

Приложение к журналу

КВАНТ

№2/96

СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА —
ИЗ ПЕРВЫХ РУК

Бюро



Квантум

П Р И Л О Ж Е Н И Е
к журналу **КВАНТ** №2/1996

СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА —
ИЗ ПЕРВЫХ РУК

Составитель А.И. Черноуцан



Москва 1996
Бюро «Квантум»

ББК 22.3
С568
УДК 53(02.062)

Приложение
к журналу «Квант»
№ 2/96

С568 Современная физика — из первых рук / Составитель А. И. Черноуцан. — М.: Бюро Квантум, 1996. — 128 с. (Прил. к журналу «Квант» №2/96)

ISBN 5-85843-018-X

Книга представляет собой сборник научно-популярных статей по физике, опубликованных на страницах журнала «Квант» в различные годы. Статьи написаны известными учеными-академиками и посвящены самым разным проблемам современной физики.

Для учащихся и преподавателей средних школ, лицеев и гимназий, а также для всех тех, кому просто интересна физика.

ББК 22.3

ISBN 5-85843-018-X

© Бюро Квантум
«Квант», 1996

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
О сверхтекучести жидкого гелия II. <i>П.Капица</i>	5
Сверхтекучесть жидкого гелия. <i>А.Андреев</i>	16
Сверхпроводимость. <i>А.Абрикосов</i>	27
Некоторые уроки научной сенсации. <i>Д.Киржниц</i>	40
Плазма — четвертое состояние вещества. <i>Л.Арцимович</i>	48
«Теплый» свет и тепловое излучение. <i>С.Вавилов</i>	57
Вселенная. <i>Я.Зельдович</i>	67
Броуновское молекулярное движение. <i>А.Иоффе</i>	77
Лазеры. <i>Н.Карлов, А.Прохоров</i>	84
Почему физика нужна инженеру? <i>Л.Мандельштам</i>	94
Как устроена пустота? <i>А.Мигдал</i>	102
Существует ли элементарная длина? <i>А.Сахаров</i>	111
Зачем мы зимой используем отопление? <i>В.Фабрикант</i>	124

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга является первым сборником научно-популярных статей по физике, опубликованных на страницах журнала «Квант» в различные годы. Здесь собраны статьи, написанные известными учеными-академиками и посвященные самым разным проблемам современной физики. Хочется напомнить, что идею создания нашего журнала первым высказал академик П.Л.Капица и журнал был организован под эгидой двух академий — Академии наук СССР и Академии педагогических наук СССР.

Некоторые статьи, вошедшие в книгу, были написаны достаточно давно и не содержат описания последних достижений и сложившегося к данному моменту понимания проблемы. Однако мы решили печатать тексты без изменений (иногда с некоторыми сокращениями), сохраняя дух и стиль времени, а ссылка на дату первой публикации позволит читателям понять, какой круг вопросов не мог быть охвачен автором. Отметим, что большая часть текста статьи обычно посвящена авторскому, часто очень яркому, изложению основных взглядов и положений соответствующей области науки, что ни в коем случае не устарело и сегодня. Надеемся, вы убедитесь в этом сами, прочитав предлагаемые вам статьи.

О СВЕРХТЕКУЧЕСТИ ЖИДКОГО ГЕЛИЯ II

П. Капица

Изучение жидкого гелия и его свойств относится к области физики наиболее низких температур. Открытия новых интересных явлений мы можем скорее всего ожидать тогда, когда изучаем природу в крайних допустимых для нее условиях, как например при исключительно сильных магнитных полях, высоких давлениях, высоких электрических напряжениях, а также в области глубокого холода, приближающегося к абсолютному нулю. Здесь мы тоже можем надеяться обнаружить новые явления, которые в обычных условиях либо ускользают от наблюдения, либо просто даже не происходят. В этом отношении область температур вблизи абсолютного нуля особенно интересна. Работы последнего десятилетия это подтвердили со всей очевидностью.

Что такое абсолютный нуль температурной шкалы? Последнее определение абсолютного нуля: $-273,13^{\circ}\text{C}$. Известно, что абсолютного нуля мы никогда не сможем достигнуть. Обычное, школьное, определение абсолютного нуля говорит, что это та температура, при которой прекращается тепловое движение материи. Но это определение неточно. С современной точки зрения, основывающейся на теории квантов, допускается существование движений при абсолютном нуле. Энергия этого движения ненулевая и определяется тем минимальным молекулярным движением, которое в данном веществе может существовать. Приведу простой пример. Если сильно нагревать вещество, то электроны атомов, которые движутся вокруг атомного ядра по определенным орбитам, будут под воздействием температурных движений отрываться, отлетать, наступит так называемая диссоциация. При охлаждении вещества движение атомов замедля-

Из доклада, прочитанного П.Л.Капицей на общем собрании Академии наук в 1943 году. Опубликовано в «Кванте» в 1970 году.

ются, электроны начинают опять обращаться по своим орбитам и до самого абсолютного нуля сохраняют свое движение. Но кроме движения электронов по орбитам каждого атома в отдельности, еще есть целый ряд комбинированных движений в твердом теле, которые с современной точки зрения должны сохраняться до самых низких температур. Благодаря этому так называемому вырождению движения в этой области температур и могут появиться совершенно новые явления, которые мы не можем наблюдать при обычных температурах.

Одно из таких интересных явлений, которое уже приобрело широкую известность, открыто Г.Камерлинг-Оннесом — это явление сверхпроводимости. Оно заключается в том, что при очень низких температурах электрический ток получает возможность течь по некоторым проводникам без сопротивления, без образования тепла. Опыт показывает, что, если в замкнутом сверхпроводнике индуктивным путем возбуждается ток, он течет, не выделяя тепла и не убывая, столько времени, сколько экспериментатору удавалось его наблюдать. Другим из таких явлений, которые можно обнаружить только при очень низких температурах, является найденная нами пять лет назад в жидком гелии сверхтекучесть.

Исследования этого и других явлений вблизи абсолютного нуля производятся посредством самого жидкого гелия как холодильного агента. Жидкий гелий — это единственное известное вещество, которое даже при самых низких температурах (вплоть до тысячных долей градуса от абсолютного нуля) при нормальном давлении остается жидким и не переходит в твердое состояние. Его можно превратить в твердое тело только при давлении начиная с 25 атм.

Сам по себе жидкий гелий представляет чрезвычайно интересный объект для изучения.

Гелий сжижается при температуре 4,8 К и образует легкую, раз в 7—8 легче воды, прозрачную жидкость. Из-за небольшой теплоемкости жидкий гелий во время опыта приходится держать за хорошей теплоизоляции в вакуумном дьюаровском сосуде, еще окруженном другим таким же сосудом с жидким воздухом. Экспериментирование с жидким гелием представляет значительные технические трудности. Это объясняет то, что до сих пор только в нескольких лабораториях холода во всех странах жидкий гелий получается в достаточных количествах.

Если понижать температуру жидкого гелия от точки его сжижения (4,8 К), то, когда мы достигнем температуры 2,19 К, он претерпевает изменения, и принято говорить, что гелий I

переходит в гелий II. Эту температуру называют λ -точкой. Находясь в своем первоначальном состоянии, жидкий гелий обычно непрерывно кипит благодаря малейшему доступу тепла, которого трудно избежать даже при наилучшей теплоизоляции. Ниже λ -точки гелий вдруг перестает кипеть, поверхность его становится гладкой; это связано с изменением ряда физических свойств жидкого гелия. Новое состояние жидкого гелия, впервые обнаруженное Камерлинг-Оннесом, начало изучаться В. Кеезом и оказалось чрезвычайно любопытным.

Кеезом нашел, что гелий II приобретает в этом состоянии большую теплопроводность. Теплопроводность его, изучаемая в капиллярах, оказалась во много раз больше, например, чем у меди или серебра — наиболее теплопроводных металлов. Поэтому Кеезом и назвал жидкий гелий II сверхтеплопроводным веществом. Я повторил опыт Кееза в несколько измененных условиях и в результате получил еще большую теплопроводность.

Попытка осветить экспериментальные данные на основании современных взглядов на теплопроводность вскрыла глубокое противоречие между теорией и опытом. Я не буду вдаваться в подробное описание довольно сложных теоретических воззрений на теплопроводность. Физическую картину теплопроводности мы можем представить себе так: повышение температуры какого-либо тела в какой-либо точке увеличивает среднюю скорость колебательного движения молекул вещества; при этом тотчас начинается процесс выравнивания — более «горячие», т.е. более возбужденные, молекулы воздействуют на соседние. Процесс последовательного выравнивания скоростей будет распространяться все дальше и дальше от нагреваемого места, т.е. будет иметь место процесс распространения тепла, который мы и называем теплопроводностью. Более подробный анализ, произведенный на основании этих воззрений на теплопроводность, показывает, что для каждого тела в природе есть предельное количество теплоты в единицу времени, которое можно через него провести. Оказалось, что такую большую теплопроводность, которая экспериментально была обнаружена в наших последних опытах в жидком гелии II, с помощью этих воззрений объяснить нельзя. Выход из этого противоречия мы можем искать, либо отказавшись от основных взглядов на механизм теплопроводности, которые прочно установились в науке, либо признав, что явление теплопроводности в гелии II обязано своим происхождением какому-либо иному механизму.

Как известно, тепло может передаваться не только посредством описанного механизма, как оно распространяется в твердых

телах и, как предполагалось, в жидком гелии в узких капиллярах. Тепло в жидких и газообразных телах может еще передаваться так называемыми конвекционными потоками. Например, конвекционные потоки в воздухе вы неоднократно ощущали, когда держали руку над теплым радиатором. Та же рука совсем не чувствует тепла, если ее держать на этом же расстоянии от радиатора, но внизу, так как здесь нет восходящих потоков нагретого воздуха, которые конвекционным путем уносят тепло вверх. Если интенсивную передачу тепла в жидком гелии нельзя объяснить с точки зрения обычного механизма теплопроводности, то мне думалось, что, может быть, здесь имеет место как раз именно конвекционная передача тепла. Для этого нужно предположить, что в жидком гелии II легко возникают потоки жидкости, которым и обязана чрезвычайно большая способность гелия II переносить тепло. Подсчеты показали, что высокая интенсивность, с которой в жидком гелии передавалось тепло, могла быть осуществлена только такими конвекционными потоками, которые должны течь в этой жидкости с необычайной легкостью. Поэтому по аналогии со сверхпроводимостью я предположил, что гелий II при сверхнизких температурах представляет собой жидкость чрезвычайно текучую, т.е. такую жидкость, которая не имеет вязкости. Оставалось проверить это опытом.

Наблюдать небольшую вязкость, да еще при низкой температуре, оказалось нелегкой экспериментальной задачей. Когда был найден и разработан необходимый метод, то само наблюдение не заняло много времени и показало, что вязкость жидкого гелия действительно исчезающе мала. Жидкий гелий оказался выше чем в миллиард раз более текучей жидкостью, чем вода. Такую текучую среду очень трудно себе представить, а между тем приведенное число означает предел не вязкости, а только чувствительности наших измерений. Более чувствительного метода мы пока не имеем. Поэтому я предположил, что есть все основания считать, что жидкий гелий не имеет вязкости; я назвал его *сверхтекучим*. Сначала это встретило большие возражения. Искали в моих опытах экспериментальные ошибки в методике, в измерениях и прочее. Открытие сверхтекучести в жидком гелии, таким образом, всесторонне обсуждалось, и теперь можно, я думаю, считать признанным существование сверхтекучего состояния в гелии II.

Когда это явление было впервые сформулировано, нам казалось, что сверхтекучесть гелия II вполне достаточна, чтобы объяснить большую теплопроводность, наблюдавшуюся в жид-

ком гелии, в соответствии с той картиной существования конвекционных потоков, которую я вам только что набросал. Но дело оказалось гораздо интереснее и сложнее, чем мы думали вначале.

Рассказ о том, как развивались наши взгляды на этот вопрос дальше, представляет некоторые трудности. Я попытаюсь рассказать, с какими противоречиями мы сталкивались, как менялись наши взгляды и как постепенно складывались у нас представления, которые выглядели бы ни с чем не сообразной фантастикой, если их изложить вне связи с реальными опытами.

Если стоять на точке зрения наших обычных механических представлений, вполне исчерпывающе описывающих поведение обычных веществ при обычных условиях, то оказывается, что сверхтекучий гелий не может переносить тепло столь интенсивно, как того требуют результаты измерения конвекционных потоков. Мы упираемся в трудность найти механизм, который мог бы вызвать необходимое быстрое течение гелия при конвекции. В обычном механизме переноса тепла конвекцией движение среды обязано тому, что более нагретая жидкость или газ становятся несколько менее плотными, почему стремятся вверх, как бы всплывая в более плотной среде, а более холодные, более плотные, стремятся вниз, «тонут». Происходит перемешивание, причем очевидно, что причина, вызывающая движение, это сила тяжести. Но подсчет показывает, что этой силы в гелии II недостаточно, чтобы вызвать такую большую теплопроводность, которая наблюдалась на опыте. Это делало явление опять непонятным. Надо было искать для его объяснения какие-то другие, новые механизмы. Рядом опытов, наконец, удалось натолкнуться на совсем новый механизм движения гелия II.

Оказалось, что под влиянием разности температур в жидком гелии II возникают очень сильные потоки, несколько напоминающие конвекционные. Под действием разности температур жидкость приходит в движение, но это движение совершенно особого рода, специфичное для жидкого гелия II, неизвестное ни в какой другой жидкости и ни в каких других условиях.

Прежде чем пытаться объяснить сущность этого движения, познакомимся с его особенностями. Посмотрим, как оно выглядит в эксперименте. Я не буду детально описывать технические подробности этого эксперимента. Основные его особенности вы можете себе представить из схемы, изображенной на рисунке 1. В сверхтекучий гелий II погружена колбочка 1. В широкой части этой колбочки помещена нагревательная спираль 2, а колбочка открыта с одной стороны. Когда к нагревателю подается ток, около горлышка колбочки обнаруживается непрерывный поток

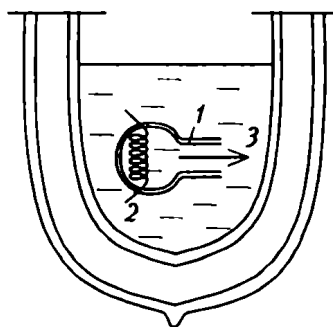


Рис. 1

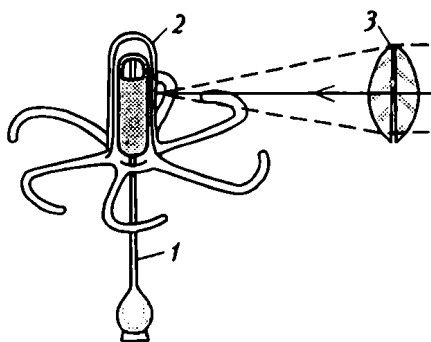


Рис. 2

3 вытекающего из нее гелия. Поток этот может быть обнаружен и даже измерен с помощью легкого крылышка, если его подвесить у горлышка. Поток на него давит и отклоняет его.

Некоторое более эффектное и поучительное видеоизменение этого опыта для целей демонстрации было снято на кинолентку. Схема заснятого в действии прибора изображена на рисунке 2. Стекланный «паучок» состоит из «бульбочки» 2, снабженной несколькими выводными трубочками, отогнутыми в одну сторону. Таким образом, вся эта конструкция повторяет известное «сегнерово колесо» (только по внешности, конечно; рассмотрев его, легко убедиться, что у «паучка» нет сквозного протока для жидкости). Бульбочка поставлена на ось из острия иголки 1. Весь «паучок» погружен в жидкий гелий. Гелий, находящийся в бульбочке, может быть нагрет с помощью пучка света через линзу 3. Этот пучок света, падающий на зачерненную часть внутри бульбочки, играет роль нагревателя, которым в предыдущем опыте была спираль. Из трубочек — «ножек паучка», — так же как из шейки колбочки в предшествующем опыте, при нагревании среднего сосуда происходит непрерывное вытекание струи. Под давлением вытекающих струй вращается весь «паучок».

Съемка этого опыта трудна. Жидкий гелий совершенно прозрачен, и коэффициент преломления в нем луча света таков, что его очень трудно рассмотреть через стекло. Нелегко также проводить эксперимент в условиях общей яркой освещенности, которая необходима для съемки. Поэтому понадобилось значительное искусство кинооператоров московской кинохроники, чтобы эту съемку произвести.

