобщенной калибровочной инвариантности и спонтанного нарушения симметрии. Во избежание профанации и учитывая цели настоящей статьи, не буду здесь пытаться осветить эти идеи даже в грубых чертах. Ограничусь в этом отношении ссылками на статьи^{32–35, 48} и также доступную не только теоретикам статью⁴⁹, освещающую весьма полезную для понимания сути дела связь калибровочных теорий со сверхпроводимостью.

Но уместно подчеркнуть здесь два момента. Во-первых, сильные стороны единой теории слабых и электромагнитных взаимодействий 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 -бозонов также промежуточного векторного нейтрального $W^0 \equiv Z^0$ -бозона. Обмен такой нейтральной частицей приводит уже в первом приближении к процессам рассеяния, которые в аналогичном приближении отсутствуют в случае существования только

*) В связи со стремлением Эйнштейна построить единую теорию поля и его отношением к квантовой механике было немало написано и сказано о «трагедии Эйнштейна» в последний период его жизни. Насколько такое суждение необоснованно на основании работы Эйнштейна над единой теорией поля, очевидно хотя бы уже из приведенной цитаты. Что же касается отношения Эйнштейна к квантовой механике, то совершенно неверно считать, что Эйнштейн «не понимал» или не ценил квантовую механику. Напротив, успехи, достигнутые с помощью квантовой механики, Эйнштейн понимал и признавал⁴⁷, но считал эту теорию «неокончательной» уже в ее области применимости. Более конкретно, Эйнштейн не считал окончательным содержащиеся в квантовой механике вероятностные элементы⁴⁷. Как и большинство физиков, я не разделяю позицию Эйнштейна в этом вопросе, относящемуся в большой мере не только к физике, но и к гносеологии. Кстати сказать, обсуждение основ квантовой теории, вопроса о ее полноте и статистике, теории квантовых измерений и т. д. не сходит со страниц научных журналов. Много об этом пишут и в самое последнее время. Так или иначе, утверждения о какой-то «научной трагедии» Эйнштейна представляются совершенно необоснованными.

W^{\pm} -бозонов (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 -бозона 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^{32-35, 48}. В этом, несомненно, можно видеть торжество теории. Имеются и другие ее подтверждения. За работы в области объединения слабых и электромагнитных взаимодействий^{32, 33} была присуждена Нобелевская премия по физике за 1979 г.

Вряд ли, однако, существующая теория электрослабых взаимодействий сможет считаться доказанной до обнаружения самих $W^{\pm,0}$ -бозонов. По некоторым оценкам масса W^{\pm} -бозона лежит между 77 и 84 ГэВ, а масса $W^0 \equiv Z^0$ -бозона заключена в пределах 88—95 ГэВ³². Массы $W^{\pm, 0}$ -бозонов могут оказаться и иными, но нет оснований думать, что они другие по порядку величины, и, таким образом, $W^{\pm,0}$ -бозоны можно будет создать уже на ускорителях следующего поколения⁵⁰ (см. также раздел 13).

Помимо $W^{\pm,0}$ -бозонов, 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^{14} ГэВ и больше; см.^{32, 33, 39}), 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. Вместе с тем, по крайней мере один скалярный бозон для калибровочной теории электрослабого взаимодействия необходим (теория не предсказывает массу этой частицы, и она может лежать в уже доступной области энергий³⁹).

Неопределенность в этом вопросе оставляет теорию несколько незавершенной даже в ее основах. Сейчас к тому же прибавился один момент, ставящий перед теорией трудный вопрос. Из единой теории следует, как считается, что связь между слабыми и электромагнитными силами должна приводить к некоторым небольшим, но качественно новым эффектам в области атомной физики. Конкретно, должна не сохраняться четность взаимодействия между электронами и нуклонами. В результате должна поворачиваться плоскость поляризации света, проходящего через парф, скажем, висмута в области частот некоторых атомарных переходов (при сохранении четности соответствующий поворот строго равен нулю). Такие опыты были поставлены в Оксфорде (Англия), Сиэтле (США), Новосибирске и Москве (СССР). В настоящий момент английские и американские данные представляются несколько неопределенными, данные новосибирской группы полностью подтверждают теорию⁵¹, а данные московской группы резко противоречат предсказанию теории⁵². Так, по данным⁵¹ некоторая величина R , характеризующая угол поворота плотности поляризации, равна $(-20,2 \pm 2,7) \cdot 10^{-8}$ при теоретическом значении R , составляющем около $-18 \cdot 10^{-8}$. По данным⁵², поворот плоскости поляризации практически отсутствует: $R = -(2,3 \pm 1,3) \cdot 10^{-8}$. Как нужно оценивать такую ситуацию? Ответ однозначен: нужны новые эксперименты, проведенные другими группами. По-видимому, ждать результатов осталось недолго. Если предсказание теории подтвердится, это будет означать ее большой успех, и на горизонте существующей теории^{32, 33} не будет видно ни одного облачка (как уже отмечалось, рождения $W^{\pm,0}$ -бозонов еще и не должно происходить на имеющихся ускорителях; следо-

вательно, здесь о противоречиях говорить не приходится). Если же подтвердится отрицательный результат ⁵², то это еще, вероятно, не будет крахом теории ^{32, 33}, но потребует, по-видимому, какой-то ее модификации. Не будем гадать о последствиях.

Итак, единая теория слабого и электромагнитного взаимодействия принесла большие, впечатляющие успехи. Но даже, если не касаться вопросов, связанных с более широким объединением (см. следующий раздел 12), в теории электрослабого взаимодействия остаются по крайней мере три перечисленные принципиальные проблемы (обнаружение W^\pm , 0 -бозонов, вопрос о скалярной частице, выяснение ситуации с вращением плоскости поляризации в висмуте).

К числу выдающихся успехов микрофизики за последние годы нужно отнести также открытие еще одного лептона (т. е. частицы, подобной электрону и μ -лептону, т. е. сильно не взаимодействующей). Речь идет о τ -лептоне с массой около 1780 МэВ (см. ⁵³). По-видимому, существует и соответствующее нейтрино ν_τ , хотя здесь доказательства носят косвенный характер ⁵³. Вопрос о том, сколько всего может существовать лептонов, остается открытым, некоторые ограничения здесь следуют из космологических соображений ^{39, 54}.

Вообще, общая проблема спектра масс частиц, т. е. вопрос о предсказании «параметров» (в первую очередь массы и спина) всех существующих частиц, далеко не решена, особенно если иметь в виду частицы, «выпадающие» из схем «великого объединения» и «суперобъединения» (см. ниже раздел 12). Среди таких чисто гипотетических частиц и тахионы (которые скорее всего существовать все же не могут), и максимоны ⁵⁵, а также другие частицы ³⁹, обладающие лишь гравитационным взаимодействием.

12. Великое объединение. Распад протона.

Суперобъединение. Масса нейтрино

Успехи единой теории слабого и электромагнитного взаимодействий, с одной стороны, и достижения теории сильных взаимодействий (квантовой хромодинамики), с другой стороны, стимулируют создание единой теории всех упомянутых трех взаимодействий (таким образом, невключенным остается лишь гравитационное взаимодействие). Такое уже упоминавшееся объединение называют «великим объединением». В основу обычно кладут три сорта кварков (дублеты (u, d) -, (c, s) - и (t, b) -кварков, причем каждый кварк может иметь три цвета) и три сорта лептонов (дублеты (ν_e, e) , (ν_μ, μ) и (ν_τ, τ)), причем у каждой частицы имеется античастица (все частицы имеют спин $1/2$, т. е. являются фермионами). Из всех этих 24 частиц (не считая античастиц) не обнаружены лишь t -кварки (правда, и существование «сопряженного» с τ -лептоном нейтрино ν_τ устанавливается довольно косвенным образом ⁵³). Все эти частицы вместе с рядом скалярных (спин 0) и векторных (спин 1) бозонов соединяются вместе с учетом некоторых требований симметрии и калибровочной инвариантности — это и есть великое объединение. Оно еще далеко не завершено и не однозначно (см. ^{32–35, 37–39, 112}). Для меня во всем этом имеется много неясных моментов, и поэтому тем меньше оснований здесь входить в какие-либо детали. Основные же качественные результаты великого объединения, которые хотелось бы здесь подчеркнуть, кажутся естественными уже из весьма общих соображений. В самом деле, поскольку кварки и лептоны как-то объединяются вместе, значит, они, вообще говоря, должны превращаться друг в друга и могут вносить вклад в массу всех частиц.

Отсюда вытекает поразительная возможность — протон оказывается нестабильным! Действительно, из энергетических соображений распад, например, типа $p \rightarrow \pi^0 + e^+$ вполне возможен. Если барионное число сохраняется, то такой распад запрещен, но возможность превращения кварков в лептоны и наоборот как раз и отвечает несохранению барионного числа. Имеющиеся экспериментальные данные свидетельствуют о том, что среднее время жизни протона $T_p > 10^{30}$ лет (напомним, что «возраст Вселенной» — время ее наблюдаемого расширения, составляет только порядка 10^{10} лет). В объеме, содержащем 10^4 т = 10^{10} г воды, содержится примерно $N = 10^{34}$ нуклона, и (считая, что связанный нейтрон распадается примерно с такой же вероятностью, как протон) при $T_p = 10^{31}$ лет в год должно наблюдаться $N/T_p = 10^3$ распадов. Теория великого объединения еще не предсказывает, однако, точного значения T_p . Существуют варианты теории, в которых $T_p \rightarrow \infty$ (протон стабилен), но в ряде исследованных вариантов $T_p \sim 10^{31} - 10^{33}$ года. Как ясно из приведенного примера, измерить время $T_p \sim 10^{31}$ лет еще возможно, но если $T_p > 10^{33}$ лет, решение задачи отодвинется, вероятно, на много лет. Соответствующие эксперименты находятся в стадии подготовки (в наибольшем из строящихся детекторов содержится 10^4 тонн воды — поэтому выше мы и выбрали для примера это значение). Помимо распада протона, в некоторых вариантах теории предсказывается превращение нейтрона в антинейтрон и обратно (нейтронные осцилляции)³⁹.

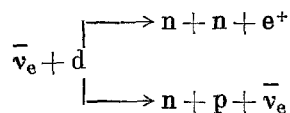
Если распад протона будет обнаружен, то это окажется торжеством теории великого объединения, но, как ясно из сказанного, отрицательный результат ее еще не опровергнет. Если $T_p \leq 10^{33}$ лет, то сильные, слабые и электромагнитные взаимодействия сравниваются при колоссальной энергии $E_x \sim 10^{15} - 10^{16}$ ГэВ, чему отвечает масса $m_x = E_x/c^2 \sim 10^{-9} - 10^{-8}$ г (масса протона $M \equiv m_p = 1,67 \cdot 10^{-24}$ г). Такое большое значение m_x как раз и обеспечивает малую вероятность распада протона. Заметим, что так называемая гравитационная или планковская масса (масса мак-симона) $m_g = \sqrt{\hbar c/G} = 2,2 \cdot 10^{-5}$ г ($E_g = m_g c^2 \sim 10^{19}$ ГэВ) лишь на 3—4 порядка больше приведенной массы m_x . Массе m_g отвечает длина $l_g = \hbar/m_g c = \sqrt{\hbar G/c^3} = 1,6 \cdot 10^{-33}$ см, в то время как длина $l_x = \hbar/m_x c \sim 10^{-29} - 10^{-30}$ см. Отсюда следует, что великое объединение связано с предположением об отсутствии какой-либо фундаментальной длины $l_f > 10^{-29}$ см (см. ниже раздел 13).

Следующим шагом после великого объединения (подчеркнем еще раз, что оно еще далеко не завершено) должно явиться объединение всех взаимодействий, включая гравитационное. С этим в рамках известных представлений (при отсутствии фундаментальной длины больше l_g) связан переход в область длин $l \sim l_g \sim 10^{-33}$ см, масс $m \sim m_g \sim 10^{-5}$ г и энергий $E \sim E_g \sim 10^{19}$ ГэВ = 10^{28} эВ (выше мы иногда измеряли массу в эВ, что, конечно, вполне допустимо; здесь же, для ясности, проводится различие между массой m и энергией $E = mc^2$).

Над объединением различных взаимодействий, отвечающим мечтам Эйнштейна о подлинно единой теории поля, сейчас усиленно работают. Теория, объединяющая электромагнитное и гравитационное взаимодействие, в которой приходится ввести также частицы со спином $3/2$ (гравитино), называется супергравитацией. Существует еще более общая схема суперобъединения, охватывающая все известные взаимодействия^{39, 56}. Подробнее касаться этой проблемы, как и связи с космологией и некоторыми других вопросов, здесь возможности нет^{39, 54}.

Связь между нейтрино и другими частицами, отражающая их «объединение», приводит к тому, что нейтрино, вообще говоря, имеет отличную

от нуля массу покоя m_ν (эта масса может, конечно, быть различной для ν_e , ν_μ и ν_τ -нейтрино). Величину этой массы при современном состоянии теории вычислить нельзя, да, если бы и было возможно, все равно необходимо определить массу нейтрино на опыте. Такая постановка вопроса отнюдь не нова. Масса нейтрино (имеется в виду электронное нейтрино ν_e) обычно раньше считалась равной нулю по двум причинам. Во-первых, из опыта известно, что эта масса мала в том смысле, что $m_{\nu_e} \ll m_e = 5,1 \cdot 10^5$ эВ (ниже будем измерять массу в энергетических единицах). Во-вторых, теоретическая схема, в которой $m_\nu = 0$, проще и элегантнее, чем при $m_\nu \neq 0$. Но, разумеется, была ясна недостаточность таких соображений и проводились опыты, позволяющие установить предел $m_{\nu_e} < 50$ эВ $\sim 10^{-4} m_e$. Основная идея таких экспериментов — изучение спектра β -распада, причем удобно использовать распад трития ($t \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e$), поскольку в этом случае граница спектра весьма низкая ($E_{e, \max} = 18,6$ кэВ). Недавно опыты такого типа были произведены с еще большей, по мнению их авторов ⁵⁷, точностью. В результате было высказано утверждение, что масса m_{ν_e} лежит в интервале 14—46 эВ. Нет сомнений в том, что опыты должны быть продолжены, и при этом в нескольких лабораториях. Другое указание на существование у нейтрино отличной от нуля массы получено рядом авторов, в частности, из анализа реакцией



(см. ⁵⁸). Речь, по существу, идет о так называемых осцилляциях нейтрино — превращении ν_e -нейтрино в другие сорта нейтрино (ν_μ и ν_τ) и наоборот ⁵⁹. Если такие осцилляции имеют место, то массы различных нейтрино отличны одна от другой и, следовательно, по крайней мере одна из масс не должна равняться нулю. Экспериментально наличие осцилляций должно приводить к тому, что интенсивность даже не расходящегося пучка, скажем, ν_e -нейтрино в вакууме должна изменяться с расстоянием. Такая возможность очень важна для интерпретации опытов по детектированию нейтрино от Солнца (см. ниже раздел 21) и, разумеется, с принципиальной стороны. Если масса нейтрино $m_\nu \gtrsim 10$ эВ, то это имеет огромное космологическое значение (см. ⁶⁰ и ниже раздел 17). Но если массы всех сортов нейтрино $m_\nu < 1$ эВ, роль нейтрино для космологии уже, вообще говоря, незначительна. Для физики же, естественно, необходимо знать массу всех сортов нейтрино, независимо от соответствующих значений. Определение массы нейтрино — бесспорно, одна из важнейших и актуальнейших задач микрофизики.

13. Фундаментальная длина.

Взаимодействие частиц при высоких и сверхвысоких энергиях

Проблема фундаментальной длины возникла как из общих соображений, восходящих к Риману и Эйнштейну (ссылки см. в 1 и 2), так и из «практических» потребностей теоретической физики. Под последними имеется в виду необходимость как-то «расправляться» — устранять или, по крайней мере, обезвреживать встречающиеся в теории расходимости (бесконечные величины). Такие расходимости появляются в основном при учете все более коротких длин волн (ультрафиолетовая катастрофа), фигурирующих в различных выражениях, содержащих спектральное

разложение и определяющих энергию и некоторые другие величины. Для точечных частиц, а в существующей релятивистской квантовой теории поля частицы считаются точечными, не существует какой-либо естественной длины, «обрезающей» спектр, и, казалось бы, появление расходимостей неизбежно. Однако еще в классической физике научились до известной степени обезвреживать некоторые расходимости путем «перенормировки» массы (имеется в виду, например, замена в уравнении движения заряженной частицы суммы некоторой механической или затравочной массы и электромагнитной массы на экспериментально наблюдаемую массу частицы). Крупнейшим успехом квантовой электродинамики в 40-е и 50-е годы явилось проведение последовательной «перенормировки» всех расходящихся выражений при использовании теории возмущений. В результате была построена теория, полностью согласующаяся с экспериментом⁶¹. Но экспериментальные данные отвечают длинам l , не меньшим примерно 10^{-16} см (этому соответствует энергия $E \sim \hbar c/l \sim 0,1$ эрг $\sim \sim 100$ ГэВ; см.⁶²). Другими словами, сейчас можно довольно надежно утверждать, что вплоть до расстояний $l \sim 10^{-16}$ см никакой новой, фундаментальной длины l_f не существует и применимы наши обычные представления о пространстве (для времени это отвечает интервалу $t \sim l/c \sim \sim 3 \cdot 10^{-27}$ с). Однако и раньше не вводилась фундаментальная длина $l_f > 10^{-17}$ см. Напротив, значение $l_f \sim 10^{-17}$ см довольно широко использовалось в качестве границы применимости для перенормируемых теорий и, по сути дела, в качестве фундаментальной длины, на которой более или менее автоматически должно происходить «обрезание» всех расходящихся выражений. А такое обрезание было необходимо, в частности, в теории слабых взаимодействий до ее объединения с электродинамикой. Но сейчас, когда такое объединение осуществлено, теория стала перенормируемой, расходимости исчезли, и в этом, собственно, состоит одно из основных достижений новой теории^{32, 33}. Таким образом, реальные основания для введения фундаментальной длины $l_f \sim 10^{-17}$ см исчезли. Это обстоятельство столь вдохновило теоретиков, что о фундаментальной длине вообще практически забыли и смело работают с длинами порядка $10^{-29} - 10^{-30}$ см (см. предыдущий раздел) вплоть до гравитационной (планковской) длины $l_g = \sqrt{G\hbar/c^3} \sim 10^{-33}$ см. Последняя длина и играет, по сути дела, роль фундаментальной длины. Такой подход разумен и оправдан, поскольку для введения длины $l_f \gg l_g$ нет никаких реальных оснований. Но столь же ясным представляется и необходимость помнить, что производится экстраполяция (если можно так выразиться) известных пространственно-временных представлений на целых 17 порядков (от $l \sim \sim 10^{-16}$ до $l \sim l_g \sim 10^{-33}$ см)! Столь дерзкая экстраполяция типична для физики (другой пример: предположение о полной справедливости установленных в земных лабораториях законов для всей Вселенной, за исключением ближайших окрестностей «начальной» сингулярности; точнее см. ниже раздел 17). Но это не значит, что следует забыть о возможности существования какой-то фундаментальной длины $l_f \gg l_g$. Если она существует, то, вероятно, радикально скажется на всей физике при длинах $l \lesssim l_f$, причем не только на микрофизике, но и на черных минидырах (см.⁶³ и ниже раздел 18) и на космологии (раздел 17).

Вот почему вычеркнуть проблему фундаментальной длины из списка ключевых проблем физики и астрофизики нет оснований.

Что касается проблемы взаимодействия частиц при высоких и сверхвысоких энергиях, то она принадлежит к числу вечных. Меняется лишь граница энергии, достижимая в данный период. В 1971 г. максимальная энергия для протонов, достигнутая на ускорителе, составляла 75 ГэВ (Серпухов). Сейчас (и уже несколько лет) максимальная энергия в лабора-

торной системе отсчета также для протонов составляет 500 ГэВ (Батавия, США). Однако в системе центра масс эта энергия равна всего $E_c \approx \sqrt{E \cdot Mc^2/2} \approx 15$ ГэВ (в расчете на один протон), что отвечает длине $l \sim (\hbar/m_\pi c) (Mc^2/E_c) \sim 5 \cdot 10^{-15}$ см (M — масса протона, $m_\pi \sim M/6$ — масса π -мезона; для сильно взаимодействующих частиц фигурирует именно указанная длина, а не $l \sim \hbar c/E_c \sim 10^{-15}$ см). Дальнейший прогресс связывается в первую очередь со встречными пучками. В ЦЕРНе уже работает такой ускоритель, причем в каждом из пучков энергия протонов равна 31 ГэВ. Скоро (через несколько лет) вступит, вероятно, в строй ускоритель в той же Батавии с двумя встречными пучками протонов (или протонов и антипротонов) с энергией $E_c \sim 1000$ ГэВ в каждом⁵⁰. Это отвечает энергии протонов в лабораторной системе $E \sim 2 (E_c)^2/Mc^2 \approx \approx 2 \cdot 10^6$ ГэВ = $2 \cdot 10^{15}$ эВ. В СССР существует проект ускорителя с $E_c = 3000$ ГэВ (отсюда $E \approx 2 \cdot 10^{16}$ эВ)⁵⁰. Большие энергии на ускорителях вряд ли будут достигнуты до конца нашего столетия. Между тем даже при $E_c = 3000$ ГэВ длина $l \sim \hbar c/E_c \sim 5 \cdot 10^{-18}$ см, а $l \sim (\hbar/m_\pi c) \cdot (Mc^2/E_c) \sim \sim 3 \cdot 10^{-17}$ см.

В космических лучах заведомо имеются частицы с энергией 10^{20} эВ, но их очень мало; однако при $E \geq 10^{18}$ эВ интегральная интенсивность первичных космических лучей у Земли порядка 10^{-2} частиц/км²стер·час $\sim 10^2$ частиц/км²стер·год. Поэтому в области энергии до $E \sim 10^{17}$ — 10^{18} эВ еще вполне реально использование космических лучей для физики высоких энергий (см. ⁶⁴; при $E \geq 10^{18}$ эВ интенсивность первичных космических лучей порядка 10^6 частиц/км²стер·год). Пренебрежение космическими лучами для исследований в физике высоких энергий в области, еще не достигнутой на ускорителях, представляется по меньшей мере близорукостью. Впрочем, быть может, здесь правильное говорить о снобизме, весьма распространенном и в научной среде. Так или иначе, вся история развития физики высоких энергий (см. ⁶⁴ и указанную там литературу) достаточно ясно свидетельствует в пользу использования космических лучей в физике высоких энергий, и я надеюсь, что будущее еще раз подтвердит такое заключение.

14. Нарушение CP -инвариантности.

Нелинейные явления в вакууме

в сверхсильных магнитных полях.

Несколько замечаний о развитии микрофизики

В 1 проблеме нарушения CP -инвариантности был посвящен специальный раздел, причем проблематика, нашедшая некоторое отражение выше в разделах 10, 11 и 12, почти вообще отсутствовала. Теперь же вопрос о нарушении CP -инвариантности остается важным и в целом нерешенным, но стал одним из многих в широком спектре проблем, обсуждаемых в рамках калибровочных теорий различных взаимодействий^{39, 66}.

К числу проблем, отсутствовавших в 1, но имеющих в ², относится круг вопросов, связанных с нелинейными явлениями в вакууме в сильных электромагнитных полях. Постановка задачи здесь отнюдь не нова и восходит к началу 30-х годов. Именно тогда было понято, что в сильных электромагнитных полях: электрическом поле $\mathcal{E} \sim \mathcal{E}_c \sim m^2 c^3 / e \hbar \sim \sim 10^{14}$ ГЭСэ/см $\sim 3 \cdot 10^{16}$ В/см и магнитном поле $H \sim H_c \sim m^2 c^3 / e \hbar \sim 10^{14}$ Э — вакуум ведет себя подобно некоторой нелинейной среде. К тому же в достаточно сильном электрическом поле могут рождаться электрон-позитронные пары. Однако долгое время о сильных полях (в указанном смысле) приходилось только мечтать. Открытие пульсаров (вращающихся намагниченных нейтронных звезд), на поверхности которых поле сравнимо

с H_0 (или, точнее, лишь на один-два порядка меньше), изменило ситуацию. Кроме того, частицы с высокой энергией E могут порождать пары e^+e^- в поле, которое в E/mc^2 раз меньше поля \mathcal{E}_0 (см. ⁶⁸). Сверхсильные электрические поля существуют и вблизи атомных ядер (некоторые ссылки на литературу см. в ²). Все это, естественно, повышает интерес к обсуждаемой проблеме нелинейности в вакууме в сильных полях, выделяет ее.

В целом же нужно отметить, что в области микрофизики отдельные темы и проблемы как-то теснее смыкаются друг с другом по сравнению с макрофизикой и астрофизикой. В общем это понятно: многие направления микрофизики относительно молоды, не успели далеко разойтись. Далее, ясный из названия разделов 10—14 перечень проблем довольно условен и может быть без труда изменен и детализирован. Наконец, совсем не были упомянуты, например, пионная конденсация в плотном веществе и ударные волны, возникающие при соударениях тяжелых ядер (впрочем, эти вопросы следует отнести скорее к разделу 9), вопрос о поведении вещества при сверхвысоких плотностях и температурах ^{49, 67}, проблема магнитных монополей, вопрос о физическом содержании понятия «вакуум», особенно в нестационарных условиях. При этом перечисленные проблемы, как и вопросы о барионной асимметрии Вселенной и об изменении различных физических величин и «констант» со временем, можно отнести не только (и даже не столько) к физике, сколько к космологии.

Последнее, разумеется, не случайно. Физика и космология всегда были связаны, но сейчас эта связь стала особенно тесной и двусторонней. На языке расстояний или энергий, которым мы уже пользовались в разделе 12, можно сказать, что для физики очень важны расстояния $l_x \sim 10^{-29} - 10^{-30}$ см и энергии $E_x \sim \hbar c/l_x \sim 10^{15} - 10^{16}$ ГэВ. Но ни подобные расстояния, ни такие энергии для лабораторной физики сейчас совершенно недоступны. Единственное «место», где можно изучать вещество в таких условиях, это ранние стадии космологической эволюции, причем длине $l_x \sim 3 \cdot 10^{-30}$ см отвечает плотность $\rho_x \sim \hbar/c l_x^4 \sim 10^{80}$ г·см⁻³. (Напомним, что планковская плотность $\rho_g \sim \hbar/c l_g^4 \sim 10^{94}$ г·см⁻³, поскольку $l_g \sim 10^{-33}$ см *.) Особый интерес, конечно, представляют и значительно меньшие плотности вплоть до ядерной плотности $\rho_n \sim 3 \cdot 10^{14}$ г·см³. Итак, единственным источником сведений о веществе с $\rho \gg \rho_n$ служит космология ^{54, 67, 68}. К сожалению, ни здесь, ни в нижеследующих разделах, посвященных астрофизике, мы развить эту тему не сможем.