Взглянем снова на рисунок 1. Теперь я обращаю ваше внимание на самый большой парадокс этого опыта. Если мы обнаруживаем все время вытекающую из колбочки жидкость и при этом в колбочке не образуется пустоты, это значит, что жидкость

должна все время натекает внутрь колбочки. Как же жидкость попадает в колбочку? Не может же она вытекать, не попадая туда. Стенки у колбочки двойные, простенки между ними эвакуированы, и очевидно, что жидкость не может проходить через них. Посредством крылышка, располагавшегося в самых разнообразных положениях у горлышка, никак не удавалось обнаружить существования обратного потока. Поэтому первоначально мы решили, что должен существовать поток вдоль очень тонкого слоя у самых стенок (тогда он не мог бы быть обнаружен крылышком). Но при дальнейших опытах эта гипотеза оказалась недостаточной. Я стал менять условия опыта: вместо колбочки с широким горлом я применял очень узкие щели. Идея этих опытов состояла в том, чтобы по возможности занять все сечение щели обратным пристенным потоком и таким образом попытаться изменить характер наблюдаемых явлений. Щель в этих опытах изготовлялась очень точно из тщательно (оптически) отполированных поверхностей и имела ширину до 0,14 мкм, т.е. порядка десятитысячных миллиметра. Но изменений в характере явлений не было обнаружено.

Таким образом, явление становилось все загадочнее.

Перед тем как рассказать, как оно объясняется теперь, я хочу упомянуть еще о некоторых опытах.

Прежде всего позвольте остановиться на понятии обратимости тепловых явлений. Это понятие впервые установлено еще более ста лет назад С. Карно; оно дает чрезвычайно важную связь между возможностями перехода работы в тепло и обратно. Обратимыми явлениями в термодинамике считаются такие теоретические процессы, когда тепло превращается в работу и обратно — работа в тепло, причем при этом не происходит рассеяния тепла. Полностью обратимых процессов вообще в природе не существует, но к ним можно подходить очень близко. Переход тепла в движение гелия, которое мы наблюдаем, например, в нашем «паучке», надо было в первую очередь изучить и с этой точки зрения. Если разность температур между гелием в колбочке и наружным гелием вызывает движение гелия и если это явление обратимо, то теоретически должно существовать и обратное явление: при вынужденном движении гелия должна появиться и разность температур. Если эти явления обратимы, то они должны быть связаны между собой определенными количественными соотношениями.

В опыте со щелями удалось показать, что при передаче давления, заставляющего перетекать через щель жидкий гелий, действительно возникает разность температур. Удалось количес-

твенно измерить все необходимые величины и показать, что все эти явления в жидком гелии II действительно протекают термодинамически обратимо. Если при этом помнить, что гелий II сверхтекуч и что поэтому при его течении нет потерь на трение, то нетрудно видеть, что механизм температурного течения гелия работает с хорошим коэффициентом полезного действия. Таким образом, например, наш вертящийся «паучок» на рисунке 2 представляет собой машину с хорошим коэффициентом полезного действия. Конечно, никакого практического применения такой механизм иметь не может, и трудно ждать, чтобы когда-нибудь он его получил.

Но тут следует отметить, что это удивительное термодинамическое свойство гелия II, открывающее совсем новый путь к переводу тепла обратным путем непосредственно в механическую работу, не имеет ничего похожего в известных нам до сих пор явлениях природы.

Обратимость термомеханических, точнее термодинамических, явлений в жидком гелии представляется нам чрезвычайно

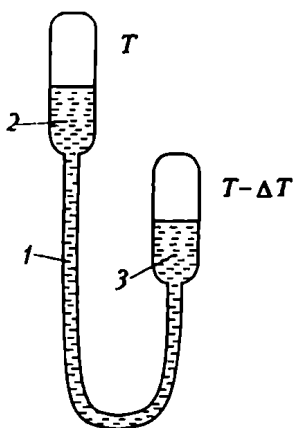


Рис.3

важным обстоятельством и для дальнейшего изучения явлений при низких температурах. Предположим, что у нас есть капилляр 1 (рис. 3) с двумя сосудами на разных уровнях. Между концами его мы создаем разность давлений. Это мы можем сделать, поместив сосудик 2 на конце капилляра выше сосудика 3 на другом его конце. Тогда в результате особых свойств гелия и обратимости процесса у нас на концах капилляра в сосудах 2 и 3 возникает разность температур ΔT . В низком резервуаре 3 гелий II станет более холодным. Таким образом, у нас есть метод понижения температуры, который состоит в том, чтобы заставить

гелий II течь под давлением. Конечно, рисунок 3 является только схематической иллюстрацией этого принципа, на самом деле опыт, разумеется, сложнее.

Но поскольку это явление остается обратимым до самых низких температур, возникает возможность сделать очень интересные практические выводы. Если проталкивать гелий насосом или каким-либо другим путем через тонкие капиллярные щели в некоторый объем, то температура в этом объеме ощутимо

понижится. Повторяя эту операцию несколько раз, мы получаем метод для понижения температуры сколь угодно низко, и, таким образом, для нас откроется путь приближения к абсолютному нулю сколь угодно близко. Это имеет важное значение для экспериментатора, поскольку до сих пор не существовало еще метода, даже теоретического, для приближения к абсолютному нулю сколь угодно близко.

Накануне войны мы начали в наших работах развивать этот метод и сделали несколько успешных опытов в этом направлении. Мне удалось получить понижение температуры на 0,4 градуса. Конечно, получение температур в непосредственной близости к абсолютному нулю новым методом является технически нелегкой задачей, и сразу на его удачу рассчитывать трудно. Тут много технических трудностей, и успех во многом зависит от искусства и изобретательности экспериментатора. Но все эти возможные затруднения не будут означать, что существуют какие-то принципиальные запреты для приближения к абсолютному нулю.

Но перейдем теперь к теоретическому объяснению механизма явления вытекания жидкого гелия из сосуда при его нагревании (см. рис. 1). Как я уже говорил, первоначально я объяснял явление заполнения сосуда гелием течением гелия в обратном направлении в тонком слое. Я предполагал также, что энергетическое состояние гелия II в этом тонком слое отличается от энергетического состояния свободного гелия II, и таким образом можно было объяснить кажущуюся большую теплопроводность гелия. Также можно было примерно подсчитать возможную толщину этого слоя так, чтобы скорость течения гелия в нем не принимала чрезмерно большого значения. Далее, как говорилось, я пытался в своих опытах обнаружить толщину этого слоя экспериментально. Для этого я заставлял течь гелий в очень тонком слое. Постепенно я дошел до толщины слоя гелия в 0,00014 мм, но опыт показал, что характер всех явлений при этом сохранился. Таким образом, объяснение пришлось пересмотреть, и это привело к совершенно новым воззрениям на природу гидродинамических явлений в гелии II.

Постараюсь дать самую общую картину этих взглядов. Согласно им, тот противоток, который я пытался объяснить течением гелия в одном энергетическом состоянии по стенке другого внутри бульбочки, заменяется противотоком гелия, происходящим в самом себе. Объяснение этого явления, данное Л.Ландау, заключается в следующем. Жидкий гелий представляет собой как бы смесь двух жидкостей. Эти две компоненты

жидкого гелия находятся в двух различных квантовых состояниях. Благодаря этому могут существовать одновременно встречные течения одной и той же жидкости, которые мы и наблюдаем в опыте.

Если бы это теоретическое положение не было так полно подкреплено экспериментальными доказательствами, оно звучало бы как идея, которую очень трудно признать разумной.

Теория Ландау хорошо описывает физическую сущность тех двух состояний, в которых гелий может одновременно существовать при температурах ниже λ -точки. Как я уже говорил, если гелий после сжижения продолжать охлаждать, то он будет находиться в состоянии обычной жидкости вплоть до 2,19 К, т.е. до λ -точки. Тогда, согласно теории Ландау, в этой жидкости появляется в качестве как бы примеси гелий в новом состоянии, которое характеризуется тем, что в нем отсутствует вязкость. Этот гелий представляет собой жидкий гелий II в том состоянии, в каком он был бы весь при абсолютном нуле. Но при всякой другой температуре одновременно с этим состоянием существует как бы смешанный с ним гелий и в нормальном состоянии. По мере понижения температуры концентрация гелия II начинает преобладать. Только при абсолютном нуле весь гелий, согласно теории, должен перейти в сверхтекучее состояние. Эта картина достаточна для описания наблюдавшихся нами явлений. Например, явление, наблюдаемое в опыте с перетеканием гелия из колбочки, объясняется следующим образом. Поскольку гелий в сверхтекучем состоянии не испытывает трения ни о стенки, ни о гелий, находящийся в нормальном состоянии, поток, текущий по капилляру, не создает реакции трения и может как бы незаметно наполнять сосудик. Наоборот, гелий в нормальном состоянии течет из сосудика с трением, и поток его является обычным потоком жидкости, давно изученным гидродинамикой. Этот нормальный поток и улавливается крылышком, поставленным перед горлышком колбочки, в то время как идущий ему навстречу поток гелия в сверхтекучем состоянии обычными методами не удается обнаружить.

Так же легко можно объяснить и большую теплопроводность гелия II. Как видно, в сосуд попадает гелий в сверхтекучем состоянии, а возвращается гелий в нормальном состоянии. Чтобы перевести гелий из одного состояния в другое, нужно затратить заметное количество теплоты. Такой процесс своеобразной конвекции и создает впечатление большой теплопроводности гелия II.

Все эти явления, для объяснения которых требуется представить себе сложные взаимодействия между двумя различными

состояниями одной и той же жидкости в одном и том же объеме, с трудом укладываются в наши привычные рамки даже физического мышления. Чтобы попытаться несколько облегчить хотя бы поверхностное восприятие этой сложной картины механизма теплопроводности гелия II, я позволю себе прибегнуть к аналогии с теми встречными потоками одетых и неодетых людей, которые циркулируют по проходу в раздевалке театра. Одетые будут представлять собой нормальные атомы гелия, получившие около нагревателя («в раздевалке») нужную им энергию, а неодетые — это сверхтекучие атомы гелия. К сожалению, аналогия более чем неполная, так как атомы гелия в сверхтекучем состоянии проходят мимо своих собратьев в нормальном состоянии без всякого взаимодействия, тогда как не получившие пальто никак не могут продвигаться через толпу без сильного трения.

На основании этой же картины можно объяснить, почему при протекании гелия II через узкое отверстие или щель появляется разность температур. Так как гелий в сверхтекучем состоянии протекает легче (без трения) через малое отверстие, чем гелий в состоянии нормальном, то получается как бы своеобразная фильтрация. После протекания увеличивается концентрация сверхтекучего гелия, а это соответствует такой концентрации его, которая предполагает более низкую температуру.

Между теорией, развитой Ландау, и экспериментом в основных вопросах существует не только качественное, но и количественное совпадение. Но есть еще и явления, которые не охватываются теорией. Выяснение их — дело будущего. Теория указывает на некоторые явления, такие как наличие сосуществования двух скоростей звука, которые еще не удалось наблюдать в жидком гелии. Теория не учитывает еще критических скоростей, которые в действительности наблюдаются. Но мне кажется, в основных своих пунктах теория очень близко подошла к существу объяснения этого изумительного явления и представляет исключительно ценный вклад в его изучение. Работа над дальнейшим разъяснением этих явлений представляет большой интерес.

СВЕРХТЕКУЧЕСТЬ ЖИДКОГО ГЕЛИЯ

А. Андреев

Одним из важнейших достижений современной физики явилось открытие особых свойств жидкого гелия. Эти свойства неожиданны и парадоксальны. В настоящее время все они объединяются понятием сверхтекучести — явлением, открытым советским физиком П. Л. Капицей в 1938 году. Явление сверхтекучести, разумеется, не сводится к чисто количественной оценке, т.е. к тому, что жидкий гелий течет значительно лучше других жидкостей. Свойства сверхтекучего гелия (имеется в виду наиболее распространенный изотоп гелия ^4He), как показал в 1941 году советский физик-теоретик Л. Д. Ландау в своей теории сверхтекучести, — наиболее яркое проявление общих закономерностей в поведении любого вещества при достаточно низких температурах. Именно поэтому так велико то влияние, которое оказали исследования жидкого гелия и на другие, казалось бы, далекие области физики.

СВОЙСТВА СВЕРХТЕКУЩЕГО ГЕЛИЯ

Гелий не случайно называют инертным газом. Его атомы чрезвычайно слабо взаимодействуют с другими атомами и особенно между собой. Вот почему гелий переходит из газообразного состояния в жидкое при рекордно низкой температуре (4,2 К при нормальном атмосферном давлении) и при дальнейшем понижении температуры не затвердевает вплоть до абсолютного нуля. Твердый гелий существует лишь при повышенном давлении (около 25 атмосфер при температурах, близких к абсолютному нулю), когда из-за уменьшения расстояния между атомами силы сцепления возрастают, что способствует затвердеванию тела.

Опубликовано в «Кванте» в 1973 году.

В интервале температур от 4,2 К до 2,2 К жидкий гелий ведет себя во всех отношениях как обычные жидкости. При температуре 2,2 К гелий переходит из обычного состояния, так называемого гелия I, в особое состояние — гелий II, обладающее свойством сверхтекучести. Ниже мы рассмотрим несколько наиболее важных экспериментов, проведенных с гелием II, и покажем, что результаты этих экспериментов в корне противоречат обычным представлениям о жидкости и что для их объяснения необходимо привлечение каких-то новых представлений.

Вязкость и сверхтекучесть. Первая загадка возникает при измерениях вязкости (или, другими словами, внутреннего трения) гелия II. В обычных жидкостях вязкость (точнее, коэффициент вязкости) может быть измерена двумя простейшими способами, дающими, конечно, один и тот же результат. Первый способ заключается в измерении скорости вытекания жидкости из сосуда через узкую щель под действием силы тяжести (рис. 1). Скорость жидкости, изображенная на рисунке стрелками, максимальна в средней части щели и убывает при приближении к стенкам. Различные слои движутся, таким образом, с разными скоростями, и поэтому между ними возникает сила внутреннего трения, от величины которой зависит скорость вытекания. По величине этой скорости можно судить о вязкости жидкости. Второй способ (рис. 2) заключается в измерении времени затухания крутильных колебаний погруженного в жидкость диска. Здесь все аналогично первому случаю. Жидкость вблизи диска увлекается его движением, а вдали она практически покоится. Различные слои жидкости вновь движутся с разными скоростями, и возникающая сила вязкости приводит в конце концов к тому, что энергия колебаний превращается в тепло. Измерив время затухания, можно определить вязкость.

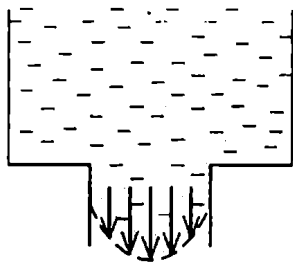


Рис. 1

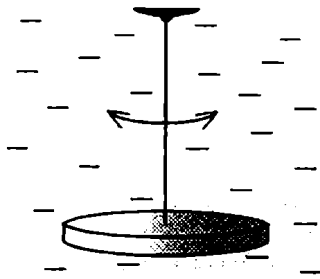


Рис. 2

Эксперименты с жидким гелием, проведенные первым способом, показали, что вязкость гелия I вполне заметна и измерима, но при переходе в область гелия II она скачком падает до неизмеримо малой величины, которая, скорее всего, равна нулю. Казалось бы, еще имеется возможность считать гелий II жидкостью, подчиняющейся обычным законам, но обладающей чрезвычайно малой вязкостью. Однако результаты измерений вторым способом дают для вязкости гелия II величину того же порядка, что и для гелия I. Таким образом, оказывается, что гелий II, в отличие от обычных жидкостей, в одних условиях совсем не обнаруживает вязкости, а в других его вязкость вполне заметна.

Фундаментальное свойство гелия II протекать через узкие щели, не обнаруживая вязкости, и было названо сверхтекучестью.

Перенос тепла и движение. В обычных жидкостях существует два механизма переноса тепла — теплопроводность и конвекция.

Теплопроводность — это передача тепла от более нагретых мест к менее нагретым в неподвижной жидкости. Рассмотрим следующий опыт (рис.3). Нагреватель H излучает тепло в направлении, указанном на рисунке стрелкой; температура

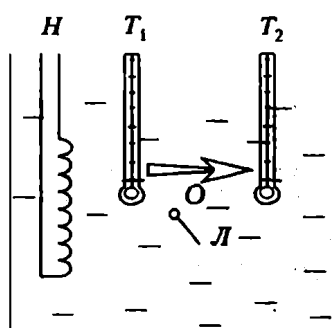


Рис.3

жидкости убывает слева направо. Если перенос тепла осуществляется теплопроводностью, то жидкость неподвижна, а от более нагретых мест к менее нагретым возникает поток тепла. (Поток тепла — это энергия, проходящая в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения энергии.) Для того чтобы теплопроводный поток тепла был отличен от нуля, необходимо, таким образом, чтобы

термометр T_1 показывал более высокую температуру, чем термометр T_2 . Количественной характеристикой теплопроводности является коэффициент теплопроводности, связанный с отношением потока тепла к разности температур. Чем больше коэффициент теплопроводности, тем больший поток тепла переносится в жидкости от одного участка к другому при одной и той же разности температур, или, другими словами, тем меньшая разность температур необходима, чтобы обеспечить один и тот же поток тепла.

Конвекционный перенос тепла связан с движением самой жидкости. Если в рассматриваемом опыте жидкость в силу каких-то причин приходит в движение в направлении слева направо, то в этом направлении происходит перенос тепла, поскольку движущаяся жидкость обладает тепловой энергией. Причиной возникновения потока тепла в данном случае является движение жидкости, а не разность температур. Конвекционный перенос тепла может, таким образом, происходить и при одинаковых показаниях термометров T_1 и T_2 .

В обычных жидкостях конвекция связана с достаточно большими значениями потока тепла. Если поток тепла мал, то механизм переноса тепла является чисто теплопроводным, и мы можем определить коэффициент теплопроводности жидкости, измерив на опыте поток тепла и разность температур. Если мы проведем этот опыт с гелием II, то обнаружим, что как угодно малые количества тепла переносятся через жидкость при абсолютно равных показаниях термометров T_1 и T_2 . Можно сделать два вывода из этого результата. Предположим сначала, что в гелии II, как и в обычных жидкостях, при малых потоках тепла конвекция несущественна и основную роль играет теплопроводность. Тогда мы должны приписать гелию II бесконечно большую теплопроводность. Однако можно предположить, что в гелии II перенос тепла осуществляется всегда только посредством конвекции, а тогда разности температур может и не быть.

Для того чтобы выяснить, какое предположение соответствует действительности, поступим следующим образом. Установим в гелии лепесток L , который может свободно вращаться вокруг неподвижной оси O (см. рис.3). Мы обнаружим, что всегда, когда через гелий II протекает поток тепла, лепесток отклоняется в направлении потока, что явно указывает на движение жидкости. Таким образом, подтвердилась вторая гипотеза.

Ситуация, однако, значительно сложнее, чем нам сейчас может показаться. Рассмотрим следующий весьма наглядный опыт (рис.4), проведенный П.Л.Капицей в 1941 году. Нагреватель установлен в гелии II, частично заполняющем замкнутый сосуд с единственным выходом в окружающий гелий II. Вблизи выхода находится тот же лепесток L на оси O . Если включить нагреватель H , то поток тепла будет вытекать из внут-

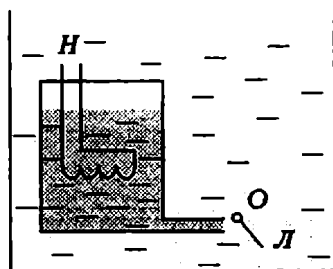


Рис.4

ренной области наружу, что, как мы уже знаем, связано с движением жидкости. Действительно, лепесток L отклоняется вправо, показывая, что гелий вытекает из сосуда. Но самое удивительное в этом опыте то, что уровень жидкости в сосуде не понижается. Можно проводить опыт как угодно долго, лепесток все время будет отклонен. Жидкость, казалось бы, непрерывно вытекает, однако уровень остается прежним. Последний результат убедительно показывает, что законы движения гелия II должны принципиально отличаться от законов движения обычных жидкостей. В частности, и механизм конвекции в гелии II совершенно особый.

ТЕОРИЯ СВЕРХТЕКУЧЕСТИ

При комнатных температурах существуют твердые тела, жидкости и газы. Если повышать температуру, то все твердые тела и жидкости превращаются в газ, т.е. в систему, состоящую из отдельных свободно движущихся молекул. При дальнейшем повышении температуры тепловое движение атомов, входящих в состав молекул, становится столь интенсивным, что молекулы начинают распадаться на отдельные атомы. При еще более высоких температурах (порядка десятков тысяч градусов) атомы распадаются на электроны и атомные ядра. При столь высоких температурах любое вещество, таким образом, представляет собой газ, состоящий из свободных электронов и ядер (такое состояние вещества называется плазмой).

Сверхтекучий гелий II — это жидкость, существующая лишь при достаточно низких температурах (от 2,2 К и ниже). Поэтому, для того чтобы объяснить его свойства, нам необходимо выяснить сначала общие закономерности, связанные с изменением характера теплового движения в любом веществе при понижении температуры.

Элементарное возбуждение. Рассмотрим процесс понижения температуры, начав с температур порядка десяти тысяч градусов. Что произошло, когда электроны и ядро объединились в атом? Для нас существенно следующее. До объединения каждый электрон и ядро имели по три степени свободы, соответствующие их независимому движению в пространстве. После объединения возможно свободное движение лишь атома в целом. Число степеней свободы системы уменьшилось. Можно сказать, что с понижением температуры уменьшилось число возможных видов теплового движения.

При дальнейшем понижении температуры все новые и новые виды теплового движения исчезают, или, как говорят, вымерза-

ют. Вслед за движением электронов относительно ядра вымерзает движение атомов относительно центра тяжести молекулы. При комнатных и более низких температурах мы можем вообще забыть о том, что молекулы состоят из атомов, которые в свою очередь состоят из электронов и ядер, и считать, что тепловое движение есть движение молекул как неделимых частиц. Когда газ или жидкость затвердевают, молекулы уже не имеют возможности свободно перемещаться в пространстве на заметные расстояния, а совершают лишь малые колебания вблизи определенных положений равновесия.

Процесс вымерзания видов теплового движения происходит, конечно, и при температурах ниже комнатных. Так как при абсолютном нуле температуры вообще все виды теплового движения должны исчезнуть, то можно предположить, что при достаточно низких температурах во всяком веществе эффективен лишь какой-то один наиболее устойчивый к вымерзанию вид теплового движения. Этот вид движения называют элементарным возбуждением. Элементарные возбуждения в разных веществах различны. Поэтому основная задача, возникающая при исследовании свойств какого-либо вещества при очень низких температурах, заключается в выяснении природы его элементарных возбуждений.

Для жидкого гелия II это не может быть, конечно, движение отдельных атомов гелия (молекула гелия состоит из одного атома), хотя бы потому, что именно на таком представлении о тепловом движении основана физика обычных жидкостей, законам которой, как мы видели, свойства гелия II явно противоречат. Нужные нам элементарные возбуждения следует искать среди каких-то других видов теплового движения. Л. Д. Ландау предположил, что элементарными возбуждениями гелия II являются не движения отдельных атомов, а коллективные движения атомов жидкости, т.е. звуковые колебания, и показал, что на основе этого предположения можно построить последовательную теорию сверхтекучести. Сейчас предположение о звуковой природе элементарных возбуждений полностью подтверждено многочисленными экспериментальными исследованиями.

Существуют и простые соображения, показывающие естественность такого предположения. Действительно, в обычных веществах процесс вымерзания движения отдельных молекул связан с затвердеванием жидкости. В твердом теле молекулы могут совершать, как уже отмечалось выше, лишь малые колебания вблизи определенных положений равновесия. Но это не есть независимые колебания отдельных частиц. Колебание ка-

кой-либо молекулы сразу передается соседям, и в результате возникает колебание всего коллектива молекул, т.е. всего твердого тела. А это и есть звуковые волны. В обычных веществах, таким образом, процесс вымерзания движения отдельных молекул означает переход к звуковому типу движения. Звук может распространяться и в жидкостях, однако в обычных жидкостях он в конце концов всегда затухает просто потому, что его энергия превращается в энергию теплового движения отдельных частиц, которое играет там решающую роль. Но если мы имеем жидкость, о которой известно, как в случае с гелием II, что движение отдельных частиц в ней должно уже вымерзнуть, то звук неизбежно становится единственным видом теплового движения. Можно сказать так: процесс вымерзания индивидуального движения частиц рано или поздно обязательно должен произойти, и после этого может остаться только коллективный, т.е. звуковой, вид движения. Во всех веществах этот процесс сопровождается затвердеванием. В гелии же из-за весьма слабого взаимодействия между атомами затвердевания не происходит, и поэтому переход от индивидуального движения к коллективному осуществляется в жидком состоянии.

Это свойство жидкого гелия отличает его от всех других жидкостей, и именно оно, как мы увидим, лежит в основе всех обсуждавшихся выше необычных явлений, наблюдавшихся в гелии II. Утверждение о том, что элементарными возбуждениями в гелии II являются звуковые волны, означает, что при низких температурах тепловое движение в жидком гелии целиком обусловлено наличием звуковых волн, которые распространяются по всем возможным направлениям. Внутренняя энергия теплового движения (или просто тепло) при этом есть не что иное, как энергия звуковых волн. При повышении температуры внутренняя энергия должна возрастать, а это значит, что должна увеличиться энергия звуковых волн.

Некоторые свойства звуковых волн в жидкости. Первое важное для нас свойство заключается в том, что распространение звука сопровождается переносом массы жидкости в направлении распространения. Если проследить за движением какой-либо частицы жидкости при распространении в жидкости звуковой волны, то оказывается, что на ее колебательное движение накладывается медленное поступательное движение в направлении распространения волны. (Обычно этим поступательным движением пренебрегается, так как его скорость, пропорциональная амплитуде колебаний, мала по сравнению со скоростью распространения волны.)

Наличие переноса массы в любой системе частиц означает, что система обладает отличным от нуля импульсом. Следовательно, и звуковая волна несет импульс в направлении распространения волны. Это подтверждается целым рядом опытных фактов. Например, если звук падает на стенку и поглощается ею или отражается, то изменение импульса передается стенке, и возникает так называемое звуковое давление.

В жидком гелии II тепловое движение обусловлено наличием звуковых волн. Обычно энергия волн, распространяющихся по различным направлениям, одинакова, и потому переноса массы нет. Если же по какой-либо причине звуковые волны приобретают преимущественное направление распространения, то в этом направлении возникнет перенос массы жидкости.

Рассмотрим еще вопрос об излучении звука в жидкости. Для того чтобы погруженное в жидкость тело излучало звук, необходимо, чтобы оно совершало колебательное движение. Тело, движущееся в жидкости с постоянной скоростью и не совершающее при этом никаких пульсирующих движений (изменений формы, размеров и т.п.), звук излучать не может.

Здесь следует сделать одну оговорку. Последнее утверждение справедливо, если скорость тела не слишком велика, во всяком случае меньше скорости звука. При сверхзвуковой скорости даже равномерно движущееся тело может излучать звук. (Наглядным проявлением этого эффекта является изменение характера излучения звука самолетом, преодолевающим звуковой барьер. Самолет, летящий с дозвуковой скоростью, излучает звук лишь благодаря вибрациям, связанным в основном с работой двигателей. При скорости, большей звуковой, интенсивность излучения резко возрастает, поскольку включается механизм непосредственного излучения звука самим самолетом.)

Те же самые утверждения справедливы, очевидно, и в случае, когда тело неподвижно, а жидкость движется. В частности, если жидкость обтекает тело со скоростью, меньшей звуковой, то излучение звука невозможно.

Объяснение свойств гелия II. Свойство сверхтекучести жидкого гелия II непосредственно вытекает из свойств звуковых волн в жидкости. В самом деле, трение, возникающее при течении через щель обычных жидкостей, приводит к тому, что в результате взаимодействия частиц жидкости с неровностями стенок кинетическая энергия движения жидкости превращается в тепло. В случае гелия II, в котором внутренняя энергия представляет собой энергию звуковых волн, наличие трения означало бы, что энергия звуковых волн увеличивается, т.е. что

при обтекании неровностей стенок жидкость излучает звук. Но это, как мы видели, невозможно при малых скоростях течения.

Рассмотрим, однако, процесс течения гелия II через щель более подробно. Невозможность излучения звука означает, что в жидкости не могут появиться новые звуковые волны. Но при любой отличной от нуля температуре в ней уже имеются звуковые волны, связанные с наличием теплового движения. Чтобы рассмотреть их взаимодействие со стенками, выберем в качестве системы отсчета саму движущуюся жидкость, т.е. будем считать, что жидкость покоится, а стенки щели движутся в противоположном направлении. Свойство сверхтекучести состоит в том, что движущиеся стенки не увлекают жидкость, но «увлекают» имеющиеся в жидкости звуковые волны. Действительно, при «столкновениях» звуковых волн с движущейся шероховатой стенкой они получают от нее некоторый импульс в направлении движения стенки. Ясно поэтому, что движение стенок приводит к появлению преимущественного направления распространения звуковых волн. При этом, как мы знаем, возникает перенос массы жидкости. Таким образом, в действительности движущиеся стенки увлекают своим движением некоторую массу, но при низких температурах энергия звуковых волн весьма мала, и потому переносимая ими масса много меньше полной массы жидкости.

Можно представить, как будто гелий II состоит из двух компонент, способных двигаться независимо друг от друга. Движение одной из них не сопровождается трением, и она называется поэтому сверхтекучей компонентой. При движении другой компоненты, увлекающейся стенками, как и в обычных жидкостях, возникает трение; эта компонента называется нормальной. Сумма масс обеих компонент равна полной массе жидкости. Нужно, конечно, иметь в виду, что разделение гелия на две компоненты является чисто условным. В действительности, как мы видели, в гелии II могут существовать два вида движений, каждое из которых сопровождается переносом своей массы, причем сумма масс равна истинной массе жидкости. Одно из этих движений связано с движением звуковых волн и сопровождается трением, второе обладает свойством сверхтекучести. Все атомы гелия участвуют в обоих движениях, о разделении атомов на сверхтекучие и нормальные при этом не может быть и речи.

При повышении температуры энергия звуковых волн возрастает, и вместе с тем возрастает масса, связанная с нормальным движением. Наконец, при некоторой температуре она становится

равной истинной массе жидкости. При этом сверхтекучее движение исчезает, так как исчезает переносимая им масса, и гелий II переходит в гелий I, который ведет себя как обычные жидкости, поскольку в нем возможно только нормальное движение.

Если в гелии II равномерно движется какое-либо тело со скоростью, меньшей звуковой, то возникающее при этом сверхтекучее движение не оказывает ему никакого сопротивления. Действительно, если сила сопротивления отлична от нуля, то для перемещения тела к нему нужно приложить силу, которая совершит работу. Однако эта работа может превратиться лишь в тепло, т.е. пойти на излучение звука в жидкости, что, как мы знаем, невозможно. Этот результат можно сформулировать и как отсутствие силы давления на тело, обтекаемое сверхтекучим движением. Звуковые же волны при встрече с поверхностью твердых тел, погруженных в жидкость, обмениваются с ними импульсом, что мы уже видели на примере их взаимодействия со стенками щели. Поэтому обтекание нормальным движением сопровождается возникновением силы давления.

Теперь мы можем легко объяснить рассмотренные вначале эксперименты с гелием II.

При измерении вязкости первым способом (опыт со щелью) вязкость гелия II не обнаруживается, поскольку сверхтекучая компонента весьма быстро вытекает через щель без трения. Тот факт, что она имеет плотность, несколько меньшую полной плотности, в данном случае совершенно незаметен, так как любая обычная жидкость, обладающая вязкостью, протекала бы через достаточно узкую щель несравненно медленнее.

Измерения вязкости с помощью колеблющегося диска приводят к отличной от нуля вязкости потому, что диск движется в жидкости, содержащей обе компоненты. Затухание его колебаний происходит из-за взаимодействия с нормальной компонентой.

Можно сказать, что в эксперименте со щелью проявляет себя сверхтекучая компонента, а в эксперименте с диском — нормальная.

Выделение тепла в гелии II представляет собой процесс излучения звуковых волн. Перенос тепла в каком-то определенном направлении происходит потому, что энергия звуковых волн, распространяющихся в этом направлении, больше, чем в обратном. Поэтому направление переноса тепла является в то же время направлением преимущественного распространения звуковых волн и связанной с ними нормальной компоненты. Перенос тепла в гелии II, таким образом, всегда сопровождается

движением нормальной компоненты, т.е. механизм переноса тепла всегда конвекционный. Вот почему в опыте, схема которого изображена на рисунке 3, показания термометров были одинаковы, а лепесток все время отклонялся в направлении теплового потока под действием обтекающей его нормальной компоненты.

Если поток тепла имеет место в гелии II, заполняющем некоторый замкнутый сосуд, как на рисунке 4, то непрерывного переноса массы жидкости в одном направлении не происходит, так как порождаемая потоком разность давлений вызывает движение сверхтекучей компоненты в обратном направлении. Причем скорость сверхтекучего движения соответствует тому, что суммарный перенос массы отсутствует, поэтому уровень жидкости не меняется. Отклонение лепестка показывает, что из внутренней области вытекает нормальная компонента, а сверхтекучее движение остается незаметным, так как оно не оказывает давления на обтекаемые им тела.