Прогресс в области конкретных направлений в науке происходит в известных пределах неравномерно. Встречаются бурные годы и десятилетия, бывают и периоды затишья и даже разброда. Особенно это относится к такой области, как микрофизика, которая при используемом здесь ее определении и понимании всегда находится впереди, на переднем крае. В нашем столетии самым блестящим в прошлом периодом в развитии микрофизики всеми будет, вероятно, признан интервал, ограниченный, с одной стороны, 1924—1925 гг., и, с другой стороны, 1930—1932 гг. За эти годы была построена, в большой мере развита и понята нерелятивистская квантовая механика, заложены основы релятивистской квантовой теории (уравнения Клейна — Гордона и Дирака для частиц соответственных со спинами 0 и 1/2, квантовая теория излучения). К тому же в 1932 г.

*) Здесь мы для простоты ограничиваемся соображениями размерности. В конкретных космологических моделях можно, естественно, пойти дальше. Так, в горячих фридмановских моделях температура Вселенной T (ГэВ) $\sim 10^{-3} t^{-1/2}$, где t — время в секундах, отсчитываемое от классической сингулярности (подробнее см., например, ⁵⁴). Упомянутой в разделе 12 массе $m_x \sim 10^{-9}$ г отвечают энергия $E_x = m_x c^2 \sim 10^{15}$ ГэВ и такая же характерная температура T в ГэВ. Отсюда $t \sim 10^{-36}$ с.

были открыты позитрон и нейтрон, а в 1931 г. сделано предположение о существовании нейтрино.

Но затем начались затруднения. Основное из них было связано с появлением расходящихся выражений, препятствовавших развитию даже электродинамики, не говоря уже о зародившихся теориях слабого и сильного взаимодействий. Встретились трудности и в релятивистской теории частиц со спином. ббльшим $1/2$, т. е. со спином 1 , $3/2$, 2 и т. д.

Никаких рецептов и предписаний, как двигаться в неизведанной области, не существует. Действуют методом проб и ошибок. Побеждает тот, у кого лучше интуиция, умение решить сложную задачу. Впрочем, как мне представляется, не меньшую роль, если речь не идет о титанах масштаба Эйнштейна, играют удача и случай.

Вспоминаю те направления, которые «гремели» на моей памяти (я начал заниматься теоретической физикой в 1938 г.): лямбда-лимитинг-процесс, нелокальная теория поля, учет инерции собственного поля в теории с высшими спинами и релятивистские уравнения для частиц с многими спинами, метод перенормировок в квантовой электродинамике, метод дисперсионных соотношений, аксиоматический подход, метод S-матрицы (с отрицанием роли лагранжевых и гамильтоновских уравнений), бутстрап, реджистика... Из всего этого большой успех был достигнут (в конце 40-х годов) только в электродинамике в результате использования метода перенормировок. Результат получился блестящий ⁶¹, но в теоретическом плане он кажется несколько локальным, «техническим» и ограниченным. Во всяком случае, хотелось бы иметь теорию, свободную от всяких перенормировок и, кроме того, не ограничивающуюся электродинамикой. Из других перечисленных направлений я сам, когда занимался теорией частиц, работал лишь в области теории спинов. Хотя этой деятельности я и не стыжусь (сошлюсь на последнюю публикацию ⁶⁹, где приведены и другие ссылки), но говорить о каком-то явном успехе тоже не приходится. Остальные подходы (кроме метода перенормировок) также не могут претендовать на многое. Некоторые из них всегда казались безыдейными, а «из пустого гнезда воробей не вылетит» *).

Напротив, то, что происходит в настоящее время, хотя и не во всем является новым, базируется на богатом идейном фундаменте (симметрия и, в частности, обобщенная калибровочная инвариантность, спонтанное нарушение симметрии, нелинейные уравнения с богатыми возможностями). Представления о строении материи поднялись на новую ступень (кварки, глюоны и т. д.). Имеется целый ряд реальных достижений в области тео-

*) Эти замечания можно неверно понять. В самом деле, как уже подчеркивалось, при движении в неизведанной области лишь успех гарантирует правильность выбранного пути. Поэтому никто не может на серьезном уровне заранее объявлять те или иные подходы «идейными» или «безыдейными». Вместе с тем при рождении новых гипотез и предложений каждый заинтересованный наблюдатель выносит для себя определенное интуитивное суждение, делает какой-то прогноз. В дальнейшем, естественно, такой наблюдатель радуется, если оказался прав, и огорчается в случае ошибки. Только в таком смысле автор и позволяет себе делать оценочные замечания типа приведенного в тексте. Например, я огорчен тем, что недооценил в свое время кварковую гипотезу, и доволен, что правильно почувствовал (а быть может, просто угадал?) непродуктивность некоторых попыток построить новую теорию.

Что касается метода перенормировок (давным-давно применяющегося уже в классической электродинамике в отношении массы частиц), то некоторые физики (быть может, даже большинство) считают его вполне удовлетворительным. Отраженное в тексте более прохладное отношение к перенормировкам ажже встречается в литературе. Подробнее останавливаться здесь на этом вопросе было бы затруднительно, да он и не существует для дальнейшего.

рии слабых и сильных взаимодействий. Контраст столь резок, что он бросается в глаза. Поэтому я и позволю себе, хотя и смотрю со стороны, превозносить последние успехи в области микрофизики. Вполне возможно, что переживаемый период будет уже вскоре признан столь же плодотворным и значительным в истории физики, как и упомянутое выше время, когда была создана квантовая механика.

Несмотря на подобное отношение, нельзя не видеть, что ни о какой завершенности единой теории взаимодействий говорить еще не приходится. Как подчеркивалось, это справедливо даже в отношении теории электро-слабого взаимодействия. Ее можно было бы считать в основном установленной, если бы были открыты W^\pm , 0 -бозоны, выяснен вопрос о скалярном мезоне и разрешена, в согласии с теорией, возникающая неясность в отношении вращения плоскости поляризации в висмуте. Что же касается квантовой хромодинамики, великого объединения и суперобъединения, то в этих областях незавершенность теории еще более очевидна и вполне возможны неожиданности. Тем интереснее будет следить за дальнейшим развитием событий как в отношении теории, так и в области эксперимента.

IV. АСТРОФИЗИКА

Предпоследнее десятилетие (60-е годы) было особенно богато астрономическими открытиями первостепенной важности. Достаточно упомянуть квазары, реликтовое тепловое излучение ($T \approx 3$ К), рентгеновские «звезды», космические мазеры на ряде молекул и, наконец, радиопульсары. Хотя какая-то доля случайности в такой плотной группировке открытий и имеется, несомненно, в целом речь идет об урожае, который удалось собрать в результате превращения астрономии из оптической во всеволновую.

Прошрое десятилетие (70-е годы) характеризуется дальнейшим впечатляющим развитием астрономии. О каком-то замедлении прогресса вряд ли имеются основания говорить, несмотря на то, что крупных открытий было сделано значительно меньше. В один ряд с упомянутыми можно, собственно, поставить лишь обнаружение рентгеновских пульсаров в двойных звездных системах, а также открытие гамма- и рентгеновских всплесков. Вместе с тем нельзя не отметить такое крупное достижение теории, как выяснение испарения черных дыр. Многое сделано и в теоретической космологии, в основном на базе и в связи с успехами микрофизики (см. выше).

Ниже будут перечислены достижения в отношении всех проблем, упомянутых десять лет назад в 1. Характерно при этом, что, в отличие от отдела, посвященного микрофизике, и даже, хотя и в меньшей степени, макрофизического отдела, добавить пришлось (это уже было сделано в ²) лишь два подзаголовка: «Физика «черных дыр»» (в разделе 18) и образование галактик (в разделе 19). Впрочем, вопрос об образовании галактик в 1 был упомянут (в разделе 16), да и сейчас о нем мы сможем сказать очень мало. Что же касается «черных дыр», то сейчас мне даже трудно понять, почему в 1 они в явном виде даже не упоминаются! Несомненно, это недосмотр, но, вероятно, отражающий отношение к черным дырам со стороны «научной общественности» в тот период. Причины несколько запоздалого, в целом, «признания» важности проблемы черных дыр как для астрономии, так и для физики, не очень ясны (см., однако, раздел 18). Ведь черные дыры на основе общей теории относительности были рассмотрены в 1939 г. ⁷⁰, а в рамках дорелятивистской физики вопрос о черных дырах начал обсуждаться еще в XVIII веке (несколько подробнее см. ², где введение понятия о черных дырах в 1798 г. связывается с именем

Лапласа; между тем, то же было еще раньше — в 1784 г. — сделано Мичеллом ⁷¹).

Обратимся теперь к кратким комментариям, касающимся прогресса астрофизики за последние десять лет, ограничиваясь проблематикой, упомянутой в 1 и выше в настоящей статье.

15. Экспериментальная проверка общей теории относительности

Общую теорию относительности (ОТО) проверяют уже, по крайней мере, с 1919 г., когда впервые удалось измерить предсказанное теорией отклонение световых лучей в гравитационном поле Солнца. Однако проверка ОТО продолжается, а достигнутая точность все еще не так уж впечатляюще велика, причем по хорошо известной причине. Именно, в пределах Солнечной системы гравитационное поле является слабым — соответствующий параметр $|\varphi|/c^2 < 2 \cdot 10^{-6}$ (здесь φ — ньютоновский гравитационный потенциал). В 1 отмечалось, что к тому же на горизонте появилась туча, связанная с появившимися указаниями на сплюснутость Солнца. С тех пор эта трудность «рассосалась». Появился и ряд новых экспериментов, причем все результаты находятся в полном согласии с ОТО. Но точность все еще не велика — обычно речь идет о точности (или, правильнее сказать, погрешности) около 1%. Исключением является измерение ⁷² гравитационного смещения частоты с погрешностью порядка 0,01% и более важное измерение ⁷³ запаздывания сигналов при связи с искусственными спутниками Марса (речь идет о «Викингах») с погрешностью порядка 0,1%. Оба результата находятся с указанной точностью в согласии с ОТО. Итак, последнюю можно в общем считать в слабом поле (члены порядка $|\varphi|/c^2$) проверенной с погрешностью около 0,1%. Это немалый прогресс по сравнению с прошлым (см. ⁷⁴ и указанную там литературу).

К числу интересных эффектов ОТО, могущих наблюдаться уже в слабом поле, относится линзоподобное действие масс (звезд, галактик) на проходящие вблизи них электромагнитные волны (радиоволны, свет и т. д.). Расчет такой гравитационной линзы был опубликован Эйнштейном в 1936 г., а в 1979 г. было высказано предположение, что двойной квазар 0957 + 561 A, B представляет собой на самом деле два изображения одного квазара (роль гравитационной линзы играет находящаяся примерно на половине пути между квазаром и нами эллиптическая галактика) ⁷⁵. В справедливости такой интерпретации теперь уже нет сомнений. Эти и аналогичные наблюдения гравитационных линз могут и должны использоваться, конечно, не для проверки ОТО (ОТО в слабом поле уже проверена со значительно большей точностью, чем точность, которая нужна при расчете гравитационной линзы — галактики), а для получения ценной астрономической информации на основе сопоставления расчетов с наблюдаемой картиной.

В 1 было замечено: «Если будет показано (я на это горячо надеюсь), что с экспериментальной проверкой ОТО в поле Солнца «все в порядке», то вопрос о такой проверке перейдет совсем в другую плоскость. Именно, остается вопрос о справедливости ОТО в сильных полях или вблизи, а также внутри сверхмассивных космических тел». Так сейчас и стоит проблема — нужно проверять ОТО в сильных полях. Для этой цели некоторый интерес представляют нейтронные звезды (на их поверхности $|\varphi|/c^2 \sim 0,1-0,3$), но в центре внимания находятся «черные дыры». Уже само их обнаружение явилось бы, по крайней мере, качественным подтверждением справедливости ОТО и в сильных полях. Количествен-

ные же измерения вблизи шварцшильдовского радиуса или, говоря несколько грубее (но и общее, если иметь в виду вращающиеся черные дыры), вблизи черных дыр могут послужить и для детальной проверки ОТО. Здесь можно не раскрывать содержание этих замечаний, поскольку это было недавно подробно сделано на страницах УФН в статье ⁷⁴.

Проверка ОТО в сильных полях — важная и актуальная задача. Другое дело, что физики и астрономы, не дожидаясь такой проверки, смело и широко применяют ОТО и в сильных полях (но еще в области, где квантовые эффекты малы; см. ⁷⁴ и ниже раздел 17). Подобный подход, типичный для теоретической физики, представляется вполне разумным и несколько не противоречит заботе о прочности «тылов» — признанию необходимости дальнейшей проверки ОТО, особенно в сильном поле.