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

А.Абрикосов

Явление сверхпроводимости было открыто голландским физиком Г.Камерлинг-Оннесом в 1911 году. Камерлинг-Оннесу первому удалось получить жидкий гелий, и он использовал его для создания криостатов — приборов, в которых можно поддерживать очень низкую температуру. В частности, он решил проверить правильность существовавших в то время представлений о поведении электрического сопротивления при низких температурах. Измеряя сопротивление ртути, Камерлинг-Оннес обнаружил, что оно скачком обращается в нуль при температуре около 4 К. Это явление было названо сверхпроводимостью, а температура перехода в сверхпроводящее состояние — критической. В настоящее время известно много сверхпроводников с самыми разными критическими температурами, от долей градуса до примерно 100 К. Но о последних я скажу позже.

Последующие исследования сверхпроводников позволили обнаружить многие их замечательные свойства. Так, оказалось, что сверхпроводимость разрушается магнитным полем. Критическое поле, при котором это происходит, зависит от температуры. Далее обнаружилось, что сверхпроводимость исчезает и в том случае, когда по образцу пропускают достаточно большой ток. Наконец, был обнаружен так называемый эффект Мейснера, суть которого заключается в следующем. Если поместить металл в не очень сильное магнитное поле и понижать температуру, то при переходе металла в сверхпроводящее состояние линии магнитного поля вытолкнутся из него. Последующее изучение показало, что на самом деле при таком переходе у поверхности сверхпроводника возникает небольшой слой, тол-

Из доклада, сделанного А.А. Абрикосовым в Политехническом музее в Москве в 1987 году. Опубликовано в «Кванте» в 1988 году.

щиной $10^{-5} - 10^{-6}$ см, в котором циркулируют токи, полностью экранирующие внутренние области образца от внешнего поля.

Я не буду перечислять все факты, свидетельствующие о свойствах сверхпроводников. Их было обнаружено много. Но тем не менее само явление оставалось таинственным. Более того, существовало некое принципиальное обстоятельство, которое, как казалось, делало сверхпроводимость невозможной.

В 1938 году П.Л. Капица открыл явление сверхтекучести жидкого гелия — его способность протекать по узким капиллярам без всякого трения. Через три года Л.Д. Ландау сумел объяснить это явление. В теории Ландау был выведен так называемый критерий сверхтекучести, согласно которому вязкость могла возникать при движении со скоростью, превышавшей некоторую критическую. Опишу это качественно. Торможение гелия означает изменение его энергии и импульса. Однако жидкий гелий является квантовой жидкостью и может менять энергию и импульс, поглощая и излучая определенные кванты, названные квазичастицами. Эти квазичастицы ведут себя в объеме тела как настоящие частицы, правда с необычной связью между энергией и импульсом. Различие между ними и обычными частицами — электронами, фотонами — заключается в том, что вне тела квазичастицы существовать не могут. В жидком гелии такие частицы могут появляться лишь тогда, когда скорость течения гелия выше определенной конечной величины.

Казалось бы, отсюда легко перейти к объяснению сверхпроводимости как сверхтекучести заряженной электронной жидкости в металлах. Однако свойства квазичастиц, возникающих в электронной жидкости, оказались отличными от свойств квазичастиц в жидком гелии. Так, для них критическая скорость равна нулю, и, следовательно, протекание тока без сопротивления оказывается вообще невозможным. В чем же разница между этими двумя жидкостями — жидким гелием и электронной жидкостью? Она, прежде всего, заключается в том, что собственный момент вращения, называемый спином, у атомов гелия равен нулю, а у электронов он $\hbar/2$, где \hbar — постоянная Планка. Поэтому сразу встал вопрос, не могут ли электроны объединяться в пары. У таких пар полный спин был бы равен либо нулю (спины электронов направлены в противоположные стороны), либо \hbar . Подобные пары квазичастиц в электронной жидкости могли бы напоминать квазичастицы жидкого гелия, и можно было бы надеяться объяснить явление сверхпроводимости по аналогии со сверхтекучестью. Однако электроны — одноименно заряженные частицы, благодаря кулоновскому взаимодействию

они отталкиваются, и никакой причины для объединения в пары, казалось бы, нет.

Лишь в 1950 году был произведен эксперимент по измерению критических полей $B_{кр}$ и температур $T_{кр}$ образцов ртути разного изотопического состава, который пролил свет на возможные причины образования пар. Выяснилось, что величины $T_{кр}$ и $B_{кр}$ зависят от массы изотопа M по закону

$$T_{кр}, B_{кр} \sim \frac{1}{\sqrt{M}}.$$

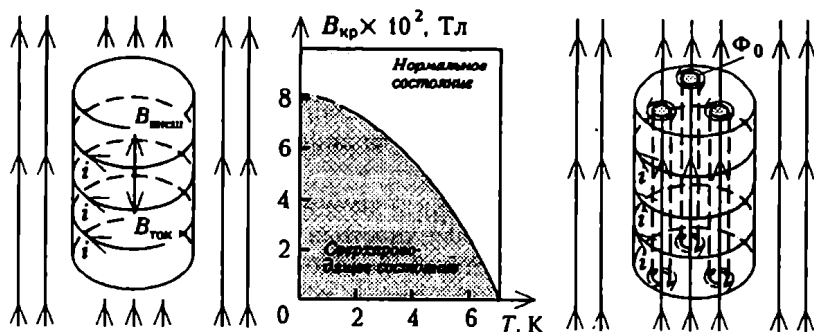
Но масса ядер, образующих кристаллическую решетку, проявляется лишь в их движении. Таким образом, стало ясно, что это движение существенно для сверхпроводимости. Основываясь на этом факте, английский физик Г. Фрелих и независимо от него американский физик Дж. Бардин предложили концепцию, объясняющую природу сил притяжения между электронами. Дело в том, что ядра а точнее ионы, образующие кристаллическую решетку металла, тоже являются квантовой системой, и в этой системе также имеются квазичастицы, соответствующие колебаниям решетки. Они называются фононами. Электроны могут обмениваться фононами, и это обязательно приводит к притяжению, которое может превзойти непосредственное кулоновское отталкивание.

Однако даже после того, как была высказана эта идея, оставалось неясно, как благодаря такому притяжению возможно образование пар из электронов. Согласно квантовой механике, для этого силы притяжения должны быть достаточно большими и действовать на большом расстоянии. Иначе кинетическая энергия электронов растащит их в разные стороны. Выход из этого положения нашел американский физик Л. Купер, который обратил внимание на тот факт, что речь идет об образовании пар не из двух изолированных электронов, а в присутствии всей совокупности других электронов. Можно сказать и иначе: пары образуются не из электронов, а из квазичастиц электронной жидкости. Эти пары по имени их открывателя стали называть куперовскими.

В 1957 году Дж. Бардином, Л. Купером и Дж. Шриффером и независимо от них академиком Н.Н. Боголюбовым была построена микроскопическая теория сверхпроводимости, которая связала воедино все известные опытные факты о свойствах сверхпроводников. Я не буду излагать здесь эту теорию ввиду ее сложности. Отмечу лишь несколько важных обстоятельств. Прежде всего, если система находится при $T = 0$, то передать ей

энергию можно лишь разорвав пару. Это требует затраты конечной энергии, которую обозначают 2Δ . В связи с этим электронная теплоемкость при низких температурах ведет себя как $e^{-\Delta/T}$. Второе: я уже отмечал, что для связывания электронов в пары существенно наличие всего электронного коллектива. Но состояние этой системы зависит от температуры. Поэтому энергия связи пары 2Δ зависит от температуры, и при $T = T_{кр}$ она обращается в нуль — сверхпроводник становится нормальным металлом. Третье свойство связано с тем, что пары имеют конечный размер порядка $10^{-4} - 10^{-5}$ см. Возникает вопрос: как же они не мешают друг другу? Ведь среднее расстояние между электронами в металле порядка 10^{-8} см. Этот парадокс является проявлением квантовых свойств вещества. Шриффер для сравнения уподобил электроны в сверхпроводнике танцорам в современной дискотеке. Двое танцуют, и, хотя между ними еще много других танцоров, они не теряют связь друг с другом. Поэтому точнее говорить не о парах, а о парной корреляции электронов в сверхпроводнике.

Я уже говорил вам о том, что, когда внешнее магнитное поле сравнивается с критическим, сверхпроводник скачком переходит в нормальное состояние. Это утверждение, строго говоря, справедливо лишь для цилиндрического образца в продольном поле и притом не для всех сверхпроводников. Действительно, почему бы массивному сверхпроводнику не разбиться на тонкие слои нормального и сверхпроводящего металла и не сохранить сверхпроводимость до гораздо больших полей? Ведь критическое поле для тонкого слоя выше, чем для массивного сверхпроводника. Разбиение на слои не происходит потому, что во всех чистых сверхпроводниках, состоящих из одного металла, существует особая поверхностная энергия, возникающая на границах между нормальной и сверхпроводящей фазами. Эта энергия, подобно поверхностному натяжению, стремится уменьшить поверхность границ. Микроскопическая теория объяснила ее происхождение. Оказалось, что она связана с конечным размером куперовских пар. Если уменьшать этот размер, то поверхностная энергия может изменить знак и сделаться отрицательной. Тем самым возникает естественное разделение сверхпроводников на сверхпроводники первого рода — с положительной поверхностной энергией и сверхпроводники второго рода — с отрицательной поверхностной энергией. Надо заметить, что сверхпроводники второго рода являются гораздо более распространенными, чем сверхпроводники первого рода. Мало того: любой сверхпроводник первого рода можно перевести во второй род. Для этого достаточно ввести в



Металлический цилиндр, охлаждаемый до низкой температуры, находится в сверхпроводящем состоянии. При включении магнитного поля на поверхности цилиндра индуцируются круговые токи, которые создают в цилиндре магнитное поле с индукцией $B_{ток}$, равной по величине и противоположной по направлению индукции $B_{внеш}$ внешнего поля. Эти круговые токи — сверхпроводящие и не затухают со временем. Поэтому в толще сверхпроводника суммарная индукция равна нулю: $B_{внеш} + B_{ток} = 0$. Линии индукции магнитного поля не проникают в сверхпроводник.

Чем больше индукция внешнего поля, тем больший ток должен течь по поверхности, чтобы обеспечить экранировку внутренней области металлического сверхпроводника от внешнего поля. При некотором критическом значении индукции внешнего поля $B_{к1}$, поле проникает внутрь образца, сверхпроводимость разрушается — металл переходит в нормальное состояние. Для такого перехода не обязательно внешнее магнитное поле. Ток, текущий по поверхности сверхпроводника, сам создает магнитное поле, и когда $B_{ток}$ достигает значения, соответствующего $B_{к1}$, сверхпроводимость разрушается. Величина $B_{к1}$ растет с уменьшением температуры, но даже вблизи $T = 0$ значение $B_{к1}$ у чистых сверхпроводящих металлов невелико — не более десятых долей тесла.

В сверхпроводящих сплавах, так же как в ряде сверхпроводящих соединений, при некотором значении индукции $B_{к1}$, поле начинает проникать внутрь сверхпроводника. В толще образца появляются отдельные сгустки линий магнитной индукции. Каждый такой сгусток окружен кольцевыми незатухающими токами, напоминающими вихри в жидкости или в газе. Эти сгустки и называют вихрями. Внутри вихря сверхпроводимость разрушена, но в пространстве между вихрями она сохраняется. С увеличением индукции магнитного поля число вихрей растет. При некотором значении индукции $B_{к2}$ вихри начинают перекрываться, поле «заполняет» образец, сверхпроводимость полностью разрушается. Сверхпроводники с такими свойствами называют сверхпроводниками второго рода.

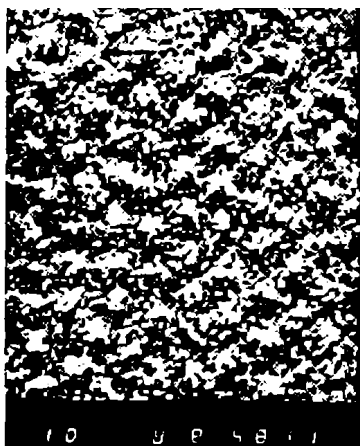
него некоторое количество атомов примеси или как-нибудь иначе «испортить» кристаллическую решетку. Электроны начинают рассеиваться на этих дефектах. Характер движения электронов меняется, и размер пар становится меньше. При достаточной концентрации дефектов сверхпроводник первого рода обязательно переходит во второй род.

Теперь я немного расскажу о свойствах сверхпроводников второго рода. Поскольку поверхностная энергия в них отрицательна, то ничто не препятствует бесконечному расщеплению их объема на нормальные и сверхпроводящие области. Поэтому сверхпроводимость в них с увеличением внешнего магнитного поля вытесняется постепенно, начиная с некоторого значения поля $B_{кр1}$. Переход в нормальное состояние осуществляется в верхнем критическом поле $B_{кр2}$. Физический смысл $B_{кр2}$ заключается в следующем. В магнитном поле электроны, будучи заряженными частицами, движутся по спиральным траекториям, и радиус спирали обратно пропорционален B . Если радиус спирали становится меньше размера пары, то пара уже не может существовать и разваливается. Если же внешнее магнитное поле ниже $B_{кр2}$, но выше $B_{кр1}$, то оно частично проникает в сверхпроводник. Происходит это за счет возникновения в сверхпроводнике вихревых токов. Оказывается, что эти вихри являются квантовыми объектами. Каждый из них несет квант магнитного потока. Если хотите, можно сказать, что число силовых линий, проходящих в каждом таком вихре, строго определенное. Квант потока является очень малой величиной и равен $\Phi_0 = \pi\hbar/e^* = 2 \cdot 10^{-15}$ Вб.

При уменьшении поля вихри расходятся и в поле $B_{кр1}$ исчезают из сверхпроводника совсем. Фактически поле $B_{кр1}$ — это то поле, при котором один вихрь еще может существовать в сверхпроводнике. Область между полями $B_{кр1}$ и $B_{кр2}$ называется смешанным состоянием. В этом состоянии сверхпроводник пронизан вихревыми нитями — миниатюрными соленоидами, расположенными в правильном порядке. В поперечном срезе они образуют треугольную решетку. Каждый вихрь имеет сердцевину, размер которой равен размеру куперовской пары; эту сердцевину можно считать областью нормального металла.

Очень существенным оказывается то обстоятельство, что, увеличивая концентрацию дефектов, можно увеличивать критическое поле $B_{кр2}$, вплоть до которого по образцу может течь сверхпроводящий ток. Это дает возможность применять сверхпроводники второго рода для создания сверхпроводящих магнитов. Действительно, в сверхпроводящем кольце ток может

циркулировать вечно. Можно сделать соленоид и замкнуть его накоротко. Это и будет сверхпроводящий постоянный магнит. Отличие от обычного электромагнита заключается в том, что в обычном магните энергия тока в конечном итоге тратится на разогрев обмотки. Из-за этого приходится делать громоздкую и дорогостоящую систему охлаждения. Именно это обстоятельство ограничивает возможности электромагнитов полями до 5–6 Тл. А с помощью сверхпроводящих магнитов уже сегодня можно получить поля до 10–12 Тл ($\text{Nb} - \text{Zr} - \text{Ti}$) и даже до 23 Тл (Nb_3Sn). В настоящее время сверхпроводящие магниты используются в генераторах, для создания магнитной подушки в поезде-экспрессе, в ускорителях элементарных частиц, в токамаках — приборах термоядерного синтеза, в магнитогидродинамических генераторах. Кроме того, сверхпроводящая катушка с током может служить накопителем энергии.

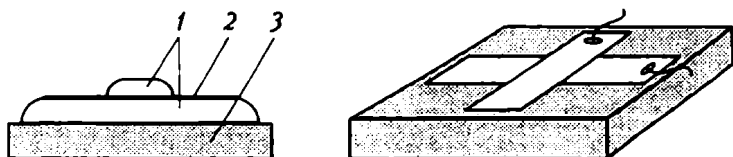


Фотография структуры вихрей в сверхпроводнике второго рода. Вихри образуют периодическую структуру, аналогичную кристаллической решетке.

Однако надо иметь в виду, что это дело не такое простое. Чем выше верхнее критическое поле $B_{кп2}$, тем ниже нижнее $B_{кп1}$. Значит, в проволоке сверхпроводящего соленоида с током наверняка имеются вихри. Под действием силы Лоренца вихри могут прийти в движение, а это немедленно приведет к диссипации энергии, т.е. к появлению сопротивления. Выход из этого положения — как-то закрепить, припаять вихревую решетку, чтобы она не двигалась. Это называется «пиннингом» (от английского pin — булавка). В этом случае сверхпроводящий ток легко огибает нормальные сердцевинки вихрей. Я не буду останавливаться на этом очень интересном вопросе и перейду теперь к рассказу о «слабой» сверхпроводимости.

Из квантовой механики известен так называемый туннельный эффект — возможность частицам проникать через потенциальный барьер, даже если высота этого барьера выше энергии частиц. Конечно, реально ширина барьера должна быть очень малой. Туннельный эффект был использован И. Гизвером в 1960 году для создания туннельного контакта: два металличе-

ких электрода разделены слоем изолятора (обычно в качестве изолятора берется пленка окиси на поверхности одного из металлов). Благодаря туннельному эффекту, через такой контакт может идти ток. Если один из этих металлов является сверхпроводником, то электроны в нем объединены в пары. Но для целой пары проникновение через барьер очень маловероятно. Поэтому нужно, чтобы электрическое поле расщепило пару, и тогда уже электроны поодиночке пройдут через контакт. Минимальная энергия на один электрон при этом равна Δ , и следовательно, при $T = 0$ протекание тока начинается лишь когда разность потенциалов U между электродами достигнет такого значения, что $eU = \Delta$. Таким способом измерили Δ .



Сверхпроводящий туннельный контакт. На стеклянную подложку (3) наносят пленку сверхпроводника (1). Затем ее окисляют — на поверхности сверхпроводника создается слой диэлектрика (2) толщиной порядка десяти ангстрем. Сверху наносят еще одну пленку (1) сверхпроводника. (Для удобства измерений сверхпроводящие пленки «укладывают» на подложку в виде креста.) С некоторой вероятностью электроны из одной пленки могут проникать в другую через диэлектрическую прослойку — это называют туннельным эффектом.

Можно использовать и туннельный контакт из двух сверхпроводников. Однако в последнем случае возникает и некоторое новое явление. Если диэлектрическая прослойка достаточно тонкая, куперовские пары могут образовываться из электронов, принадлежащих к разным электродам. При этом создается возможность протекания через контакт не просто тока, а сверхпроводящего тока. Это явление было предсказано английским физиком Б. Джозефсоном в 1962 году и после экспериментального подтверждения было названо его именем. Критический ток Джозефсона очень маленький, плотность его не более $10^2 - 10^3$ А/см². Эту величину следует сравнить с токами в магнитах — порядка $10^5 - 10^6$ А/см² или с «теоретическим пределом» для развала пар в сверхпроводнике — порядка 10^8 А/см². Однако эффект Джозефсона получил новое, очень перспективное применение. Дело в том, что величина джозефсоновского критического тока оказалась необыкновенно чувствительной к внешнему магнитному полю. Это позволило создать особые

сверхпроводящие устройства — джозефсоновские интерферометры, или сквиды, которые дают возможность измерять магнитные поля до 10^{-14} Тл (магнитное поле Земли $0,5 \cdot 10^{-4}$ Тл), а затем использовать это поле для измерения токов вплоть до 10^{-14} А и разностей потенциалов до 10^{-15} В. Сквиды уже применяются в биологии и медицине, ибо они дают гораздо более точные данные, чем электрокардио- или энцефалографы, и превосходят даже рентгеновские и ЯМР-томографы. Кроме того, джозефсоновские контакты могут быть использованы как для регистрации очень слабых электромагнитных излучений, так и для генерации электромагнитных волн большой частоты. Эффект Джозефсона — это большая область применений сверхпроводимости.

Трудно даже вообразить, сколько разных применений получили бы сверхпроводники, если бы не одно печальное обстоятельство. Все сверхпроводящие устройства, применяемые до сих пор, нуждаются в охлаждении жидким гелием, что очень удорожает использование сверхпроводников. Однако в последнее время появились так называемые сверхпроводящие окислы, или керамики, с критической температурой в районе 95 К. Это уже заметно выше, чем точка кипения жидкого азота (77 К), стоимость которого существенно меньше.

А теперь я остановлюсь на истории открытия и свойствах таких сверхпроводящих керамик. С 1973 года и до середины 1986 года рекорд максимальной критической температуры принадлежал пленкам из Nb_3Ge , сохранявшим сверхпроводимость вплоть до 23 К. Однако осенью 1986 года появилось сообщение физиков Г.Беднорца и А.Мюллера (Швейцария) об открытии сверхпроводимости соединения $La - Ba - Cu - O$ с критической температурой в районе 30 К. Эти авторы не сразу подошли к своему открытию. Дело в том, что еще до них был известен сверхпроводящий окисел $Ba - Pb - Bi - O$ с критической температурой 14 К. Станным в этом соединении было то, что плотность свободных электронов, переносящих ток, у него была 10^{21} см^{-3} , что на порядок меньше, чем у обычных металлов. В то же время, согласно теории Бардина — Купера — Шриффера (БКШ), значение критической температуры растет с увеличением числа свободных электронов. Ясно, что уменьшение числа электронов должно вести к уменьшению $T_{кр}$. А 14 К — это была относительно высокая критическая температура.

Далее внимание Беднорца и Мюллера привлекли окислы, содержащие медь в состоянии с промежуточной валентностью: часть Cu^{2+} , а часть Cu^{3+} . Такие окислы изучались французски-

ми физиками. В качестве элемента структуры в них входил редкоземельный элемент лантан. Если взять соединение La_2CuO_4 , то медь в нем только двухвалентная, и это вещество ведет себя как изолятор. Мюллер и Беднорц стали заменять трехвалентный лантан двухвалентными элементами, чтобы отнять часть электронов у меди и тем самым частично перевести медь в трехвалентное состояние. В результате был получен первый высокотемпературный сверхпроводник $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$, где $x = 0,1 - 0,2$. Сначала Беднорцу и Мюллеру никто не поверил, и их статью отказался печатать ведущий американский физический журнал «Physical Review Letters». Тогда они отослали ее в немецкий журнал «Zeitschrift für Physik», где она и вышла осенью 1986 года. Первоначально статья не вызвала интереса. Но потом японские специалисты решили проверить сообщение и убедились, что Мюллер и Беднорц не ошиблись. После этого указанные соединения исследовали американские физики, и с начала 1987 года разразился настоящий «сверхпроводящий бум». Сейчас имеется уже несколько тысяч статей на эту тему. Я не могу рассказать о всех деталях этой гонки, но отмечу основные моменты.

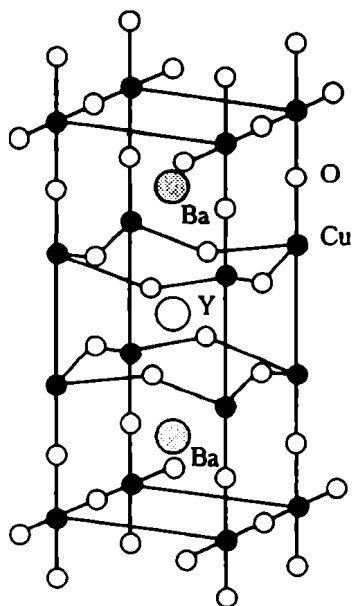
Естественно было попытаться повысить критическую температуру путем замены элементов их химическими аналогами. Замена Ba на Sr привела к $T_{\text{кр}} = 45$ К. Американская группа из Хьюстона во главе с П. Чу подвергла эти образцы сжатию и обнаружила, что критическая температура быстро растет при сжатии, хотя в обычных сверхпроводниках в подобных условиях $T_{\text{кр}}$, как правило, слабо убывает. Тогда они решили попытаться устроить «химическое» сжатие, заменив атомы лантана на атомы иттрия, имеющие меньший размер. В результате было получено соединение с фантастически высокой по тем, еще недавним, временам критической температурой $T_{\text{кр}} \sim 93$ К.

Идея о «химическом» сжатии помогла сделать открытие, но в конце концов оказалась неправильной. Очень тщательное исследование показало, что высокотемпературным сверхпроводником является фаза «1 – 2 – 3»: $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, где x меньше единицы. Последующие попытки замены Y другими элементами показали, что сверхпроводимость с $T_{\text{кр}} \sim 90$ К наблюдается у соединений со структурой «1 – 2 – 3», где вместо иттрия может стоять осмий и почти все редкие земли, включая лантан.

Теперь я расскажу о некоторых особенностях этих соединений и о попытках теоретического объяснения высоких $T_{\text{кр}}$. Прежде всего – о структуре. В обоих типических соединениях $\text{La} - \text{Ba} - \text{Cu} - \text{O}$ и $\text{Y} - \text{Ba} - \text{Cu} - \text{O}$ она соответствует так

называемым слоистым перовскитам. Характерной их особенностью является слоистость (периоды по двум направлениям порядка $2,8 \text{ \AA}$, а по третьему 12 \AA). В медных «слоях» каждый атом меди окружен октаэдром атомов кислорода. Расчеты показывают, что основная проводимость происходит по слоям медь — кислород в результате перекрытия d -оболочек меди с p -оболочками кислорода. Атомы редкой земли роли, по-видимому, не играют: «свободные» электроны туда просто не заходят. Далее, оба вещества имеют в принципе две модификации: тетрагональную и орторомбическую. В первой элементарная ячейка имеет вид правильной четырехгранной призмы, а во второй — прямоугольного параллелепипеда с произвольными длинами ребер. Но отличие от тетрагональности небольшое. Интересно отметить, что чистый La_2CuO_4 при низких температурах является орторомбическим, но добавление Ва подавляет этот переход, и вещество остается тетрагональным. Наоборот, иттриевое соединение «1 — 2 — 3» при низких температурах является орторомбическим. В принципе его можно получить и в тетрагональной модификации, изгнав из него часть кислорода путем нагрева, но эта модификация — не сверхпроводник.

Что касается поведения в магнитном поле, то новые вещества являются экстремальными сверхпроводниками второго рода, ибо нижнее поле $B_{\text{кр}1}$ в них порядка 10^{-2} Тл, а верхнее $B_{\text{кр}2}$ при низких температурах оценивается как 10^2 Тл. Надо заметить, что эти вещества хрупкие, и не так просто сделать из них проволоку для сверхпроводящего магнита. Другим отрицательным свойством является то, что критическая плотность тока в них порядка $10^2 - 10^3 \text{ А/см}^2$. Более того, это значение очень быстро падает при помещении веществ во внешнее магнитное поле. Согласно последним исследованиям, это связано с тем, что новые вещества состоят из сверхпроводящих зерен, разделенных изолирующими прослойками. Через эти прослойки возможен небольшой джозефсоновский ток, который легко подавляется магнитным полем. Правда, в пленках, состоящих из ориентированных кристаллитов, получена критическая плотность тока до 10^6 А/см^2 при температуре кипения жидкого азота ($T = 77 \text{ К}$), но пленки не могут служить обмотками для сверхпроводящих магнитов. В настоящее время усилия многих лабораторий мира сосредоточены на попытках получить монокристаллы новых сверхпроводников. Удалось сделать пластинки со стороной до 1 см и толщиной до 3 мм. Исследование таких образцов подтверждает, что это вещества слоистые: сопротивление поперек слоев в десятки раз превышает сопротивление вдоль них. Кстати, отмечу, что в



Структура кристаллической решетки соединения Y-Ba-Cu-O .

нормальном состоянии это плохие проводники: удельное сопротивление раз в 100 больше, чем у меди.

Что касается теоретических объяснений, то здесь больше вопросов, чем ответов. Например, по теории Бардина — Купера — Шриффера получается соотношение $2\Delta(0)/T_{\text{кр}} = 3,5$. Для новых сверхпроводников разные измерения дают для этой величины значения от 3 до 12. Далее, эти вещества обладают целым рядом специфических особенностей, но не очень ясно, какие именно из них имеют принципиальное значение. Например, какую роль играет слоистость кристаллов, существенны ли атомы лантана или иттрия в механизме сверхпроводимости или они играют роль просто

механической фермы, которая скрепляет кристаллическую решетку? Какова роль кислорода? Известно, что в иттриевом соединении есть слои, состоящие из цепочек Cu-O-Cu-O , а есть плоскость, в которых на атом меди приходится по два атома кислорода. При удалении кислорода он прежде всего уходит из цепочек, и вещество теряет сверхпроводимость. Но в лантановом соединении таких цепочек нет.

Итак, не очень понятно, за что зацепиться. Экспериментально установлено, что и в новых сверхпроводниках электроны объединены в куперовские пары. Но каков механизм притяжения? Механизм передачи фононов — квантов колебаний решетки — влечет за собой изотопический эффект, т.е. изменение $T_{\text{кр}}$ с переходом к другому изотопу. Были сделаны измерения на образцах с заменой изотопа ^{16}O на ^{18}O . У лантанового соединения эффект наблюдался, хотя и меньше, чем предсказывала теория БКШ. Но у иттриевого 90-градусного сверхпроводника, так же как и у такого же вещества с европием вместо иттрия, этого эффекта практически нет. Отсюда делается вывод, что помимо давно известного фононного существует другой механизм передачи взаимодействия между электронами. В принципе, в веществе могут существовать квазичастицы и иных

типов — например, связанные с возбуждением электронов, удаленных от проводящих слоев. Они называются плазмонами. Есть и другая идея: вещество может находиться близко к переходу в магнитоупорядоченное состояние. В этом состоянии есть свои квазичастицы — магноны. Но даже если нет настоящего упорядочения, то оно может возникать в виде флуктуации и создавать взаимодействие электронов. Появились теории, использующие это обстоятельство.

Я не могу перечислить всех теорий — их очень много. Отмечу еще только очень интересную концепцию двухэлектронных центров. Известно, что кислород очень легко уходит из новых сверхпроводников, в то время как в обычных окислах он связан очень прочно. Есть концепция, согласно которой два электрона могут сразу уйти с атомов кислорода на медь; это делает кислород нейтральным и тем самым облегчает его выход из решетки. А то обстоятельство, что электроны то находятся в коллективизированном металлическом состоянии, то оказываются попарно локализованными на кислороде, приводит к их притяжению.

Итак, сейчас наступило время исследований и поисков как механизма высокотемпературной сверхпроводимости, так и способов практического применения новых сверхпроводящих материалов. Исследования ведутся очень большими силами, и не исключено, что они увенчаются успехом. Однако одно важное дело — открытие высокотемпературных сверхпроводников — уже сделало: оно уничтожило многолетний предрассудок, что сверхпроводимость обязательно требует низких температур. Это окрыляет людей на дальнейшие поиски, и даже в том случае, если не удастся «приручить» обнаруженные сверхпроводящие керамики, обязательно будут найдены другие классы сверхпроводников с более высокими T_K , и более пригодные для практического использования.

... вот уже несколько лет ученые мечтают о создании сверхпроводника, который функционировал бы при комнатной температуре.

Артур Хейли. Колеса

НЕКОТОРЫЕ УРОКИ НАУЧНОЙ СЕНСАЦИИ

Д. Киржниц

В первые послевоенные годы, когда с выходом на сцену новой могучей силы — атомной энергии — началась эпоха научно-технической революции, специальность физика считалась особенно престижной. Позднее общество не только охладело к представителям этой профессии, но и стало видеть в них источник глобальных проблем, вставших перед человечеством. Эту эволюцию чутко уловили поэты: на смену стихам Слуцкого «что-то физики в почете...» пришла песня Галича «Это гады-физики на пари раскрутили шарик наоборот...»

Похоже, что в последнее время акции физиков снова пошли на повышение. К этому привела крупная научная сенсация — открытие высокотемпературной сверхпроводимости (сокращенно ВС). В этой статье автор стремился, бегло коснувшись всего необходимого читателю для получения общего представления о проблеме, уделить основное внимание ее общечеловеческим аспектам.

1. Начать придется с общей картины внутреннего строения проводника (металлического тела). Его жесткий каркас образует правильная кристаллическая решетка, составленная из атомов металла, которые колеблются около узлов решетки. В пространстве между атомами находятся легкоподвижные электроны, а также атомы посторонних примесей.

При подключении источника питания (например, батареи) в проводнике возникает электрический ток, т.е. приходят в движение электроны металла. Они неизбежно сталкиваются с колеблющимися атомами решетки и с атомами примесей. Это ведет к торможению электронов с превращением их первоначально

Расширенный текст доклада Д.А.Киржница на вечере «Жизнь и судьба научных открытий сегодня» в Центральном доме актера в Москве. Опубликовано в «Кванте» в 1989 году.

упорядоченного движения в хаотическое (иными словами — с выделением тепла). Поэтому при отключении батареи ток быстро затухает, а его энергия переходит в тепло.

Мерой такого торможения служит удельное сопротивление проводника (далее для краткости именуемое просто сопротивлением). Для данного материала оно тем меньше, чем ниже концентрация примесей и температура проводника. Поэтому уже давно возникло убеждение, что сопротивление очень чистого проводника при его охлаждении до абсолютного нуля (-273°C) должно плавно стремиться к нулю.