16. Г р а в и т а ц и о н н ы е в о л н ы

Вопрос о гравитационных волнах на прочном фундаменте ОТО был поставлен Эйнштейном еще в 1916—1918 гг. Но наблюдать их не удалось до сих пор — хорошая иллюстрация того факта, что некоторые научные проблемы, даже вполне четко поставленные, не удается решить в течение многих десятилетий. В 1, правда, цитировалась статья, в которой было высказано предположение о уже состоявшемся приеме космического гравитационного излучения. Эти наблюдения, однако, не подтвердились. Тем не менее они принесли пользу — стимулировали разработку более чувствительных приемников гравитационного излучения (см. ⁷⁶ и цитированную там литературу). Впечатление таково, что через несколько лет можно рассчитывать на вступление в строй гравитационных антенн, способных принимать всплески гравитационных волн, в первую очередь от вспышек Сверхновых, образующиеся не только в нашей Галактике, но и в сравнительно близких других галактиках. Последнее весьма важно, поскольку в Галактике Сверхновые вспыхивают в среднем раз в 15—30 лет. Учитывая же вспышки в других галактиках, можно надеяться зафиксировать несколько событий в год. Другое дело, что здесь имеется значительная неопределенность, связанная с оценкой энергии, излучаемой в виде гравитационных волн при вспышке ⁷⁶. Но в целом прогноз выглядит довольно оптимистически, и, как сказано, в текущем десятилетии можно надеяться на рождение наблюдательной гравитационно-волновой астрономии.

Главная цель приема гравитационных волн, несомненно, состоит в использовании и этого «канала» для получения астрономической информации. Но последнее возможно лишь в предположении, что у нас имеется теория, описывающая процессы генерации, распространения и детектирования гравитационных волн. Такой теорией, дающей возможность, в принципе, получить ответы на все возникающие вопросы, является ОТО. Представляется очень вероятным, что на ОТО в этом отношении можно вполне надежно базироваться. Но все же следует помнить, что эта теория недостаточно проверена, причем справедливости ОТО в отношении наблюдавшихся эффектов в слабом поле здесь мало. Достаточно сказать, что существуют неэйнштейновские, т. е. отличные от ОТО, теории гравитационного поля, в которых гравитационные волны ведут себя не так, как в ОТО, в то время как релятивистские эффекты в Солнечной системе отвечают наблюдениям. В этом плане представляет интерес тот факт, что изменение орбиты двойного пульсара PSR 1913 + 16 происходит, по-видимому, в соответствии с предположением об излучении этой системой гравитационных волн в согласии с ОТО ⁷⁷. Результат этот нуждается, правда, в подтверждении и уточнении, но в целом важен и многозначителен.

К тому же неэйнштейновские теории гравитационного поля, вообще говоря, плохо развиты и в ряде случаев встречаются с трудностями. В общем, если покинуть твердую почву и опираться на физическую интуицию, то я хотел бы высказать уверенность в полной справедливости ОТО как основы гравитационно-волновой астрономии. Так или иначе, такое предположение вполне разумно и практически всегда делается в качестве рабочей гипотезы.

Основная сейчас задача — осуществить прием космических гравитационных волн. Если это удастся сделать, то из анализа соответствующих данных и на базе дальнейшего изучения двойного пульсара (и, будем надеяться, нескольких двойных пульсаров) окажется, вероятно, возможным убедиться в справедливости ОТО (для такого круга задач) и получить астрономическую информацию. Как сказано, здесь, быть может, не так уж долго осталось ждать первых результатов.

17. Космологическая проблема

Космологическая проблема может быть сформулирована как задача изучить структуру пространства в больших масштабах и найти закон эволюции Вселенной во времени. Звезд имеется огромное количество, даже галактик около миллиарда. Для осторожности оговоримся, что здесь и ниже идет речь о так называемой Метагалактике, т. е. о доступной наблюдению с Земли системе галактик (включая квазары). Это действительно осторожность, а не перестраховка из опасения неквалифицированной критики (ее примеры приведены в ⁷⁸). Дело в том, что истинная Вселенная может оказаться топологически очень сложной ⁷⁹, обычно же ограничиваются рассмотрением простейших моделей, в частности моделей Фридмана. В последних Вселенная считается в среднем (в достаточно больших масштабах) изотропной и однородной. Во фридмановских моделях (с равным нулю Λ -членом) и в некоторых более общих, хотя топологически и простых, в прошлом имела сингулярность — момент $t = 0$ (выбор для t значения 0, конечно, условен), когда плотность вещества $\rho \rightarrow \infty$. Напомним также, что в изотропных и однородных (фридмановских) моделях с $\Lambda = 0$, если средняя плотность вещества $\rho > \rho_c = 3H^2/8\pi G$, то модель является закрытой (расширяющаяся, а затем сжимающаяся трехмерная сфера); при $\rho < \rho_c$ модель уже открытая. Выше G — гравитационная постоянная и H — постоянная Хаббла, современное значение которой около $75 \text{ км/с} \cdot \text{Мпк} = 2,4 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$, это отвечает «возрасту» Вселенной $T \sim 1/H \sim 10^{10}$ лет. При таком значении H критическая плотность $\rho_c \sim 10^{-29} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, в прошлом значение ρ_c было выше, поскольку величина H падает со временем. Определение плотности ρ или более конкретно плотности $\rho = \rho_0$ в нашу эпоху оказалось очень трудной задачей. Средняя плотность, связанная с видимыми объектами (галактики, квазары), примерно на полтора порядка меньше, чем ρ_c . Но, быть может, значение ρ_0 определяется невидимыми «ингредиентами»: горячим межгалактическим газом (в основном это ионизированный водород, и поэтому его присутствие очень трудно детектировать), черными дырами, нейтрино или даже гравитационными волнами *). Так, если масса нейтрино $m_\nu \gtrsim 10 \text{ эВ}$, то межгалактические нейтрино, образовавшиеся в прошлом, когда Вселенная была достаточно горячей, могут в настоящее время обеспечить плотность, достигавшую и даже превосходящую ρ_c (для более

*) В связи с такой возможностью лучше говорить не о плотности вещества, а о плотности энергии, деленной на c^2 , ибо называть гравитационные волны веществом было бы натяжкой.

точного расчета нужно знать количество сортов стабильных нейтрино и их массу, а при наличии осцилляций нейтрино учитывать и этот фактор). В любом случае, однако, при $m_\nu < 1$ эВ (для всех квазистабильных нейтрино) вклад нейтрино в значение плотности достаточно мал. Представляется, разумеется, весьма интересным и многозначительным, как уже отмечалось в разделе 12, что вопрос о массе нейтрино приобрел, таким образом, важнейшее космологическое значение^{39, 54, 60, 80}.

Не побоимся и еще одного повторения (см. раздел 14), подчеркнув, что ранняя Вселенная превратилась в уникальную лабораторию физики высоких энергий^{39, 54, 67, 68, 81}.

Но все же главный вопрос самой космологии — проблема сингулярности. В рамках ОТО — классической эйнштейновской теории гравитации — появление какой-то сингулярности считается неизбежным. Нет сомнений (по крайней мере таково мнение большинства физиков, включая и автора), что появление сингулярности является указанием на ограниченность теории, необходимость ее обобщения как раз в условиях, в областях, близких к сингулярности. Здесь мыслимы, по крайней мере, три возможности. Первая — обобщение ОТО еще на классическом уровне, приводящее к устранению сингулярности (см., например,⁸² и литературу, указанную в⁷⁴). Вторая возможность — существование некоторой фундаментальной длины l_f , ограничивающей радиус кривизны пространства масштабами l_f и плотностями $\rho_f \sim \hbar/c l_f^4$ (см. раздел 13 и⁶³). Наконец, третья возможность связана с тем, что применимость ОТО ограничена квантовыми эффектами, причем эти ограничения характеризуются уже упоминавшимися величинами $l_g = \sqrt{G\hbar/c^3} = 1,6 \cdot 10^{-33}$ см, $t_g \sim l_g/c \sim 10^{-43}$ с, $\rho_g = c^3/\hbar G^2 = \hbar/c l_g^4 = 5 \cdot 10^{93}$ г·см⁻³. Таким образом, даже если область применимости ОТО как классической теории в другом отношении ничем не ограничена, все равно она неприменима при $l \lesssim l_g$, $t \lesssim t_g$ и $\rho \gtrsim \rho_g$ в силу необходимости учитывать квантовые эффекты. Такая возможность как-то наиболее проста в том смысле, что «работает» автоматически, с неизбежностью. Так или иначе, основные усилия сейчас направляются на квантование ОТО и создание квантовой космологии. Здесь уже имеются некоторые результаты⁸³, позволяющие надеяться на устранение сингулярности, создание разумной космологической модели без сингулярностей.

Космология и вопрос о «черных дырах», тесно связанные с проблемой сингулярности и границами ОТО, занимают в астрономии место, аналогичное положению микрофизики в физике в целом. При этом, правда, я исхожу из предположения, представляющегося наиболее вероятным и естественным, что во всех других случаях и для всех других объектов «новая физика» в астрономии не нужна (подробнее см.², § 20 и 24). Впрочем, даже если последнее предположение не отвечает действительности, проблема сингулярности, квантования ОТО и создания квантовой космологии заведомо существует и остается в центре внимания.

18. Нейтронные звезды и пульсары. Физика «черных дыр»

Напомним, что возможность существования и обнаружения нейтронных звезд начала обсуждаться в 1934 г., а открыты они были в 1967—1968 гг. Точнее, открыты были пульсары — намагниченные вращающиеся нейтронные звезды, дающие достаточно мощное радиоизлучение. Такие пульсары, за редкими исключениями⁷⁷, являются одиночными, т. е. не входят в состав сколько-нибудь тесной двойной системы. Вскоре, в начале 70-х годов, были открыты рентгеновские пульсары, находящиеся в тесных

двойных звездных системах (особенно известны обнаруженные раньше всего рентгеновские пульсары Центавр X-3 с периодом 4,8 с и Геркулес X-1 с периодом 1,2 с)⁸⁴. В тесной двойной системе, состоящей из нейтронной звезды и «обыкновенной» звезды с протяженной плазменной атмосферой, может происходить интенсивное перетекание плазмы на нейтронную звезду. При этом достигающая близкой окрестности нейтронной звезды плазма приобретает в результате притяжения большую скорость. Вынужденная остановиться, эта плазма сильно разогревается (ее температура $T \sim 10^7$ — 10^8 К и выше) и излучает в основном в рентгеновском диапазоне. Модуляция излучения — его периодический характер в виде всплесков, следующих в довольно строгой последовательности один за другим, — обеспечивается вращением нейтронной звезды (период всех пульсаров во всех диапазонах — это период их вращения; иногда, правда, речь может идти об излучении с периодом, равным половине периода вращения, что не меняет сути дела).

Пульсаров сейчас известно много сотен, число посвященных им статей еще больше⁸⁵⁻⁸⁷. Здесь придется ограничиться немногими замечаниями, в основном перечислить главные направления исследований (см. также², § 21).

Для физики важнее всего возможность изучать сами нейтронные звезды и вещество, из которого они состоят. Постановка вопроса довольно выпукло выступает уже из заглавия статьи²⁹, недавно опубликованной в УФН: «Пульсары и компактные рентгеновские источники — космические лаборатории для изучения нейтронных звезд и адронного вещества». Это очень большая и интересная тема, из которой можно выделить исследование внешней коры нейтронных звезд. Здесь главные особенности связаны не с высокой плотностью, сверхтекучестью и ядерными эффектами, а с действием сверхсильного магнитного поля (см. выше раздел 7).

Хотя в принципиальном отношении и проще, но на практике в известном отношении сложнее проблема магнитосферы пульсаров и механизма их излучения. Сверхсильное поле, наличие вращения в отсутствии аксиальной симметрии (у пульсаров ось вращения и магнитный момент находятся под углом друг к другу) и необходимость учитывать релятивистские плазменные эффекты — все это делает задачу очень сложной^{85, 87}. Во всяком случае, понимание в этой области отстает от изучения самих нейтронных звезд.

Я хорошо помню, как были открыты пульсары, и первый, «героический», период их исследования. Тогда казалось (мне во всяком случае), что разобраться в механизме излучения, которое мы как раз только и наблюдаем, будет гораздо легче, чем даже идентифицировать природу самих пульсаров — выбрать между моделями белого карлика и нейтронной звезды. Но все оказалось наоборот. Открытие быстропериодических пульсаров в Крабе и Веле (Парусах) сразу же отменило модели белых карликов. Наблюдение нерегулярностей периода пульсаций излучения (и, следовательно, периода вращения) пульсаров в сочетании с прогрессом в теории позволило «проникнуть» в недра нейтронных звезд^{29, 85, 86}. Что же касается моделей магнитосферы и механизмов излучения, особенно радиоизлучения, которое для подавляющего большинства пульсаров только и наблюдается (имеются в виду одиночные звезды; двойные системы, являющиеся рентгеновскими источниками, составляют особый класс), то здесь встретились трудности и неясности^{85, 87}. В последнее время, однако, заметен прогресс, и вскоре можно надеяться на создание довольно стройной картины.

Рентгеновские пульсары в двойных системах служат для анализа задач, более типичных для астрономии, чем физики. Именно, на примере

таких пульсаров удастся изучать перетекание вещества (аккрецию) и всю эволюцию звезд в двойных системах, включая вспышки сверхновых^{84, 86}.