Для проверки этого убеждения голландский физик Г. Камерлинг-Оннес провел в 1911 году измерения сопротивления ртути (жидкого и потому легко очищаемого металла) при ее глубоком охлаждении. Поначалу все шло в соответствии с ожиданиями: с уменьшением температуры плавно падало и сопротивление. Однако при температуре около 4 К произошло чудо: сопротивление внезапно упало до нуля и продолжало отсутствовать при дальнейшем охлаждении.

Так было открыто явление сверхпроводимости — полного исчезновения сопротивления металла. Если создать ток в сверхпроводящем кольце и выключить источники питания, то заметного затухания тока не дождутся и наши далекие потомки: соответствующее время много больше возраста Вселенной. Перефразируя Шолом-Алейхема, можно сказать: «Сопротивление как деньги — уж если оно есть, так есть, а если его нет, так нет».

Со временем оказалась, что сверхпроводимость присуща широкому кругу веществ, каждое из которых имеет свое значение критической температуры — температуры исчезновения сопротивления. По мере открытия новых сверхпроводников наибольшее значение этой величины росло, но весьма медленно: за 75 лет оно выросло с 4 К до 23 К — примерно на 0,2 К в год.

Положение радикально изменилось в 1986 году, когда швейцарские физики А. Мюллер и Г. Беднорц начали изучать новый класс материалов, содержащих кислород, медь и другие металлы, — так называемые оксокупраты. Материалы эти не похожи на обычные проводники (внешне они напоминают продающиеся в аптеках угольные таблетки), и их перспективность в плане ВС казалась очень сомнительной. Однако Мюллер и Беднорц верили в успех и не обманулись в своих ожиданиях: критическая температура сразу же отодвинулась примерно до 40 К.

Этот успех и стал открытием ВС (точнее, открытием нового класса материалов, исключительно перспективных с точки зрения дальнейшего повышения критической температуры). Уже

через короткое время, в начале 1987 году, американцем П.Чу был синтезирован оксокупрат с критической температурой около 100 К, а сегодняшний абсолютный рекорд составляет примерно 125 К. Это, так сказать, «синица в руках». Что же касается «журавля в небе», то имеются сообщения (требующие, однако, подтверждения) о наблюдении сверхпроводимости при комнатной и даже более высокой температуре. Во всяком случае, существование сверхпроводников, не требующих никакого специального охлаждения, законам природы не противоречит.

2. Откуда же берутся удивительные свойства сверхпроводника? Выше уже говорилось, что сопротивление возникает из-за столкновений электронов с колебаниями решетки и с примесями. Такие столкновения имеются всегда, но в сверхпроводнике, в отличие от обычного металла, они никак не сказываются на движении электронов, сохраняющем свой упорядоченный характер. Чтобы понять природу этой «нечувствительности» электронов сверхпроводника, придется поверить в одно фундаментальное свойство частиц, из которых построена материя. Оно состоит в том, что в микромире есть две формы поведения частиц друг по отношению к другу (и, соответственно, два класса частиц) — «индивидуалистическая» и «коллективистская».

Частицы -«индивидуалы» (ферми-частицы) находятся обязательно в различных состояниях, не допуская скопления в каждом из них более одной частицы. Напротив, частицы-«коллективисты» (бозе-частицы) стремятся скопиться в одном и том же состоянии, «завлекая» в него другие бозе-частицы и, наоборот, препятствуя им покинуть это состояние. Это стремление выражено особенно сильно, если в данном состоянии уже скопилась заметная доля всех бозе-частиц. Такое скопление называют бозе-конденсатом (входящие в него частицы абсолютно не отличимы друг от друга).

Бозе-конденсат не поддается внешним воздействиям, препятствуя, как уже отмечалось, попыткам вырвать из него отдельные частицы и перевести их в другие состояния. Он представляет собой монолит, крепко спаянный «морально-политическим единством» своих членов и сопротивляющийся попыткам разрушить это единство. Читатель без труда отыщет соответствующие аналогии в истории или в повседневной жизни. (Для автора незабываемый пример такого рода — собрание домохозяек и пенсионеров, требовавших крови врагов народа, на котором он присутствовал подростком.)

Если бы электроны были бозе-частицами, то при низкой температуре они обязательно перешли бы в состояние бозе-

конденсата, а только что отмеченная его нечувствительность к внешним воздействиям (в частности — к столкновениям с колебаниями решетки и с примесями) и оказалась бы ключом к объяснению сверхпроводимости. Однако электроны — не бозе, а ферми-частицы, так что такое объяснение напрямую не проходит. Тем не менее, в конечном счете оно правильное.

Дело в том, что объединенные какими-либо силами две ферми-частицы ведут себя как одно целое, подобное бозе-частице, и такие пары способны поэтому переходить в состояние бозе-конденсата (здесь также есть житейская аналогия: холостяки, как правило, меньшие конформисты, чем супружеские пары). Поэтому, если бы для всех сверхпроводников существовал механизм объединения электронов в пары, то природу сверхпроводимости можно было бы считать ясной. Для «старых» сверхпроводников этот механизм основывается на взаимодействии электронов с колебаниями решетки, а для оксидов его еще предстоит установить. На это сегодня направлены основные усилия ученых.

3. Говоря об открытии ВС, мы не разъяснили, почему повышение критической температуры до величины порядка 100К означает не просто количественный прогресс, а принципиальный качественный скачок, обещающий огромные технические последствия. Дело в том, что до открытия ВС сверхпроводник проявлял свои замечательные свойства только при охлаждении жидким гелием — дорогостоящим и труднодоступным продуктом. Именно поэтому прежние технические применения сверхпроводимости ограничивались в основном установками типа ускорителей элементарных частиц, уникальная стоимость которых многократно перекрывала расходы на охлаждение сверхпроводящих обмоток мощных магнитов.

Открытие ВС сделало возможным охлаждение сверхпроводника с помощью жидкого азота (его температура кипения 77 К). Этот продукт примерно в тысячу раз дешевле жидкого гелия, а о его общедоступности говорит уже тот факт, что победе в минувшей войне немало способствовал перевод металлургии на кислородное дутье (кислород добывался из жидкого воздуха, состоящего на 4/5 из жидкого азота). Переход на азотное охлаждение откроет дорогу широкому применению сверхпроводников в технике уже самого ближайшего будущего: западные специалисты оценивают потенциальный рынок этих материалов к 2000 году в 1 млрд долларов. А если надежды на сверхпроводимость при комнатной температуре оправдаются, то соответствующие перспективы станут вообще необозримыми.

Для большинства электротехнических устройств (исключая, конечно, электронагревательные приборы) выделение тепла в проводнике при протекании по нему электрического тока означает бесполезное разбазаривание энергии, а во многих случаях — крайне вредный разогрев аппаратуры, мешающий ее нормальной работе. Применение сверхпроводящих материалов позволит резко подавить (в принципе свести на нет) тепловые эффекты. На этом основана большая группа технических приложений ВС.

К их числу относятся прежде всего технические устройства, конструкция которых включает сильные электромагниты: упомянутые выше ускорители, магнитные сепараторы, медицинские томографы массового использования и т.д. Другие приложения ВС того же характера связаны с транспортировкой энергии. Ведь в линиях электропередач на бессмысленное отопление атмосферы расходуется до $1/4$ всей передаваемой энергии. Использование сверхпроводящих кабелей поможет радикальному решению этой проблемы, острота которой еще более возрастает, когда размещение источников энергии (обычных и атомных электростанций) будет приведено в соответствие с требованиями экологии и безопасности населения.

Особая группа технических приложений ВС связана с использованием специфических свойств сверхпроводника, прямо не относящихся к отсутствию в нем тепловыделения. Имеются в виду магнитные накопители энергии (сверхпроводящие катушки с током) в электротехнике сильных токов и многочисленные устройства в электронике (быстродействующие переключатели, логические ячейки и элементы памяти в ЭВМ, высокоточные сверхпроводниковые измерительные приборы и др.).

Сюда же относятся и приложения ВС, обещающие переход к экономичному и быстроходному транспорту на магнитной подушке. Здесь предполагается использовать еще одно чудесное свойство сверхпроводника — его способность устойчиво висеть в воздухе над сильным магнитом (левитация, или «гроб Магомета»).

Не следует, однако, думать, что уже завтра вокруг нас потекут молочные реки в кисельных берегах. Люди вообще склонны ошибаться в оценке перспектив только что сделанного научного открытия. Часто эти ошибки имеют характер преуменьшения, как это было с паровой машиной или электричеством. Но не исключено и обратное, когда возникает искушение покрыть экономический и социальный дефицит общества за счет чудес, подобных ВС. Нельзя забывать, что никакое научное открытие не может снять тех проблем, которые должны решаться полити-

ческими средствами. Во всяком случае, эффективно использовать результаты научного открытия может лишь экономически здоровое общество. Обо всем этом думаешь, выходя ночью на балкон и наблюдая море огней в лестничных клетках спящих домов. Известно, что королева Мария-Антуанетта, узнав, что французским крестьянам не хватает черного хлеба, спросила: «А почему же они не едят бриоши?» (это сладкие булочки). Невольно возникает вопрос: а не «бриоши» ли для нас ВС при острой нехватке «черного хлеба» — элементарного умения экономить энергию?

4. Мечта о ВС возникла, скорее всего, одновременно с открытием самой сверхпроводимости. Едва ли стоит сомневаться в том, что о высокой критической температуре грезил и сам Камерлинг-Оннес, и его последователи. Однако в серьезной научной постановке проблема ВС появилась гораздо позднее.

Четверть века назад, в 1964 году, американец У. Литтл и советский академик В.Л. Гинзбург рассмотрели специальный механизм объединения электронов сверхпроводника в пары, обещающий значительный рост критической температуры. Новый механизм сверхпроводимости вызвал первоначально значительный интерес к проблеме ВС у многих ученых. Появилось немало теоретических работ, в которых эта идея углублялась и развивалась. Начались и экспериментальные исследования (впрочем, их главным итогом было появление новых направлений на стыке физики и химии, развивавшихся уже вне всякой связи с ВС). Однако не произошло главного: идея ВС не овладела массами. Неоднократные призывы энтузиастов (в первую очередь, самого Гинзбурга) развернуть широким фронтом исследования по ВС, сконцентрировав усилия физиков, химиков и материаловедов на поиске высокотемпературных сверхпроводников, оставались без ответа.

Более того, у специалистов сложился со временем устойчивый стереотип прохладного, а зачастую и откровенно отрицательного отношения к ВС. Большинство не верило в реальность соответствующей программы, а были и такие, кому почему-то ужасно не хотелось, чтобы она была осуществлена. Два весьма крупных и авторитетных специалиста даже доказали специальную теорему о принципиальной невозможности ВС (и автору этих строк пришлось немало потрудиться для ее опровержения). В общем, к середине 70-х годов образовался своего рода бозеконденсат почти всеобщего скепсиса и неверия в программу ВС. (Смешно сказать, но членов небольшого коллектива (куда входил и автор), занимавшегося проблемой ВС уже долгие годы,

радовала даже моральная поддержка со стороны писателя Хейли (см. эпиграф к этой статье).)

Нужно ли после этого удивляться, что открытие ВС произошло неожиданно и оказалось во многих отношениях случайным. Материалы, обнаружившие ВС, были вне поля зрения большинства специалистов (хотя еще за десять лет до открытия ВС появился сигнал о том, что сложные структуры типа оксокупратов могут иметь относительно высокую критическую температуру). В известном смысле случайными фигурами были авторы открытия, пришедшие в физику сверхпроводимости из другой области (хотя, может быть, это как раз закономерно: Мюллер и Беднорц не испытали на себе воздействия общего настроения специалистов). Случайной оказалась и дата открытия: еще в конце 70-х годов химики разных стран синтезировали оксокупраты нужного состава и даже измеряли зависимость их сопротивления от температуры (но, не помышляя о сверхпроводимости, работали при слишком высокой температуре). Такие исследования велись, например, в нашей стране, во Франции. (Еще в конце 60-х годов автор, находясь под впечатлением информации об организации на западе работ по химиотерапии рака, предложил создать специальную службу по проверке на сверхпроводимость каждого нового класса материалов, вводимого в оборот науки. Это предложение поддержано не было — как по материальным и организационным причинам, так и из-за нежелания делать «тупую» работу. Между тем, будь оно реализовано, открытие ВС не запоздало бы почти на десятилетие, а создатели оксокупратов не упустили бы верной Нобелевской премии.)

Если роль научного общественного мнения в истории ВС действительно такова, как это описано выше, то причины возникновения этого феномена бесспорно заслуживают изучения. Поскольку здесь играли роль и объективные, и чисто психологические факторы, соответствующим анализом должны заняться, помимо физиков и химиков, также историки науки, психологи, а может быть, и пишущие о науке «инженеры человеческих душ».

Во всяком случае, уже сейчас из истории ВС можно извлечь один нравственный урок. Несомненно, что в формировании научной атмосферы особая роль принадлежит крупным и авторитетным ученым. Никто, конечно, не пытается отнять у них право иметь свое мнение о реальности научной программы, верить или не верить в ее осуществимость. Однако, чем выше потенциальная важность программы и чем крупнее имя ученого, тем большую моральную ответственность он должен чувствовать

(и тем большую щепетильность проявлять) при высказывании своего мнения. Слава Богу, наши учителя оставили нам достаточно примеров подлинно интеллигентного отношения к новым идеям (автор имеет в виду прежде всего школу теоретической физики Мандельштама — Тамма, к которой принадлежит сам).

Нельзя забывать, что ситуация, подобная истории ВС, может повториться — могут возникнуть новые научные программы, реальность которых (при их заведомой потенциальной важности) заранее не очевидна, хотя и не может быть опровергнута. Что делать авторам такой программы, если они не имеют ресурсов для ее реализации и не смогли преодолеть предубеждений своих коллег? Ждать, как раньше, пока подобная программа начнет осуществляться за рубежом, а потом со всех ног догонять, как это и произошло с ВС? Стараться, как и раньше, доказать, что программа имеет особо важное стратегическое значение, в надежде заинтересовать соответствующие богатые ведомства?

Хочется надеяться на то, что наше перестроенное общество выработает такой механизм моральной, организационной и материальной поддержки подобных программ, действие (или бездействие) которого будет определяться не эмоциями и настроениями определенного круга лиц, а объективной оценкой серьезности соответствующих предложений.

ПЛАЗМА — ЧЕТВЕРТОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА

Л. Арцимович

Пусть в замкнутом сосуде, сделанном из очень тугоплавкого материала, находится небольшое количество какого-либо вещества. Начнем подогревать сосуд, постепенно повышая его температуру. Если первоначально вещество, содержащееся в сосуде, было в твердом состоянии, то при возрастании температуры оно в некоторый момент начнет плавиться, а при еще более высокой температуре испарится, и образовавшийся газ равномерно заполнит весь объем. Когда температура достигнет достаточно высокого уровня, все молекулы газа (если это молекулярный газ, как например водород, азот или кислород) продиссоциируют, т.е. распадутся на отдельные атомы. В результате внутри сосуда будет содержаться газообразная смесь элементов, из которых состоит вещество. Атомы этих элементов будут быстро и беспорядочно двигаться, испытывая время от времени случайные столкновения между собой.

Средняя скорость хаотического теплового движения атомов растет пропорционально квадратному корню из абсолютной температуры газа. Она тем больше, чем легче газ, т.е. чем меньше атомная масса вещества. Величину средней скорости v можно найти с помощью следующей формулы:

$$v = 1,3 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{T}{A}},$$

где T — абсолютная температура и A — атомная масса вещества. Из формулы следует, например, что при $T = 1000$ К средняя скорость атомов водорода составит около $4 \cdot 10^3$ м/с, а средняя скорость атомов ртути — всего лишь $3 \cdot 10^2$ м/с.

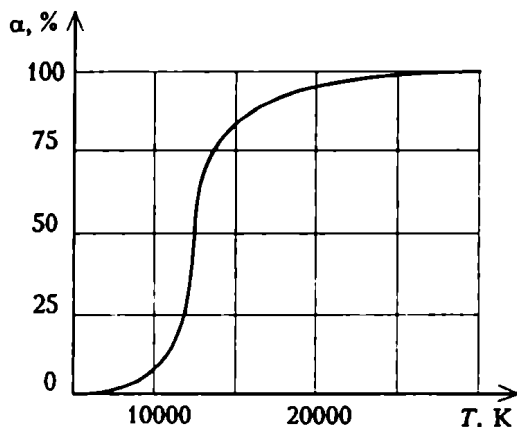
Из книги Л.А.Арцимовича «Элементарная физика плазмы», изданной в 1969 году. Опубликовано в «Кванте» в 1974 году.