Как ни важна и интересна проблема пульсаров разных типов и нейтронных звезд вообще (не каждая нейтронная звезда должна обязательно быть обнаружимым пульсаром), за десятилетие она превратилась в значительной мере в знакомую и даже рутинную для астрономии. Впрочем, быть может, здесь имеется преувеличение. Но, во всяком случае, на роль самых экзотических объектов в астрономии выдвинулись «черные дыры».

Как уже упоминалось, черные дыры на современном уровне (на основе ОТО) появились в 1939 г.⁷⁰. Но затем довольно долгое время и по не вполне ясным причинам (можно, конечно, считать, что «время не созрело» или «руки не дошли», но этого недостаточно) черные дыры не привлекали к себе особого внимания^{*}). Лишь в 60-е годы началось оживление, и с тех пор, и особенно в прошлом десятилетии, черные дыры вышли на авансцену как в физике, так и в астрономии. Поскольку о гравитационном коллапсе и черной дыре можно уже прочесть в курсе теоретической физики⁸⁸, будем считать, что предмет обсуждения известен (впрочем, так мы поступаем и почти во всех других случаях выше — иначе в статье типа настоящей действовать невозможно). Перечислим лишь те причины, в силу которых черные дыры привлекают к себе внимание и особенно интересны.

Во-первых, и об этом уже упоминалось в разделе 15, вблизи черных дыр гравитационное поле является сильным, а сама возможность их существования — следствие ОТО. В результате обнаружение и исследование черных дыр — важнейший элемент при проверке ОТО и опровержении некоторых альтернативных релятивистских теорий гравитации (подробнее см. ⁷⁴). Использование в предыдущей фразе слова «опровержение» свидетельствует, конечно, об известной тенденциозности — приверженности автора к ОТО и сомнениях в возможности ее замены для сильных полей какой-то другой теорией. Но все же такие теории существуют (литература указана в ⁷⁴; см. также ⁸²), хотя их непротиворечивость и внутренняя последовательность и не всегда доказаны. В такой ситуации было бы, как я убежден, неправильно без доказательств принимать, что ОТО справедлива, а черные дыры заведомо могут существовать. Тем не менее, повторим это еще раз, вполне естественно и закономерно, не ожидая окончательной проверки ОТО в сильном поле, свободно применить ее для анализа релятивистских эффектов в астрономии и космологии. Таков обычный путь в теоретической физике: проверять физические теории необходимо, но использовать их нужно смело, не ожидая доказательств. Если теория неверна или ограничена, то именно при таком подходе это выявится скорее всего.

Во-вторых, черные дыры оказались вовсе не абсолютно черными в житейском понимании этого слова. Именно, черным в обиходе называют тело несветящееся, не излучающее. Термин «черная дыра» возник, по-видимому, именно в таком смысле. Действительно, сколлапсировавшая масса, упавшая под ее гравитационный радиус (или, вообще, под горизонт событий), в рамках ОТО ничего не излучает — электромагнитные волны и любые частицы или тела, падающие на черную дыру «заглатываются» ею, из нее же не выходит ничего. Такие свойства напоминают свойства известной модели черного тела — небольшого отверстия в большой замкнутой полости. Если стенки полости поглощают излучение и (или) являются шероховатыми, то луч света, вошедший в отверстие, практиче-

^{*}) Одной из причин могло быть непонимание того, что при учете аккреции (падения) вещества черная дыра не только влияет на окружающую среду, но и может быть, в принципе, обнаружена по ее излучению.

ски не имеет шансов выйти наружу. Отверстие будет поэтому выглядеть как абсолютно черное тело в научном понимании этого термина (как тело, поглощающее все падающее на него излучение). Но, как хорошо известно, если температура абсолютно черного тела отлична от нуля, то само оно излучает тепловое излучение. Полная интенсивность (мощность) излучения, испускаемого единицей поверхности черного тела, равна

$$I = \sigma T^4, \quad \sigma = \frac{\pi^2 k^4}{60 \hbar^3 c^2} = 5,67 \cdot 10^{-5} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \cdot \text{град}^4}.$$

Квантовая постоянная $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-27}$ эрг·с и входит здесь в знаменателе. В «неквантовом» мире с $\hbar \rightarrow 0$ интенсивность $I \rightarrow \infty$, что отвечает ультрафиолетовой катастрофе. Как ясно из сказанного выше, в рамках ОТО (напомним еще раз, что ОТО мы называем классическую эйнштейновскую теорию гравитации) черная дыра не только все поглощает, но и ничего не излучает, т. е. является черным телом при температуре $T = 0$. Но оказалось (это открытие сделано в 1974 г.⁸⁹), что при учете квантовых эффектов черные дыры излучают как черное тело с температурой

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

где G — гравитационная постоянная, k — постоянная Больцмана, M — масса тела (в последнем выражении M измеряется в граммах), $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33}$ г — масса Солнца и $r_g = 2GM/c^2 \approx 3 \cdot 10^5 (M/M_{\odot})$ см — гравитационный радиус тела.

Квантовый характер излучения черных дыр ясен уже из того, что соответствующая температура пропорциональна \hbar . На механизме излучения, порождаемого сильным гравитационным полем на расстояниях r , близких к r_g , останавливаться здесь не будем⁸⁹⁻⁹¹, хотя этот вопрос и вполне интересен. Температура черных дыр со звездными массами ничтожна (так, для Солнца, как видно из приведенной формулы, $T \sim 10^{-7}$ К), и черная дыра может считаться классической, неизлучающей. В принципе, могут, однако, существовать и черные минидыры, для которых излучение велико или даже очень велико. Например, для черной дыры с массой $M \sim 2 \cdot 10^{15}$ г (не так-то это мало!) $T \sim 10^{11}$ К, $r_g \sim 3 \cdot 10^{-13}$ см, $\tau \sim 10^{10}$ лет, где τ — полное время испарения черной дыры (с выбранной массой $M \sim 2 \cdot 10^{15}$ г). Путей для образования минидыр в нашу эпоху не видно, но они могли бы, в принципе, возникать на ранних стадиях космологической эволюции (вблизи классической сингулярности для фридмановских моделей и т. д.). Из приведенного примера ясно, что минидыры реликтового происхождения с массой $M < 10^{15}$ г к нашей эпохе уже распались бы, но дыра с $M \sim 10^{15}$ г могла бы сейчас наблюдаться в стадии более или менее бурного «испарения». Такие поиски уже проводились и, вероятно, проводятся, но пока безуспешно. Отсутствие какого-либо явления иногда трудно однозначно интерпретировать. Конкретно, если «испарение» (излучение) минидыр не будет обнаружено, это можно объяснить не несправедливостью ОТО, а просто тем, что они в свое время не образовывались. Испарение минидыр существенно изменилось бы и в случае существования фундаментальной длины $l_f \gg l_g$ (см.⁶³ и ², § 21). Проблема черных минидыр имеет очевидный физический и астрономический (в частности, космологический) интерес, причем я не употребляю здесь перед словом «интерес» эпитетов «захватывающий» и ему подобных, только дабы не повторять их без конца в применении ко многим вопросам.

В-третьих, черные дыры звездных и еще ббльших масс могут иметь первостепенное астрономическое значение. Холодная звезда с массой больше 2—3 масс Солнца в случае справедливости ОТО не может находить-

ся в равновесии (в виде белого карлика или нейтронной звезды) и должна коллапсировать, превращаясь в черную дыру. В этой связи, казалось бы, звезды — черные дыры — должны встречаться довольно часто. Их можно заметить, в принципе, по двум эффектам. Черная дыра, входящая в состав двойной звездной системы, не имеет фотосферы, но ее гравитационное поле на больших расстояниях (при $r \gg r_g$) такое же, как и у обычных звезд, и, следовательно, влияет на движение второй звезды (разумеется, сказанное относится и к системам из трех и более звезд). Кроме того, газ, аккрецируемый черной дырой, до того как упасть и поглотиться ею, образует вращающийся около дыры диск или, во всяком случае, не сразу падает внутрь дыры. Такая нагретая и, вероятно, намагниченная плазма, окружающая черную дыру, может быть замечена по ее излучению.

Итак, заметить черные дыры можно, но до сих пор, несмотря на уже многолетние (точнее, примерно, десятилетние) усилия, этого надежно сделать не удалось. Имеется, правда, неплохой кандидат в черные дыры — рентгеновский источник Лебедь X-1. Наблюдения⁹², длящиеся уже почти десятилетие, не противоречат гипотезе о черной дыре, но доказательства все же нет, и имеются альтернативные объяснения наблюдаемой картины⁷⁴,⁹². Создается впечатление, что среди звезд черные дыры, во всяком случае, редкость. Если это так, а ОТО справедлива, то объяснение нужно искать в механизме образования черных дыр.

Звезда может окончить свой жизненный путь одним из четырех способов: взорваться без остатка, превратиться в белый карлик или в нейтронную звезду и, наконец, стать черной дырой. Возможно, и некоторые известные из литературы расчеты подкрепляют это предположение, что конечное состояние в форме черной дыры достигается лишь при редком стечении условий и параметров.

Помимо черных дыр со звездными массами ($M \lesssim 10^2 M_\odot$), неоднократно обсуждался вопрос о массивных и сверхмассивных черных дырах. Куда их только ни помещали: в шаровые скопления, ядра нормальных галактик и ядра активных галактик и квазаров. Появилось у нас даже прозвище «чернодырочник» для соответствующих энтузиастов. Сам не знаю почему, но я не являюсь «чернодырочником», быть может, в результате отрицательной реакции на увлечение других и участие в попытках обойтись без черных дыр, по крайней мере в некоторых случаях. Но такая позиция все же отнюдь не тождественна с встречающимся «непризнанием» черных дыр, тенденцией считать их нежелательным следствием ОТО и т. п. Напротив, гравитационный коллапс и черные дыры представляются одним из интереснейших и самых красивых (такая терминология, конечно, отнюдь не противопоказана физике) следствий ОТО. Я лишь являюсь сторонником известной осторожности в этом вопросе, и пока что такой подход оказался оправданным. Нет массивных черных дыр в центре шаровых скоплений и, вероятно, нет их и во многих галактиках. О квазарах же и активных галактических ядрах речь пойдет в следующем разделе.

Если считать, как поступили бы многие, астрономической проблемой № 1 космологическую проблему, то справедливо под № 2 поставить проблему черных дыр.

19. Квазары и ядра галактик.

Образование галактик

Квазары были открыты, если иметь в виду измерение кратного смещения в их спектре (и, конкретно, в спектре квазара 3C273), в 1963 г., т. е. на 4—5 лет раньше, чем были обнаружены пульсары. Но если природа пульсаров оказалась вскоре выясненной (см. выше раздел 18), то о квазарах

этого не скажешь. Правда, высказывавшиеся на первых порах (впрочем, это длилось немало лет) гипотезы о некосмологических расстояниях до квазаров *) и их какой-то совсем необычайной природе сейчас уже не встречаются (или почти не встречаются) на страницах научной литературы. Квазаров (квазизвездных радиоисточников — QSR) известно уже порядка 400, и они считаются подклассом значительно более многочисленного семейства квазизвездных объектов (QSO) и активных ядер, наблюдающихся в ряде галактик (сейфертовских галактиках и некоторых других). Складывается впечатление, что, при пренебрежении количественными различиями, мы имеем дело с одним явлением — образованием в центре галактики (т. е. в совокупности большого количества звезд и газа) сравнительно небольшого по размерам, но гигантского по массе ядра. Соответствующий размер ядра $R \lesssim 10^{16} - 10^{17}$ см (напомним, что расстояние от Солнца до центра Галактики составляет около $3 \cdot 10^{22}$ см). Его масса достигает $10^8 - 10^9 M_{\odot} \sim 10^{41} - 10^{42}$ г (масса Галактики $M \sim 10^{11} M_{\odot}$). Образование такого ядра в центре Галактики, если она достаточно медленно вращается, представляется естественным: газ и звезды «стекают» в глубокую потенциальную яму. Гравитационное сжатие большой массы сопровождается, естественно, выделением большого количества гравитационной энергии — энергии порядка GM^2/R . Так, при $R \sim 10^{16}$ см и $M \sim 10^9 M_{\odot} \sim 10^{42}$ г энергия $GM^2/R \sim 10^{61}$ эрг $\sim 10^{-2} Mc^2$. Светимость известных квазаров достигает 10^{48} эрг/с (это самая большая светимость, наблюдающаяся в природе; светимость всей нашей Галактики порядка 10^{44} эрг/с). Очевидно, энерговыделения $W \sim 10^{61}$ эрг хватит для поддержания даже столь гигантской светимости в течение $3 \cdot 10^5$ лет. Помимо радио- и в основном инфракрасного и видимого излучения, по крайней мере некоторые квазары являются источниками мощного рентгеновского излучения. Так, из 111 квазаров, обследованных космической рентгеновской обсерваторией «Эйнштейн» (спутник HEAO B \equiv HEAO 2, запущенный 13 ноября 1978 г.), 35 квазаров оказались также излучающими в рентгеновской области (энергия фотонов в интервале $0,5 < E_x < 4,5$ кэВ) со светимостью $L_x \sim 10^{43} - 10^{47}$ эрг/с⁹³. При этом у квазара ЗС 273 светимость $L_x \sim 10^{46}$ эрг/с. Для этого квазара (и пока только для него) известна и гамма-светимость L_{γ} ($50 < E_{\gamma} < 500$ МэВ) $\sim 2 \cdot 10^{46}$ эрг/с. Несомненно, такие огромные светимости в жесткой части спектра весьма многозначительны (см. ниже раздел 20).

Но что же представляет собой излучающее ядро с радиусом $R \sim 10^{16} - 10^{17}$ см? Сама излучающая область, по-видимому, не находится в каких-то экстраординарных условиях. Здесь много релятивистских частиц (в частности, электронов), высока плотность излучения, имеется значительное для разреженных областей в космосе магнитное поле $H \sim 1 - 10^2$ Э. Синхротронное излучение и обратное комптоновское рассеяние (рассеяние мягких фотонов на релятивистских электронах), а в какой-то мере и тепловое (т. е. тормозное) излучение горячей плазмы, могут объяснить наблюдаемую картину. Более того, эта картина мало зависит от того, что делается внутри излучающего ядра — в его центре («сердцевине»), где находится «машина», приводящая квазар или ядро в действие⁹⁴. Поэтому об излучающем ядре иногда говорят как о «черном ящике». Но что же находится в «черном ящике», какова природа кернов квазаров и активных галактических ядер?

*) Космологическим расстоянием до внегалактического объекта (галактики, квазара) называют расстояние, вычисляемое из данных о красном смещении спектральных линий в спектре этого объекта в предположении, что смещение обусловлено участием в расширении Метагалактики.

На этот вопрос еще нет ответа, и неизвестно, когда он будет получен. Наиболее вероятны две модели ядра: массивная черная дыра и магнитоид или спинар — магнитоплазменная, вращающаяся масса (сверхзвезда) без черной дыры в своем центре. Обсуждается также модель плотного скопления звезд, но по ряду причин она менее правдоподобна, чем две предыдущие⁹⁴.

Если считать, что черные дыры могут существовать, т. е. опираться на ОТО (а это действительно наиболее разумно, как мы уже не раз подчеркивали), то модель массивной черной дыры в качестве ядра квазаров и активных галактических ядер кажется естественной и привлекательной. Действительно, большие массы оставаться в равновесии не способны, а черная дыра — это то состояние, в которое они могут перейти^{71, 94}. Но, с другой стороны, если так рассуждать, то можно было бы ожидать присутствия массивных черных дыр в центре нашей Галактики и многих других галактик. Это, однако, противоречит ряду наблюдений и теоретических соображений⁹⁵. Коллапсу «до конца» — до образования массивной черной дыры — препятствует необходимость отдать во вне момент количества движения. Точнее, это обстоятельство замедляет коллапс. Затем в качестве противоборствующих факторов в строй могут вступить фрагментация большой массы на меньшие, образование тесных двойных звезд и ядерные процессы. В результате мыслима, по-видимому, ситуация, при которой плотная газовая масса или скопление разлетаются или, во всяком случае, очень долгое время не коллапсируют с образованием массивной черной дыры. Достаточно, чтобы подобная задержка в образовании массивных черных дыр составляла несколько миллиардов лет, чтобы их появление в галактиках и квазарах было редкостью или даже практически вообще не наблюдалось.

Сказанное отнюдь не является решительным возражением против возможности связать активность в квазарах и галактических ядрах с массивными черными дырами. Речь идет лишь о том, что нельзя без дальнейших доказательств принимать такую гипотезу как нечто почти обязательное или даже наиболее вероятное (именно такова тенденция, ясная из литературы). Проблема состоит в том, чтобы выяснить природу ядер квазаров и активных галактических ядер путем наблюдений. Определенные, хотя и неблестящие, возможности здесь имеются, в частности, на пути изучения вариаций интенсивности излучения. Нужно упомянуть и перспективы, открывающиеся для той же цели на пути развития астрономии нейтрино с высокими энергиями (см.⁹⁶ и ниже раздел 21).

При изучении галактик и квазаров имеется и еще одна (помимо рассмотренного выше вопроса) большая проблема: как образуются галактики (включая квазары) и скопления галактик? Сюда примыкают как некоторые космологические вопросы, так и проблема «недостающей массы» (missing mass). Ограничусь здесь ссылкой на труды посвященного этой тематике симпозиума⁹⁷ и упоминанием о работах^{60, 80}, в которых обсуждаются возможные изменения ситуации в случае неравенства нулю массы нейтрино.

20. Происхождение космических лучей и космического гамма- и рентгеновского излучения

Более точным и современным названием настоящего раздела является такое: астрофизика высоких энергий. Правда, к этой области относится также астрофизика нейтрино с высокими энергиями, о которой будет упомянуто в следующем разделе 21. Что же касается остальной (и основ-

ной) части астрофизики высоких энергий, то она может быть разделена на астрофизику космических лучей, рентгеновскую астрономию и гамма-астрономию. В силу исторической традиции и приверженности в английской литературе к термину *origin of cosmic rays*, астрофизику космических лучей часто называют проблемой происхождения космических лучей. Это и отражено в названии настоящего раздела.

Но хватит о терминологии. На каком бы из приведенных названий ни остановиться, о чем идет речь — достаточно ясно. Без астрофизики высоких энергий представить себе современную астрономию невозможно. Автор занимается этой областью ровно 30 лет и написал, особенно о происхождении космических лучей, так много (последние статьи в УФН ⁹⁸; см. также статьи в сборниках ⁹⁹), что не находит в себе сил еще раз подробно касаться этой темы. К счастью, это и не необходимо в настоящей статье, где можно ограничиться несколькими замечаниями.

Особенно впечатляющим за прошедшее десятилетие был прогресс рентгеновской астрономии. Первый галактический рентгеновский источник был открыт в 1962 г. с помощью аппаратуры, поднятой на ракете. Для того чтобы подготовить специальные рентгеновские спутники, понадобилось несколько лет — они полетели лишь в прошлом десятилетии. Известной кульминацией явился уже упоминавшийся в разделе 19 запуск в 1978 г. космической обсерватории «Эйнштейн». Угловое разрешение находящегося на ней рентгеновского телескопа составляет секунды дуги, т. е. приближается к лучшему угловому разрешению наземных оптических телескопов. На обсерватории «Эйнштейн», а частично и на других спутниках, уже получено так много результатов и такого качества ^{93,100}, что рентгеновскую астрономию можно считать возмужавшей, вышедшей в целом на уровень оптической и радиоастрономии.

Наблюдения в различных диапазонах отнюдь не дублируют друг друга. «Радионебо», небо в оптике и «рентгеновское небо» во многом совсем не похожи, разве что Солнце «видно» на всех этих волнах. В этой связи достижения рентгеновской астрономии нельзя свести к нескольким открытиям. Но все же выделим два из них. Первое — обнаружение мощных «рентгеновских звезд» — тесных двойных звезд, включая рентгеновские пульсары (см. раздел 18). Второе открытие было сделано в 1975 г. и позже. Оно состоит в обнаружении рентгеновских всплесков (*bursts*), их источники получили название «барстеры». По-видимому, мы имеем здесь дело в первую очередь с рентгеновским излучением, образующимся вблизи поверхности или на поверхности нейтронных звезд при нестационарной аккреции плазмы и в результате термоядерного «горения» аккрецированного вещества ¹⁰⁰.

Наблюдательная гамма-астрономия родилась, практически, в прошлом десятилетии. Ее успехи пока еще значительно скромнее, чем в случае рентгеновской астрономии. Имеются, однако, все основания полагать, что в текущем десятилетии гамма-астрономия по своему значению в основном догонит радио-, оптическую и рентгеновскую астрономию. В самом деле, ряд результатов уже получен, причем в разных частях огромного гамма-спектра от энергии фотонов, равной сотням кэВ, до энергий $E_\gamma \gtrsim 10^{11} - 10^{13}$ эВ. В последнем случае наблюдения ведутся с помощью наземных установок, фиксирующих вспышки черенковского свечения в атмосфере, вызванного гамма-фотонами и порожденным ими широким атмосферным ливнем. Изучается гамма-излучение как с непрерывным спектром ^{99,101}, так и в линиях ¹⁰².

Запущенный в 1975 г. европейский гамма-спутник COS-B, как и некоторые другие спутники, зафиксировал общее излучение, концентрирующееся к галактической плоскости и создаваемое космическими лучами

(электронная компонента космических лучей дает тормозное гамма-излучение, а протонно-ядерная компонента порождает при соударениях в межзвездном газе различные нестабильные частицы, в частности π^0 -мезоны; последние, а также некоторые другие частицы распадаются с испусканием гамма-лучей). По последним данным ¹⁰³, COS-B зарегистрировал также 25 дискретных гамма-источников (для энергии фотонов $E_\gamma > 100$ МэВ). Два из них идентифицированы с известными пульсарами PSR 0531 + 21 (Краб) и PSR 0833 — 45 (Паруса), один источник отождествлен с квазаром 3C273 (см. раздел 19) и один, по-видимому, с молекулярным облаком ρ -Orh. Из остальных 21 источников 20 лежат на низких галактических широтах и, следовательно, скорее всего являются галактическими. Их гамма-светимость L_γ ($E_\gamma > 100$ МэВ) $\sim (0,4-5) \cdot 10^{36}$ эрг/с. Таких источников в Галактике, как можно оценить по данным обзора части неба ¹⁰³, имеется несколько сотен. Что это за источники? Как мы видели, их гамма-светимость на два-три порядка превосходит полную светимость Солнца $L_\odot = 3,8 \cdot 10^{33}$ эрг/с. Скорее всего это какие-то нейтронные звезды, но в общем вопрос совершенно открыт. Огромные гамма-светимости уже обнаруженных источников гарантируют, что в гамма-астрономии изучению подлежат не какие-то «хвосты» излучения в более мягких диапазонах, а явления, в какой-то мере типичные именно для гамма-части спектра.

Мы уже упоминали о рентгеновских всплесках. Но еще раньше (первые публикации появились лет десять назад, см. ²) были обнаружены гамма-всплески. Их природа до последнего времени оставалась неизвестной, и лишь недавно стало, по-видимому, в достаточной степени ясно, что гамма-всплески образуются в Галактике и как-то связаны со звездами, в первую очередь или даже исключительно с нейтронными звездами ¹⁰⁴.

Особо следует упомянуть мощный и своеобразный гамма-всплеск, зарегистрированный 5 марта 1979 г. (см. ^{105,106} и указанную там литературу). Быть может, источником этого всплеска является остаток Сверхновой (видимо, нейтронная звезда), вспыхнувшей в Большом Магеллановом облаке. С таким предположением связаны энергетические трудности, но оно еще, видимо, допустимо ¹⁰⁶.

Проблема происхождения космических лучей возникла, собственно, одновременно с их открытием в 1912 г. Но по ряду причин ^{98,99} о рождении астрофизики космических лучей вряд ли уместно говорить до 1951—1953 гг. За 30 лет много сделано, но еще 10 лет назад в 1 приходилось подчеркивать неясность в главном вопросе о выборе модели происхождения основной части космических лучей, наблюдаемых у Земли. Так, не удавалось достаточно надежно доказать справедливость именно отстаиваемой автором галактической модели с гало (альтернативными оставались метagalактическая модель и дисковая галактическая модель). Сейчас, по моему убеждению, выбор в пользу галактической модели с гало уже можно сделать вполне надежно. Это произошло в результате обнаружения радиогало в наблюдаемых «с ребра» галактиках NGC 4631 и NGC 891, а также других данных, не оставляющих сомнений в существовании «гало космических лучей» вокруг нашей Галактики. Другое важное достижение — обнаружение (пусть и требующее еще уточнения) методом гамма-астрономии падения интенсивности космических лучей к периферии Галактики. Но, как было сказано, за подробностями мы здесь отсылаем к ^{98,99}.

Десять лет назад, в статье 1 проблемы, фигурирующие в заглавии настоящего раздела, были уже, локальнее, конкретнее. Сейчас же, упоминая об огромной области астрофизики — астрофизике высоких энергий, не приходится, конечно, говорить об одной или даже трех проблемах.

Но мы пишем о прогрессе за десятилетие, и поэтому сохранили настоящий раздел под старым названием. Дело, однако, не ограничивается преемственностью. Астрофизика высоких энергий в целом молода, находится в стадии становления (по крайней мере, это справедливо в отношении ряда направлений). Поэтому и в современном списке «особенно важных и интересных проблем» должна найти отражение проблематика, относящаяся к астрофизике высоких энергий. Что это за вопросы, частично видно из сказанного, ряд подробностей можно найти в ^{98,99}. Думаю, что этого здесь достаточно, поскольку настоящая статья не документ для начальства и вообще не документ, а лишь статья для раздела «Физика наших дней» УФН, отражающая к тому же лишь мнение ее автора.

24. Нейтринная астрономия

В области нейтринной астрономии за десять лет, если говорить об экспериментальных результатах, мало что произошло. Проводящиеся уже ряд лет попытки детектировать солнечные нейтрино путем использования ядерной реакции $^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$ долго не приводили к положительным результатам, но в последнее время для потока соответствующих нейтрино приводятся значения $(2,2 \pm 0,3) \text{ SNU}$ (см. ¹⁰⁷) или $(1,8 \pm \pm 0,4) \text{ SNU}$ (см. ¹⁰⁸). Используемая здесь солнечная нейтринная единица потока (SNU) такова, что при потоке 1 SNU 10^{36} ядер ^{37}Cl захватывают в среднем 1 нейтрино в секунду. Теоретические расчеты для так называемых стандартных моделей Солнца дают потоки, равные 4,7 SNU (несколько более старые данные) и $6 \pm 2 \text{ SNU}$ согласно ¹⁰⁷.