Изменяя температуру от наиболее низкого уровня, соответствующего технике глубокого охлаждения (несколько кельвинов), до нескольких тысяч градусов, мы можем заставить практически любое вещество пройти через все три состояния — твердое, жидкое и газообразное. Естественно возникает вопрос: как будут изменяться свойства вещества, если нагревание продолжится дальше и температура выйдет за пределы нескольких тысяч градусов? Конечно, при очень высокой температуре изображаемую нами картину нагревания вещества в тугоплавком сосуде можно представить только теоретически, так как предел термической стойкости даже самых тугоплавких материалов сравнительно невелик — не более 3000–4000 К. Однако это практическое возражение не снимает вопроса о том, как будет вести себя вещество при непрерывном повышении его температуры. Поэтому мы не будем пока отказываться от принятой простой схемы. Допустим, что стенки сосуда обладают волшебной способностью противостоять сколь угодно высокой температуре, не разрушаясь и не испытывая никаких изменений. В таком случае уже при 3000–5000 К мы сможем заметить первые признаки появления новых процессов, которые будут связаны с изменением свойств самих атомов вещества.

Как известно, каждый атом состоит из положительно заряженного ядра, в котором сосредоточена почти вся масса атома, и электронов, вращающихся вокруг ядра и образующих в совокупности так называемую электронную оболочку атома. Эта оболочка и в особенности ее внешний слой, содержащий электроны, сравнительно слабо связанные с атомным ядром, обладают довольно хрупкой структурой. При столкновении атома с какой-либо быстро движущейся частицей один из внешних электронов может быть оторван от атома, который превратится в положительно заряженный ион. Именно этот процесс ионизации и будет наиболее характерным для рассматриваемой стадии нагревания вещества. При достаточно высокой температуре газ перестает быть нейтральным: в нем появляются положительные ионы и свободные электроны, оторванные от атомов.

С увеличением температуры относительная доля ионов и электронов в этой смеси очень быстро возрастает. В условиях, когда нагретое вещество находится в тепловом равновесии с окружающей средой (в нашем случае — со стенками воображаемого идеального сосуда) при температуре в несколько десятков тысяч градусов, подавляющая часть атомов в любом газе ионизирована и нейтральные атомы практически отсутствуют.

Кривая на рисунке показывает, как должна расти с температурой относительная доля ионизированных атомов в водороде. По оси абсцисс отложена абсолютная температура, по оси



ординат — отношение числа положительных ионов к числу нейтральных атомов, первоначально имевшихся в газе (в процентах). Степень ионизации α зависит не только от температуры, но и от плотности газа (хотя и не так сильно). Поэтому для определенности отметим, что рисунок относится к тому случаю, когда в 1 см^3 газа полное число положительных ионов и нейтральных атомов равно $7 \cdot 10^{16}$. При комнатной температуре газ с такой плотностью будет иметь давление, близкое к 1 мм рт. ст. При $T = 10000 \text{ K}$ число ионизированных атомов меньше 10% общего числа атомов водорода, тогда как при $T = 30000 \text{ K}$ на $2 \cdot 10^4$ положительных ионов (протонов) приходится всего лишь один нейтральный атом.

Электронная оболочка атома водорода содержит только один электрон, и поэтому с потерей электрона ионизация заканчивается. В атомах других элементов электронная оболочка имеет более сложную структуру. В ее состав входят электроны, обладающие разной степенью связи с атомом в целом. Электроны, принадлежащие к внешним слоям оболочки, отрываются сравнительно легко. Как уже говорилось выше, при температуре порядка 30000 K почти не должно оставаться нейтральных атомов. Однако отсюда не следует, что процесс ионизации закончился, так как положительные ионы в упомянутой области температур сохраняют значительную часть своего «электронного одеяния».

Чем больше порядковый номер элемента в периодической системе Менделеева, тем больше число электронов в атоме и тем прочнее связаны электроны внутренних слоев оболочки с атомным ядром. Поэтому окончательная ионизация атомов таких тяжелых элементов происходит только при очень высоких температурах — миллионы или даже десятки миллионов градусов. Отметим, что в тяжелом газе при окончательной ионизации на каждый положительный ион будет приходиться столько же свободных электронов, сколько их первоначально находилось в связанном состоянии в атоме. При этом газ в целом остается нейтральным, так как процессы ионизации сами по себе не создают избытка в зарядах того или другого знака.

Газ, в котором значительная часть атомов или молекул ионизирована, называется плазмой. Это название было предложено в 1923 году американскими физиками Ленгмюром и Тонксом. Плазма — нормальная форма существования вещества при температуре порядка 10000 К и выше. Вместе с тем это и наиболее распространенное состояние вещества в природных условиях. Солнце и все звезды представляют собой не что иное, как гигантские сгустки высокотемпературной плазмы. Верхний слой атмосферной оболочки Земли также образован из плазмы — это так называемая ионосфера.

Для того чтобы подойти к понятию плазмы, мы воспользовались весьма простой идеей о нагревании вещества в некотором идеальном сосуде. Однако практически это совсем не лучший и уж, во всяком случае, не самый легкий метод получения плазмы. Как в лабораторных опытах, так и в технике для получения плазмы используются различные виды электрических разрядов в газах. При электрическом разряде через газ проходит ток. Носителями этого тока являются электроны и ионы, которые образуются в результате ионизации газа. Самый процесс ионизации неразрывно связан с прохождением тока. Только благодаря наличию тока в газе все время возникают новые ионы и электроны, и поэтому степень ионизации поддерживается на определенном уровне. Будь то молния, электрическая дуга, разряд в рекламной трубке или люминесцентной лампе — во всех случаях мы имеем дело с явлениями, разыгрывающимися в сильно ионизированной плазме.

Вместе с тем между плазмой, образовавшейся при нагревании вещества заодно с сосудом, в котором оно находится, и плазмой газового разряда имеется одно существенное различие. Плазма газового разряда не является в термическом (тепловом) отношении равновесной. Она нагревается изнутри за счет энер-

гии, выделяющейся при прохождении тока, и охлаждается с поверхности вследствие контакта с холодными стенками газоразрядного прибора или с окружающими слоями обычного газа. Плазма, образующаяся при интенсивных газовых разрядах, может иметь во много раз более высокую температуру, чем металл, стекло или нейтральный газ, которые ее окружают. Кроме того, такая плазма термически неравновесна еще в одном отношении — она состоит из смеси нескольких компонент, неодинаково нагретых. Одной из этих компонент являются электроны, другой — положительные ионы и третьей — нейтральные атомы. Они так же равномерно перемешаны между собой, как кислород и азот в атмосфере. Но в противоположность обычной газовой смеси, все частицы которой независимо от их принадлежности к той или другой составляющей имеют одинаковые средние кинетические энергии беспорядочного теплового движения, у электронов, ионов и нейтральных атомов плазмы газового разряда эти энергии различны. Электроны, как правило, обладают гораздо более высокими энергиями, чем ионы, а кинетическая энергия ионов может превышать энергию нейтральных атомов и молекул. Поэтому можно сказать, что плазма представляет собой смесь компонент с различными температурами.

Как известно, средняя величина кинетической энергии E частиц газа, участвующих в беспорядочном тепловом движении, связана с температурой T следующей простой формулой:

$$E = \frac{3}{2} kT,$$

где k — постоянная Больцмана. Из-за различия в величине средней кинетической энергии электронов, ионов и нейтральных частиц в плазме вместо одной общей температуры следует различать три разные температуры — электронную T_e , ионную T_i и атомную T_a . Обычно $T_e \gg T_i > T_a$. Очень большое различие между T_e и T_i , характерное для большинства форм газового разряда, обусловлено громадной разницей в массе электронов и ионов. Внешние источники электрической энергии, с помощью которых создается и поддерживается газовый разряд, передают энергию непосредственно электронам плазмы, так как именно легкие электроны являются основными носителями тока. Ионы приобретают свою энергию благодаря столкновениям с быстро движущимися электронами. Однако при каждом отдельном столкновении из-за большого различия в массе легкий электрон передает иону лишь небольшую часть своей кинетической энер-

гии, отскакивая от него как шарик для пинг-понга, ударившийся о массивный стальной шар.

Простой анализ, основанный на применении законов сохранения энергии и импульса, показывает, что если тело малой массы m_1 сталкивается упруго с телом во много раз большей массы m_2 , то относительная доля кинетической энергии, которую легкое тело в состоянии передать тяжелому, не может превысить $4m_1/m_2$ (попробуйте доказать это сами). Отношение массы электрона к массе иона равно $1 : 1840 A$, где A — атомная масса вещества, которому принадлежат ионы. Следовательно, наибольшая относительная величина передаваемой в одном соударении энергии составляет всего лишь около $2 \cdot 10^{-3}/A$. Поэтому электрон должен испытать очень много столкновений с ионами для того, чтобы полностью отдать имеющийся у него излишек энергии.

Поскольку параллельно процессам, при которых происходит обмен энергиями между электронами и ионами, идет процесс приобретения энергии электронами от источников электрического тока, питающего разряд, в плазме все время поддерживается большой перепад температур между электронами и ионами. Так, в упоминавшихся выше газоразрядных приборах (рекламные трубки, лампы дневного света, ртутные выпрямители и т.д.) T_e обычно лежит в пределах нескольких десятков тысяч градусов, в то время как T_n и T_a , как правило, не превышают одной — двух тысяч градусов. При дуговом разряде, который используется для электросварки, электронная и ионная температуры ближе друг к другу вследствие того, что в этом случае разряд происходит в газе с большей плотностью и частые столкновения между электронами и ионами быстро выравнивают температуры. Однако и здесь T_e все же больше T_n (T_e порядка нескольких десятков тысяч градусов, а T_n и T_a около 6000 K).

Заметим, что при некоторых специальных условиях в сильно ионизированной плазме ионная температура может значительно превысить электронную. Например, при кратковременных электрических разрядах очень большой мощности в экспериментальных установках, предназначенных для исследования способов генерации управляемых термоядерных реакций.

Теперь несколько уточним общие представления о плазме и ее основных характеристиках. Плазма, т.е. ионизированный газ, может обладать довольно сложным составом. Даже в том случае, если плазма образуется в результате ионизации химически простого газа, например азота, кислорода или паров ртути, ее

ионная компонента будет содержать ионы различных сортов — с одним, двумя, тремя или более элементарными зарядами. Следует отметить, что кроме атомарных ионов могут присутствовать молекулярные ионы, а также нейтральные атомы и молекулы. Каждый из них будет характеризоваться своей концентрацией n и температурой T .

В простейшем случае, когда все ионы — однозарядные и атомарные, а нейтральная составляющая состоит из атомов, в плазме будут присутствовать всего три компоненты: электроны, ионы и нейтральные атомы. (Такие условия создаются, например, при интенсивных разрядах в водороде, дейтерии или тритии.) При этом концентрация ионов n_i приблизительно равна концентрации электронов n_e . В более общем случае, когда в плазме присутствуют однозарядные ионы с концентрацией n_1 , двухзарядные с концентрацией n_2 , трехзарядные с концентрацией n_3 и т.д., можно записать следующее приблизительное равенство:

$$n_e = n_1 + 2n_2 + 3n_3 + \dots$$

Такое соотношение между концентрациями отрицательных и положительных зарядов говорит о том, что плазма в целом квазинейтральна, т.е. в ней нет заметного избытка зарядов какого-то одного знака. На этом свойстве плазмы нужно остановиться несколько подробнее, так как оно имеет существенное значение.

Возникает естественный вопрос: с какой степенью точности в ионизированном газе должно соблюдаться условие квазинейтральности? Каким бы путем ни происходила ионизация, заранее совсем не очевидно, что положительных и отрицательных зарядов должно быть поровну. Так, из-за различия в скоростях движения электронов и ионов первые могут с большей легкостью покидать объем, в котором они возникли. Поэтому если первоначально и образуется одинаковое число зарядов противоположных знаков, то из-за быстрого исчезновения электронов, погибающих на стенках аппаратуры, внутри которой находится ионизированный газ, ионы, казалось бы, должны оставаться в значительно большем числе, т.е. ни о какой квазинейтральности не может быть и речи.

С другой стороны, нужно учесть, что при преимущественной утечке зарядов одного знака (электронов) в ионизированном газе немедленно образуется избыточный заряд другого знака, который способствует выравниванию потоков электронов и ионов и препятствует увеличению различия между концентраци-

ями частиц обоих знаков. Условия, при которых этот эффект будет достаточен для того, чтобы поддерживать квазинейтральность, можно разъяснить с помощью следующих соображений.

Допустим для простоты, что в ионизированном газе кроме электронов присутствуют только однозарядные ионы. Квазинейтральность означает, что n_e очень мало отличается от n_i . Как отразится на поведении отдельных частиц заметное отклонение n_e от n_i ? Очевидно, что все будет зависеть от того, насколько сильным окажется обратное влияние электрического поля, возникающего при таком отклонении, на движение заряженных частиц. Здесь сразу же выделяются два крайних случая. Если число заряженных частиц в объеме невелико, то создаваемые ими электрические поля слишком слабы для того, чтобы повлиять на их движение, даже если все поля складываются. В этом случае отдельные электроны и ионы в своем поведении никак не связаны друг с другом, и каждая из частиц движется так, как будто бы все другие отсутствуют. Следовательно, условие квазинейтральности и не обязано выполняться. Противоположный случай соответствует ионизированному газу с высокой концентрацией заряженных частиц, занимающему достаточно большой объем. В этом случае избыточные заряды, возникающие при сильном нарушении равенства между n_e и n_i , создают электрические поля, достаточные для выравнивания потоков и восстановления квазинейтральности.

В конечном счете все определяется соотношением между потенциальной энергией отдельного иона или электрона в электрическом поле, возникающем при нарушении квазинейтральности, и кинетической энергией частиц, связанной с их тепловым движением. Если потенциальная энергия, соответствующая заметному отклонению n_e от n_i , будет значительно превышать величину kT_e , которая является мерой энергии теплового движения электронов, то условие квазинейтральности будет соблюдаться с достаточно хорошей точностью. Анализируя это соотношение более детально, можно прийти к количественному критерию, характеризующему условия, при которых квазинейтральность сохраняется:

$$r \gg 5 \sqrt{\frac{T_e}{n_e}}. \quad (*)$$

Здесь r — линейный размер области, занятой ионизированным газом, например — радиус сферической колбы, в которой этот газ находится. Появление величины r нетрудно разъяснить. При заданной концентрации заряженных частиц создаваемый ими

потенциал, а следовательно, и потенциальная энергия отдельной частицы зависят от размеров области, в которой находятся эти частицы. Поэтому данный размер должен обязательно входить в формулу, выражающую условие квазинейтральности. Величина $5\sqrt{T_0/n_0} = r_D$ носит название дебаевского радиуса (по имени немецкого физика Дебая).

Согласно условию (*), если размеры области, занимаемой ионизированным газом с заданной концентрацией n_0 и электронной температурой T_0 , значительно превосходят r_D , то внутри этой области $n_+ \approx n_-$. В этом случае при сильном отклонении n_+ от n_- образующееся электрическое поле будет выталкивать частицы одного знака (присутствующие в избытке) и задерживать уход частиц другого знака. Такой механизм, автоматически поддерживающий равенство n_+ и n_- , перестает действовать в случае, когда $r \ll r_D$. В объемах с линейными размерами, значительно меньшими, r_D , электрические поля, возникающие при отклонении n_+ от n_- , будут слишком малы, чтобы оказать заметное влияние на движение отдельных частиц.

Теперь можно вложить более определенный смысл в понятие «плазма». До той поры, пока мы имеем дело с относительно небольшим числом заряженных частиц, которые не в состоянии создать достаточно сильное поле для того, чтобы оно могло существенно сказаться на поведении каждой из частиц, не имеет смысла говорить о наличии какого-то нового состояния вещества. Плазма же соответствует такому состоянию, когда число электронов и ионов настолько велико, что даже небольшое смещение электронной компоненты по отношению к ионной оказывается невозможным из-за сильных электрических полей, возникающих при нарушении равенства между n_+ и n_- . Таким образом, ионизированный газ имеет право называться плазмой в том случае, если условие (*) выполнено с достаточным запасом.

Нужно подчеркнуть, что квазинейтральность плазмы соблюдается только в пределах достаточно больших объемов. Если выделить внутри плазмы куб со стороной x , значительно меньшей r_D , то в пределах этого куба число ионов может значительно отличаться от числа электронов. Чем меньше отношение x/r_D , тем больше может быть различие между величиной отношения n_+/n_- и единицей.

*Надо подумать о беззредном свете
гниющих деревьев и светящихся чер-
вей. Затем надо написать, что свет
и теплота не всегда взаимно связаны
и потому различествуют.*

М.В.Ломоносов

Удивительная эта вещь — свеча.