Должен признаться (или даже покаяться), что подобное расхождение на меня не производило и не производит впечатления, учитывая, сколь трудно точно рассчитать поток нейтрино от Солнца (здесь существенно, что упомянутая реакция с ^{37}Cl идет за счет нейтрино с довольно высокой энергией больше 0,81 МэВ, испускаемых в основном при распаде ядра ^8B ; поток таких нейтрино весьма чувствителен к температуре в центре Солнца и вообще к выбору солнечных моделей). Правда, осцилляции нейтрино ^{58,59,107}, столь много обсуждаемые в последнее время, могли бы в определенных условиях (важна, в первую очередь, разность масс нейтрино различных сортов, т. е. ν_e , ν_μ и ν_τ) объяснить наблюдаемое на опыте уменьшение потока нейтрино в три раза по сравнению с вычисленным без учета осцилляций ¹⁰⁷. Но делать отсюда вывод о том, что расхождение между теорией и опытом обусловлено именно осцилляциями нейтрино, было бы совершенно преждевременно.

Проблема солнечных нейтрино может быть, по-видимому, в значительной мере решена в результате дальнейших измерений с хлорным детектором, но необходимо провести измерения и с помощью других детекторов, в первую очередь из ^7Li и особенно из ^{71}Ga . Изотоп ^{71}Ga поглощает нейтрино с энергией, превышающей всего 0,23 МэВ, причем превращается в ^{71}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 тонн) очень перспективен ^{108,109}.

Зарождение нейтринной астрономии — большое событие, поскольку прием нейтрино — это единственный способ получения информации из

центральных областей звезд (оттуда, правда, вышли бы и гравитационные волны, но не говоря о трудности их детектирования, такие волны, вообще говоря, звездами не генерируются). Надеяться на прием нейтрино от обычных звезд в обозримое время не приходится. Но вспышки сверхновых звезд и образование нейтронных звезд (нет уверенности, что такое образование всегда сопровождается заметной вспышкой) могут порождать мощные потоки нейтрино^{108,109}. Соответствующие потоки доступны наблюдениям, и уже работает несколько пригодных для этой цели подземных нейтринных телескопов. Исключительно важно было бы зарегистрировать нейтрино космологического происхождения — образовавшиеся на ранней стадии эволюции Вселенной¹⁰⁹, но здесь пока не видно реальных путей для достижения цели.

Наконец, все большее внимание в последние годы привлекает к себе нейтринная астрономия высоких энергий (см. ^{96,109,110} и указанную там литературу). Нейтрино с высокой энергией, превосходящей сотню МэВ и, тем более, много ГэВ, создаются практически лишь протонно-ядерной компонентой космических лучей. В этом отношении они аналогичны гамма-лучам от распада π^0 -мезонов (см. раздел 21). Речь идет, однако, если говорить о регистрации, о космических лучах с гораздо большей энергией, генерирующих нейтрино с энергией $E_\nu \gtrsim 10^8$ ГэВ. Существуют проекты (в первую очередь проект DUMAND, в котором создаваемый нейтрино ливень должен регистрироваться глубоко под водой оптическим методом), осуществление которых позволит, вероятно, регистрировать нейтрино от квазаров и активных галактических ядер. Именно на таком пути, быть может, удастся выяснить, является сердцевина (кern) квазара массивной черной дырой или магнетодом⁹⁶.

Десятилетия оказалось недостаточно для становления нейтринной астрономии. Но стоящие задачи в экспериментальном отношении столь сложны, что этому вряд ли нужно удивляться. Еще через десять лет, вероятно, ситуация будет уже иной. Впрочем, как мне кажется, расцвета нейтринная астрономия достигнет не ранее конца столетия.

V. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Перед мысленным взором автора и, надеюсь, читателей прошло, промелькнуло десятилетие, наполненное напряженным трудом физиков и астрономов. Десять лет — это много для человека. Для молодого — потому, что десять лет назад он, быть может, еще не был взрослым. Для пожилого человека десятилетие в науке это тоже много, но по совсем другой причине — его шансы еще долго участвовать в развитии науки или хотя бы следить за таким развитием становятся все меньше и меньше. Если же отвлечься от субъективного восприятия времени и его течения, то десятилетие в науке — срок не столь уже большой. Вспомним, что частной теории относительности около 75 лет, общей теории относительности — 65 лет, квантовой механике — 55 лет. В то же время именно эти теории лежат в фундаменте современной физики. Сверхпроводимость была открыта в 1911 г., а космические лучи — в 1912 г. Но и сегодня обе проблемы — сверхпроводимость и космические лучи — находятся в центре внимания, ими занимаются гораздо больше людей, чем в первые два — три десятилетия после открытия. Таким образом, временной масштаб в современной физике больше длительности активной человеческой жизни, не говоря уже о десятилетии. Добавим, что сложность некоторых современных экспериментальных установок (ускорители, спутники-космические обсерватории, наземные оптические и радиотелескопы и др.) такова, что от начала их

проектирования до запуска тоже обычно проходит не меньше десяти-пятнадцати лет *).

В силу сказанного, представляется довольно естественным, что за десятилетие, отделяющее статью 1 от настоящей, хотя и выяснилось немало нового, но большинство проблем осталось в нашем списке. Правда, в микрофизике произошли значительные изменения, но это, по-видимому, делает минувшие годы исключительными (впрочем, многие новые идеи появились раньше, например кварковая гипотеза — в 1963—1964 гг.).

Итак, десятилетие в развитии физики и астрофизики — срок не чрезмерно большой, но и позволяющий засвидетельствовать немало нового.

Поэтому, как мне кажется, если вообще стоило писать настоящую статью в качестве известного продолжения статьи 1, то сделать это было уместно как раз сейчас — десять лет спустя. А вот следовало ли писать эти статьи? Пусть судят другие. Ограничусь замечанием, что писать обе статьи было трудно, но интересно самому автору. Физика и астрономия так разрослись, что следить даже за двумя десятками направлений и проблем, которые выделены здесь, весьма нелегко. С другой стороны, в каждый данный период можно, так сказать, профессионально, входя в детали, заниматься только одним-двумя вопросами. В этой связи работа над статьей типа настоящей дает повод ознакомиться, пусть и бегло, с большим и широким по спектру материалом. Узнаешь немало любопытного, дерева не заслоняют леса, видна перспектива на будущее, еще яснее становится широта и в то же время глубокое единство физики, богатство ее содержания. Если эти чувства в какой-то мере разделит часть читателей, то цель статьи уже будет достигнута. К тем же из коллег, кто прочтет статью, но останется ею в целом или частично неудовлетворен, или даже раздражен, позволю себе обратиться с призывом к конструктивной критике. Она должна, по моему мнению, свестись к тому, что будут написаны другие статьи, большие или небольшие, в которых те или иные проблемы и вопросы окажутся освещенными иначе, чем здесь, предстанут в ином свете. Думаю, что многие читатели УФН хотя бы именно этого.

В заключение пользуюсь возможностью поблагодарить за замечания всех, сделавших это при чтении статьи в рукописи. Как и в 1, их имена не названы, чтобы не возложить на других, хотя бы косвенно, ответственность за содержание и недостатки статьи.

Физический институт им. П. Н. Лебедева
АН СССР

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА **)

1. Гинзбург В. Л. — УФН, 1971, т. 103, с. 87.
2. Гинзбург В. Л. О физике и астрофизике (какие проблемы представляются сейчас особенно важными и интересными?). — М.: Наука, 1980.
3. а) Новости термоядерных исследований в СССР: Оперативная информация. — М.: ИАЭ, 1980, 1981.
Nuclear Fusion, 1980, v. 20, No. 9, p. 1063—1092.
- б) Ионасс Дж. — УФН, 1981, т. 133, с. 159.
4. Jerome D., Mazaud A., Ribault M., Bechgard K. — J. de Phys. (Paris), Lett., 1980, t. 41, p. 95.

*) Чтобы не перегружать статью, не будем здесь делать еще и другие замечания, касающиеся развития физики и астрофизики (мнение автора на этот счет ясно из ^{2,78} (замечу, что упомянутое в ², § 24, мнение о характере «второй астрономической революции» я изменил и придерживаюсь сейчас позиции, изложенной в ⁷⁸).

**) Довольно большое количество ссылок на литературу почти по всем затронутым в настоящей статье вопросам можно найти в ². Кроме того, во многих случаях дополнительные ссылки можно найти, просмотрев указатели статей, опубликованных в УФН (такие указатели публикуются ежегодно в декабрьском выпуске журнала).

- Andres K., Wudl F., McWhan D. B., Thomas G. A., Nalewajek D., Stevens A. L.—Phys. Rev. Letts, 1980, v. 45, p. 1449.
 Greene R. L., Engler E. M.—Ibid., p. 1587.
5. Проблема высокотемпературной сверхпроводимости / Под ред. В. Л. Гинзбурга, Д. А. Киржница.— М.: Наука, 1977; см. также: УФН, 1976, т. 118, с. 315.
 6. Степанов Г. Н., Яковлев Е. Н.—Письма ЖЭТФ, 1980, т. 32, с. 657.
 7. Брандт Н. Г. и др.—Ibid., 1978, т. 27, с. 37.
 Chu C. W. et al.—Phys. Rev. Ser. B, 1978, v. 18, p. 2116.
 8. Волков Б. А., Гинзбург В. Л., Копачев Ю. В.—Письма ЖЭТФ, 1978, т. 27, с. 221.
 Волков Б. А., Копачев Ю. В. и др.—Ibid., с. 615; 1979, т. 30, с. 317.
 Ginzburg V. L.—Sol. State Comm. 1981 (в печати).
 9. Lefkowitz I., Manning J. S., Bloomfield P. E.—Phys. Rev. Ser. B, 1979, v. 20, p. 4506; см. также: Phys. Rev. Ser. B, 1981, v. 23, p. 3022.
 10. Gebale T. E., Chu C. W.—Comm. Sol. State Phys., 1979, v. 9, p. 115.
 11. Brown E., Homan C. G., MacCrone R. K.—Phys. Rev. Lettes, 1980, v. 45, p. 478.
 12. Стишов С. М.—УФН, 1979, т. 127, с. 719; см. также: Письма ЖЭТФ, 1981, т. 33, с. 136.
 13. а) Райс Т., Хенсел Дж., Филлипс Т., Томас Г. Электронно-дырочная жидкость в полупроводниках.— М.: Мир, 1980.
 б) Садовский М. В.—УФН, 1981, т. 133, с. 223.
 14. а) Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. Ч. 1.— М.: Наука, 1976.
 б) Ма Ш. Современная теория критических явлений.— М.: Мир, 1980.
 15. а) Levelt Sengers J. M. H.—Physica Ser. A, 1976, v. 82, p. 319.
 б) Леванюк А. П., Санников Д. Г.—УФН, 1980, т. 132, с. 694.
 16. Гинзбург В. Л., Собянин А. А.—УФН, 1976, т. 120, с. 153, 733; Phys. Lett. Ser. A, 1979, v. 69, p. 417.
 17. Фабелинский И. Л. Молекулярное рассеяние света.— М.: Наука, 1965.
 Гинзбург В. Л., Леванюк А. П., Собянин А. А.—УФН, 1980, т. 130, с. 615; Phys. Rept., 1980, v. 57, p. 153.
 18. Сверхтекучесть гелия-3. Сб. статей.— М.: Мир, 1977.
 Квантовые жидкости и кристаллы: Сб. статей.— М.: Мир, 1979.
 19. Hardy W. N. et al.—Phys. Rev. Letts, 1980, v. 45, p. 453.
 Cline R. W. et al.—Ibid., p. 2117.
 20. Walraven J. T. M., Silvera I. F., Matthey A. P. M.—Phys. Rev. Lett., 1980, v. 45, p. 449, 915.
 21. Агранович В. М., Гинзбург В. Л. Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов.— М.: Наука, 1979.
 22. Proc. Intern. School on Condensed Matter Physics — Varna, Bulgaria, 1980.
 23. Tabor D.—Surface Sci., 1979 v. 89, p. 1.
 24. Pokrovsky V. L.—Adv. Phys., 1979, v. 28, p. 595.
 25. Nelson D. R.—In: Proc. Summer School in Statistical Mechanics.— Enschede, Netherlands, 1980.
 26. Brantman V. L., Ginzburg N. S., Petelin M. I.—Optics Commun., 1980, v. 30, p. 409.
 Nature, 1980, v. 285, p. 15; Science, 1979, v. 204, p. 394.
 27. Перелыгин В. П., Стеценко С. Г.—Письма ЖЭТФ, 1980, т. 32, с. 622.
 28. Blin-Stoyle R. J.—Contemp. Phys., 1979, v. 20, p. 377.
 Николаев Н. Н.—УФН, 1981, т. 134, вып. 3.
 29. Пайнс Д.—УФН, 1980, т. 131, с. 479.
 Pines D.—Science, 1980, v. 207, p. 597; J. de Phys., 1980, v. 41, p. C2-111.
 30. а) Alberico W. M. et al.—Phys. Lett. Ser. B, 1980 v. 92, p. 153.
 Vasak D. et al.—Ibid., 1980, v. 93, p. 243.
 Mohan L. R. R., Minich R. W.—ibid., p. 467.
 б) Слив Л. А.—УФН, 1981, т. 133, с. 337.
 31. Эйнштейн А. Собрание научных трудов Т. 2.— М.: Наука, 1966, с. 406.
 32. Салам А.—УФН, 1980, т. 132, с. 229.
 33. Вайнберг С.—Ibid., с. 201.
 Глэшоу Ш.—Ibid., с. 219.
 34. Cleine D., Rubbia C.—Phys. Today, 1980, v. 33, № 8, p. 44.
 35. Iliopoulos J.—Contemp. Phys., 1980, v. 21, p. 159.
 t' Hooft G.—Sci. American, 1980, v. 242, No. 6, p. 90.
 36. Berger Ch. et al.—Phys. Lett. Ser. B, 1979, v. 86, p. 418; Phys. Rev., Lett., 1979, v. 43, p. 830.

- Азимов Я. И., Докшицер Ю. Л., Хозе В. А.— УФН, 1980, т. 132, с. 443.
37. Вайнштейн А. И., Захаров В. И., Шифман М. А.— УФН, 1980, т. 131, с. 537.
 38. Georgiand H., Glashow S. L.— Phys. Today, 1980, v. 33, No. 9, p. 30.
 39. Окунь Л. Б.— УФН, 1981, т. 134, с. 3; см. также: Окунь Л. Б. Лептоны и кварки.— М.: Наука, 1981.
 40. Рихтер Б.— УФН, 1978, т. 125, с. 201.
Тинг С.— Ibid., с. 227.
 41. Ледерман Л.— УФН, 1979, т. 128, с. 693.
 42. Bartel W. et al.— Phys. Lett. Ser. B, 1979, v. 89, p. 136.
Barber D. P. et al.— Phys. Rev. Lett., 1980, v. 44, p. 1722.
 43. Chanowitz M. S.— Ibid., p. 59.
 44. Гейзенберг В.— УФН, 1977, т. 121, с. 657.
 45. Намбу И.— УФН, 1978, т. 124, с. 147.
Drell S. D.— Phys. Today, 1978, v. 31, No. 6, p. 23.
 46. Янг Ч.— УФН, 1980, т. 132, с. 169.
 47. Pais A.— Rev. Mod. Phys., 1979, v. 51, p. 861.
 48. Вайнберг С.— УФН, 1976, т. 118, с. 505; т. 120, с. 677.
Клейн Д., Манн А., Руббин К.— УФН, 1976, т. 120, с. 97.
Илиопулос Дж.— УФН, 1977, т. 123, с. 565.
Славнов А. А.— УФН, 1978, т. 124, с. 487.
 49. Киржниц Д. А.— УФН, 1978, т. 125, с. 169.
 50. Рихтер Б.— УФН, 1980, т. 130, с. 707, 717.
Wilson R. R.— Sci. American, 1980, v. 242, No. 1, p. 26.
 51. Барков Л. М., Золотарев М. С., Хриплович И. Б.— УФН, 1980, т. 132, с. 409.
 52. Богданов Ю. В., Собельман И. И., Сорокин Ю. Н., Струк И. И.— Письма ЖЭТФ, 1980, т. 31, с. 234, 556.
 53. Азимов Я. И., Хозе В. А.— УФН, 1980, т. 132, с. 379.
 54. Долгов А. Д., Зельдович Я. Б.— УФН, 1980, т. 130, с. 559.
 55. Марков М. А.— УФН, 1973, т. 111, с. 719.
 56. Фридман Д., ван Ньувенхейзен П.— УФН, 1979, т. 128, с. 135.
 57. Любимов В. А. и др. Препринт ИТЕР, Moscow, 1980; Phys. Letts. Ser. B, 1980, v. 94, p. 266.
Ковик В. С. и др.— ЯФ, 1980, т. 32, с. 301.
 58. Reines et al.— Phys. Rev. Lett., 1980, v. 45, p. 1307.
Barber V. et al.— Phys. Lett. Ser. B, 1980, v. 93, p. 194.
 59. Биленький С. М., Понтекорво Б. М.— УФН, 1977, т. 123, с. 181.
 60. Gunn J. E. et al.— Astrophys. J., 1978, v. 223, p. 1015.
Зельдович Я. Б. и др.— Письма Астрон. ж., 1980, т. 6, с. 451, 457.
Бисноватый-Коган Г. С., Новиков И. Д.— Астрон. ж., 1980, т. 57, с. 899.
Schram R., Steigman G.— Astrophys. J., 1981, v. 243, p. 1.
 61. Дрелл С.— УФН, 1980, т. 130, с. 507.
 62. Bartel W. et al.— Phys. Lett. Ser. B, 1980, v. 92, B, p. 206.
 63. Гинзбург В. Л.— Письма ЖЭТФ, 1975, т. 22, с. 514.
Гинзбург В. Л., Фролов В. П.— Письма Астрон. ж., 1976, т. 2, с. 474.
 64. Никольский С. И., Фейнберг Е. Л., Авакян В. В. и др.— УФН, 1980, т. 132, с. 392, 394, 395.
Фейнберг Е. Л.— Вестн. АН СССР, 1981, № 1, с. 25.
 65. Проблема нарушения CP -инвариантности.— УФН, 1968, т. 95, с. 401.
Nanopoulos D. V. et al.— Ann. Phys. (N. Y.), 1980, v. 127, p. 126.
 66. Никитов А. А., Ритус В. И. Квантовая электродинамика явлений в интенсивном поле.— Тр. ФИАН СССР, 1979, т. 111.
 67. Linde A. D.— Rept. Progr. Phys., 1979, v. 42, p. 389.
 68. Turner M. S., Schramm D. N.— Phys. Today, 1980, v. 32, No. 9, p. 42.
 69. Гинзбург В. Л., Манько В. И.— Физ. ЭЧАЯ, 1976, т. 7, с. 3.
 70. Oppenheimer J. R., Snyder H.— Phys. Rev., 1939, v. 56, p. 455; русский перевод этой статьи помещен в сборнике: Альберт Эйнштейн и теория гравитации.— М.: Мир, 1979,—С. 353.
 71. Rees M. J. Contemp. Phys., 1980, v. 21, p. 99.
 72. Vessot R. F. C., Levine M. W.— Gen. Relat. and Grav., 1979, v. 10, p. 181; см. также: Phys. Rev. Lett., 1980, v. 45, p. 2081.
 73. Reasenberg R. D. et al.— Astrophys. J., Lett., 1979, v. 234, p. L219.
Will C. M.— Proc. Roy. Soc. Ser. A, 1979, v. 268, p. 5.

74. Гинзбург В. Л.— УФН, 1979, т. 128, с. 435; эта статья опубликована также в сборнике: Гинзбург В. Л. О теории относительности.— М.: Наука, 1979.
75. Муханов В. Ф.— УФН, 1981, т. 133, с. 729.
Chaffee F. H.— Sci. American, 1980, v. 243, No. 5, p. 60.
76. Брагинский В. Б.— УФН, 1980, т. 132, с. 387; Земля и Вселенная, 1980, № 3, с. 28.
Руденко В. Н.— УФН, 1978, т. 126, с. 361.
77. Taylor J. H. et al.— Nature, 1979, v. 277, p. 437.
78. Гинзбург В. Л.— Вопросы философии, 1980, № 12, с. 24.
79. Бернштейн И. Н., Шварцман В. Ф.— ЖЭТФ, 1980, т. 79, с. 1617.
80. Bond J. R. et al.— Phys. Rev., 1980, v. 45, p. 1980.
81. Linde A. D.— Phys. Lett. Ser. B, 1980, v. 92, p. 119, 327, 394.
Киржниц Д. А., Линде А. Д.— Природа, 1979, № 11, с. 20.
Kishuchi M.— Progr. Theor. Phys., 1980, v. 63, p. 146.
Napoloulos D. V., Weinberg S.— Phys. Rev. Ser. D, 1979, v. 20, p. 2484.
82. Bekenstein J. D., Meisels A.— Astrophys. J., 1980, v. 237, p. 342.
83. Гурович В. Ц., Старобинский А. А.— ЖЭТФ, 1979, т. 77, с. 1683; см. также: Письма ЖЭТФ, 1979, т. 30, с. 719.
Frolov V. P., Vilkovisky G. A.— Intern. Center for Theoretical Physics Preprint IC/79/69.— Miramare, Trieste, 1979.
Зельдович Я. Б.— УФН, 1981, т. 133, с. 479.
Муханов В. Ф., Чибисов Г. В.— Письма ЖЭТФ, 1981, т. 33, с. 549.
84. Гурский Г., Ван ден Хевел Э.— УФН, 1976, т. 118, с. 673.
85. Манчестер Р., Тейлор Дж. Пульсары.— М.: Мир., 1980.
Смит Ф. Г. Пульсары.— М.: Мир, 1979.
Тер Хаар Д.— УФН, 1976, т. 119, с. 525.
86. Lamb V. K., Pulsars. IAU Symp. No. 95. Bonn., West Germany, August, 1980.— Материалы этого симпозиума представляют собой последнюю подробную сводку данных о пульсарах (обычно материалы симпозиумов МАС публикуются издательством D. Reidel в Голландии).
87. Ginzburg V. L., Zheleznyakov V. V.— Ann. Rev. Astron. and Astrophys., 1975, v. 13, p. 511.
Очелков Ю. П., Усов В. В.— Письма Астрон. ж., 1979, т. 5, с. 180.
Мачабели Г. З., Усов В. В.— Ibid., с. 445.
88. Ландау Л., Лифшиц Е. М., Теория поля.— М.: Наука, 1973.
89. Hawking S. W.— Nature, 1974, v. 248, p. 30; Phys. Rev. Ser. D, 1976, v. 13, p. 191.
90. Фролов В. П.— УФН, 1976, т. 118, с. 479; в кн. Эйнштейновский сборник. 1975—1976.— М.: Наука, 1978.— С. 82.
Черные дыры: Сб. статей.— М.: Мир, 1978.
91. Киржниц Д. А., Фролов В. П.— Природа, 1981.
92. Лайтман А. П., Сюняев Р. А. и др.— УФН, 1978, т. 126, с. 515.
93. Ku W. H. M., Helfand D. J., Lucy L. B.— Nature, 1980, v. 288, p. 323.
94. Гинзбург В. Л., Озерной Л. М.— Astrophys. and Space Sci., 1977, v. 48, p. 401.
95. Докучаев В. И., Озерной Л. М.— Письма Астрон. ж., 1977, т. 3, с. 391; Астрон. ж., 1977, т. 55, с. 27.
Гурзadyan В. Г., Озерной Л. М.— Письма Астрон. ж., 1979, т. 5, с. 630.
96. Duncan M. J., Wheeler J. C.— Astrophys. J. Lett., 1980, v. 237, p. L27.
97. Berezhinsky V. S., Ginzburg V. L.— Mon. Not. RAS, 1981, v. 194, p. 3.
98. The Large Scale Structure of the Universe./Ed. M. S. Longair, J. Einasto. IAU Symposium No. 79. (готовится русский перевод.)
99. Гинзбург В. Л., Птускин В. С.— УФН, 1975, т. 117, с. 585.
Гинзбург В. Л.— УФН, 1978, т. 125, с. 307.
100. Origin of Cosmic Rays. IUPAP/IAU Symposium No. 94. Bologna, Italy.— Amsterdam: D. Reidel, 1980.
VII Европейский симпозиум по космическим лучам. Ленинград, 1980.
101. Helfand D. J. et al.— Nature, 1980, v. 283, p. 337.
X-ray Astronomy (COSPAR)/Ed. W. A. Baity, L. E. Pterson.— Oxford: Pergamon Press, 1979.
102. Гальпер А. М., Лучков Б. И., Прилукский О. Ф.— УФН, 1979, т. 128, с. 313.
Pinkau K.— Nature, 1979, v. 277, p. 17.
УФН, 1980, т. 132, с. 700, 702, 704.

102. Розенталь И. Л., Усов В. В., Эстулин И. В.— УФН, 1979, т. 127, с. 135.
Levental M., MacCallum C. J.— Sci. American, 1980, v. 243, No. 1, p. 50.
103. Swanenburg B. N. et al. Second COS-B Catalog of High-Energy Gamma-Sources Preprint.— 1980.
104. Мазец Е. П. и др.— Письма Астрон. ж., 1980, т. 6, с. 609, 706.
105. Mazets E. P. et al.— Nature, 1979, v. 282, p. 587; 1981, v. 290, p. 378.
Terrell J. et al.— Nature, 1980, v. 285., p. 383.
106. Ramaty R. et al.— Nature, 1980, v. 287, p. 122.
107. Nature, 1980, v. 284, p. 507.
108. Bahcall J. M.— Space Sci. Rev., 1979, v. 24, p. 227.
109. Neutrino-77. Proc. of the Intern. Conference on Neutrino Physics and Neutrino Astrophysics.— М.: Nauka, 1978.— V. 1.
110. Березинский В. С.— Природа, 1981, № 3, с. 13; УФН, 1981, т. 133, с. 545.
111. La Rue G. S., Phillips J. D., Fairbank W. M.— Phys. Rev. Lett., 1981, v. 46, p. 967.
112. Georgi H.— Scientific American, 1981, v. 244, No. 4, p. 40.