М.Фарадей. История свечи

«ТЕПЛЫЙ» СВЕТ И ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

С. Вавилов

Хорошо известно, что источнику света, до сего времени остающемуся господствующим, — электрической лампе накаливания — предшествовали многие тысячи лет развития и совершенствования. И все же с принципиальной стороны лампа накаливания мало отличается от первобытного костра. На обоих концах многотысячелетней эволюционной лестницы мы находим накалившееся твердое тело в качестве излучателя. В начале — это частицы твердого угля в пламени, в конце — накалившийся металл вольфрам. Различие заключается в температуре и в других важных и существенных, но не принципиальных подробностях.

Разберем сначала привычные источники «теплого» света. Вспыхивает спичка, давая на короткое время желтоватое пламя и свет. Температура пламени очень высокая, выше 1500 °С. При этом, если следить за горением спички более внимательно, вначале (по крайней мере, в некоторых сортах спичек) ясно заметно своеобразное резкое желтое свечение, такое же, как при введении в бесцветное газовое пламя поваренной соли. Когда пламя устанавливается, часть его, около ствола спички, имеет слабую голубую окраску. Однако основная часть пламени светится привычным для нас желто-оранжевым, «теплым» светом, зависящим от накаливания пылинок сажи, находящихся в пламени. В стеариновой свече мы встречаемся с той же картиной -- желто-оранжевым пламенем и слабо светящейся синей частью у фитиля; и здесь свет исходит, главным образом, от частиц угля, сосредоточенных в пламени и накалившихся до температуры выше 1500 °С. Мало чем в этом отношении отличаются керосиновая

Из книги С.И.Вавилова «О «теплом» и «холодном» свете», изданной в 1949 году. Опубликовано в «Кванте» в 1981 году.

лампа и даже электрическая лампа накаливания. В первых моделях ламп Лодыгина и Эдисона светилась угольная нить, накаливаемая током. В угольной лампе температура накала примерно на 100 – 200 градусов выше, чем в свечах и кострах. В современных вольфрамовых лампах накал доводится приблизительно до 2700 °С. По качеству излучаемого света эти лампы все же ближе к костру, чем к Солнцу. Температура Солнца близка к 6000 °С; до сих пор ни одно накаливаемое тело в практически приемлемых условиях не удалось довести до такого накала. Препятствием служит плавление металлов и их испарение. Вольфрам в этом отношении подходит больше всего (температура плавления около 3400 °С и малая испаряемость).

Даже при поверхностном наблюдении бросаются в глаза некоторые общие черты у самых разнообразных тепловых источников света — спички, свечи, лампы накаливания, Солнца. Одна из таких особенностей состоит в следующем. Источник при одной и той же температуре светит тем ярче, чем темнее, чернее светящееся тело. Например, при одной и той же температуре прозрачное кварцевое стекло почти не светит, а кусок черного угля излучает весьма сильно. Чернота, так же как и белизна, конечно, не может возрастать безгранично; для нее существует предел, когда весь свет, какого угодно цвета, падающий на тело, без остатка в нем поглощается. Тело с такими свойствами называют абсолютно черным телом. Осуществить такое тело с большим приближением к требуемым условиям не очень трудно. Всем хорошо известно, что если в яркий солнечный день, когда кругом все светится и блестит, посмотреть издали через открытое окно или дверь вглубь закрытого помещения, то внутренние части кажутся угольно-черными, несмотря на то, что комнаты могут быть побелены или оклеены светлыми обоями. Происходит это потому, что лучи света, проникнув внутрь комнаты через окно, неизбежно там поглощаются вследствие многих рассеяний и отражений и наружу не выходят.

Отсюда становится понятным, как построить абсолютно черное тело: его можно изготовить из любого материала — угля, железа, белого фарфора и пр., если устроить некоторое замкнутое пространство с маленьким отверстием.

Абсолютно черное тело можно нагреть до высокой температуры, например до накаливания, и поддерживать нагрев постоянным. Внутри полости тела со стенок будет излучаться свет, который должен вновь поглощаться на стенках. Наше тело — абсолютно черное, поэтому поглощение у него, по условию, максимальное, т.е. полное. Но в то же время мы приняли меры

к тому, чтобы температура тела была постоянной, поэтому максимальное поглощение должно возмещаться максимальным излучением, иначе температурное равновесие нарушится, тело нагреется.

Таким образом, мы приходим к выводу, что не только поглощение, но и излучение абсолютно черного тела должно быть максимальным. Вместе с тем, из этого же рассуждения следует, что излучение, поскольку оно максимальное, так же как и поглощение, не может зависеть от материала, из которого сделано тело. Заключение это имеет огромное теоретическое значение. В нем и кроется причина большого сходства самых разнообразных тепловых источников света. Костер, спичка, Солнце, лампочка накаливания по своим свойствам — достаточно «черные», они близки к абсолютно черному телу. Разница в значительной мере сводится к тому, что температура Солнца равна примерно 6000 °С, а спички — около 1500 °С. Если температура низкая, тело не может светиться за счет нагревания заметным видимым светом, оно будет излучать, главным образом, невидимые инфракрасные лучи с длинными волнами. При повышении нагрева тело начинает испускать темно-красный цвет. При дальнейшем возрастании температуры излучение становится оранжевым, желтым и, наконец, белым. С качественной стороны это одинаково справедливо как для абсолютно черного тела, так и, например, для лампы накаливания.

Нужно, однако, сделать одно важное замечание. Полное тело с небольшим отверстием полностью поглощает всякие лучи, любого цвета, с любыми длинами волн. Но существуют тела (конечно, не имеющие вида полости), полностью поглощающие только лучи определенного цвета, с определенной длиной волны: Такие тела можно назвать также абсолютно черными, но только в отношении некоторых длин волн. Рассмотрим, например, спиртовое пламя или газовое пламя в кислороде. Они почти бесцветны, хотя и имеют высокую температуру. Внесем в такое пламя немного обыкновенной столовой соли. Пламя приобретает резкую желтую окраску, такую же, какую имеют, как уже говорилось, некоторые спички в самом начале горения. В среднем пламя при этом остается прозрачным; вместе с тем оно начинает очень сильно поглощать свет в узкой области световых волн, в желтой части спектра; здесь оно становится абсолютно черным. Именно потому оно и светится.

Для большего пояснения этого существенного обстоятельства рассмотрим еще один интересный опыт. Химические элементы, называемые редкими землями, такие как неодим, празеодим,

самарий и т.д., при введении их в стекло или кварц дают в спектре очень тонкие сильные полосы поглощения. Можно приготовить тонкую палочку или нитку из стекла или кварца с несколькими редкими землями. Если накалить такую палочку и посмотреть на нее в спектроскоп, то окажется, что светится только несколько тонких линий, как раз отвечающих поглощению редких земель; остальные части спектра — темные, так как само стекло или кварц в видимой части света не поглощают и потому при накаливании не светятся. Описанная стеклянная палочка стала «черной» только в отдельных узких спектральных областях.

Сказанное позволяет теперь объяснить ранее упоминавшиеся особенности горения спички и свечи. Яржжелтая вспышка в начальной стадии горения у некоторых сортов спичек объясняется присутствием в головке спички ничтожного количества натрия, быстро, впрочем, выгорающего. Причина слабого синего свечения у ствола спички и фитиля свечи может быть объяснена тем, что в этих частях пламени еще не образовалась сажа. Здесь газ, обладающий некоторым поглощением в синей части спектра, светится свойственным ему тепловым излучением синего цвета. Как только начинает выделяться сажа, это слабое свечение перекрывается тепловым излучением накалиной сажи.

Таким образом, привычный оранжево-белый «тепловой тон» свечения костров и ламп накаливания — вовсе не обязательный признак того, что перед нами тепловой источник света. Тепловой источник может давать свет, сосредоточенный в отдельных линиях и полосах вовсе не «теплого», например синего, тона, и тем не менее оставаться тепловым.

Понятие о тепловом равновесном излучении было введено выше из рассмотрения абсолютно черного тела. В окружающем нас мире много, однако, тел, заведомо не абсолютно черных даже в узкой области спектра. Все тела (если не придавать им искусственно формы полости с малым отверстием) в какой-то мере отражают, рассеивают и пропускают часть падающего на них света и поэтому не могут быть абсолютно черными. Такие тела всегда, однако, можно нагреть и поддерживать их температуру постоянной. Наше собственное тело, как известно, нагрето и имеет в нормальных условиях довольно постоянную температуру. Должно, следовательно, существовать равновесие между излучением и поглощением света. Обозначим буквой a долю падающего света, которая поглощается рассматриваемым телом. Обозначим через E_0 энергию излучения абсолютно черного тела при той же температуре, которую имеет рассматриваемое тело,

а через ε — энергию, излучаемую в действительности телом. Тогда из условия равновесия между излучением и поглощением для рассматриваемого тела должно обязательно следовать

$$E = aE_0, \quad (*)$$

так как поглощаемая энергия равна aE_0 ; в этом важном законе необходимо помнить, что все входящие в него величины (a , E и E_0) относятся к определенной длине волны света λ и к определенной температуре T . Иными словами, написанный закон можно выразить так: отношение тепловой излучательной способности любого тела к его поглощательной способности (для данных λ и T) равно излучательной способности абсолютно черного тела (для тех же λ и T).

Исходя, таким образом, из самых общих представлений о телах (именно — предполагая, что они в той или иной степени могут поглощать свет и находиться при этом при постоянной температуре), мы приходим к выводу, что любое тело — твердое, жидкое, газообразное — обязательно должно испускать тепловое излучение, если только оно находится в тепловом равновесии при температуре выше абсолютного нуля. В зависимости от степени нагрева этот свет будет видимым или невидимым.

Как уже указывалось выше, можно легко доказать, что не может существовать тело, излучение которого превышало бы излучение абсолютно черного тела при той же температуре. В этом смысле абсолютно черное тело — лучший, самый совершенный тепловой излучатель, и Фарадей в приведенных в эпиграфе словах имел основание удивляться обычной свече, свойства которой довольно близки к свойствам абсолютно черного тела, не говоря уже о ее практических преимуществах.

Такое «совершенство» абсолютно черного тела и близких к нему свечей и ламп накаливания, впрочем, очень относительно и условно. Дело в том, что все тепловые излучатели крайне неэкономичны в обычном техническом смысле слова; они превращают в видимый свет только ничтожную часть потребляемой энергии. Для абсолютно черного тела, находящегося при 2000°C , всего лишь 0,3% энергии переходит в видимый свет; при температуре 3000°C коэффициент полезного действия поднимается до 3%. Выгоднее всего абсолютно черное тело должно работать около 6000°C , т.е. при температуре Солнца. Причина этого, на первый взгляд удивительного, совпадения состоит в том, что человеческий газ биологически, в процессе развития, приспособился к солнечному свету, и поэтому свет от теплового излучателя с солнечной температурой наиболее экономичен. Однако

экономичность даже этого самого выгодного абсолютно черного тела невелика: коэффициент полезного светового действия составляет приблизительно 13%, т.е. 87% всей потребляемой источником энергии для глаза бесполезны. Для наиболее экономичных современных ламп накаливания мощностью 100 Вт коэффициент полезного светового действия составляет всего 2 – 3%.

Естественно возникает вопрос: почему нельзя превратить всю энергию, сообщаемую абсолютно черному телу, или, во всяком случае, значительную ее часть в видимый свет? Что ставит этому границы?

Ответ на этот вопрос физикам удалось получить нелегко; для этого пришлось произвести, в сущности, целую революцию в науке, потребовалось отказаться от многого общепринятого, считавшегося непреложной истиной.

Если абсолютно черное тело остается постоянно при одной и той же температуре и в то же время излучает свет, то, следовательно, вся непрерывно подводимая к телу энергия превращается в излучение. Только ничтожная доля этого излучения видима, остальная часть сосредоточена, главным образом, в области невидимых инфракрасных лучей с меньшими частотами световых колебаний (с большими длинами волн), чем у видимого света. Подводимая энергия, превращаясь в свет, распределяется между различными волнами, создавая непрерывный спектр теплового излучения. Процесс происходит подобно превращению механической или электрической энергий в тепло. При этом молекулы вещества приходят в поступательные, колебательные и вращательные движения с разнообразными скоростями, распределяясь по непрерывному закону. Такое распределение осуществляется посредством беспорядочных столкновений молекул друг с другом. Число молекул в данном объеме конечное, и, применяя обычные правила статистического расчета, можно определить наиболее вероятную среднюю энергию молекул и закон распределения энергии по молекулам.

До конца XIX века общепринятым в науке было мнение, что свет есть волновое движение среды, заполняющей пространство. Но если свет действительно таков, то, в отличие от частиц вещества, число которых в ограниченном объеме конечно, должно существовать бесконечное число возможностей распределения световой энергии по световым волнам при условии равновесия в тепловом излучении.

В самом деле, поскольку излучение абсолютно черного для всех длин волн тела не может зависеть от природы вещества, из

которого изготовлено тело, в спектре его не может быть никаких характерных линий или полос, должны присутствовать все частоты колебаний — от очень малых до очень больших в непрерывном чередовании. При этом, с точки зрения классической волновой теории света, все частоты равноправны и не имеют никаких преимуществ одна перед другой. А это значит, что на каждый бесконечно малый участок частот в спектре в среднем должна в условиях равновесия приходиться одна и та же бесконечно малая доля энергии.

Ясно, с другой стороны, что по мере того как мы будем переходить от малых частот к большим, принципиально — к бесконечно большим, мы будем встречать все большее число бесконечно малых участков частот, на каждый из которых приходится одна и та же бесконечно малая доля энергии излучения. Иными словами, с точки зрения классического волнового учения о свете в условиях теплового равновесия, энергия излучения обязательно должна непрерывно расти при передвижении по спектру от красной к фиолетовой части. Этот вывод, между тем, самым решительным образом расходится с опытом. В действительности во всех тепловых источниках, начиная с абсолютно черного тела, имеется максимум излучения, который в случае температур ниже $4000\text{ }^{\circ}\text{C}$ находится в инфракрасной области спектра и только при дальнейшем нагревании передвигается постепенно в видимую (желтую, зеленую и т.д.) часть. В фиолетовой области, вопреки теоретическому выводу, энергия при привычных для нас температурах не возрастает, а, наоборот, резко падает. Такое противоречие опыта самым общим представлением о веществе и свете было справедливо названо физиками в свое время «фиолетовой катастрофой»; оно действительно обозначало необходимость полного отказа от многих установившихся воззрений, намечало целый переворот в естествознании.

На опыте получалось, что энергия распределяется по световым частотам примерно так же, как тепловая энергия распределяется по молекулам, т.е. имеется отчетливый максимум. Единственно возможное объяснение опыта (до известной степени подсказываемое аналогией с молекулами) состояло в следующем. Вопреки всем прежним воззрениям и несмотря на несомненный волновой характер распространения света в пространстве, приходится принять, что его энергия сосредоточена в некоторых центрах, что свет поглощается и излучается молекулами только в виде целых порций энергии, названных квантами. Величина энергии кванта не постоянна; она пропорциональна частоте световых колебаний ν . Коэффициент пропорциональности h

всегда один и тот же; он составляет весьма малую, но точно известную теперь величину, равную $6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Энергия кванта $h\nu$ совершенно ничтожна для радиоволн, где поэтому прерывное строение излучения практически не заметно; но квант приобретает все более ощутимые значения при переходе через видимый свет к лучам Рентгена. Здесь «зернистость» световой энергии проявляется вполне ясно и резко.

Почти за полвека после открытия квантов энергии были найдены бесчисленные другие доказательства их существования. В настоящее время это твердо установленная истина.

Представление о квантах световой энергии вполне объяснило свойства теплового излучения и дало возможность рассчитывать спектр излучения абсолютно черного излучателя для любых

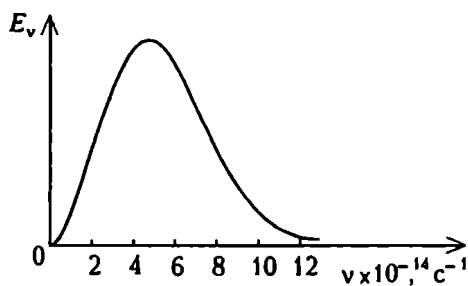


Рис. 1

температур. На рисунке 1 изображено вычисленное таким образом распределение энергии в спектре теплового излучения абсолютно черного тела для солнечной температуры 6000°C . Максимум изображенной кривой соответствует длине волны $0,483$ мкм, т.е. сине-зеленой области спектра.

На рисунке 2 в сжатом логарифмическом виде представлено распределение энергии в спектре абсолютно черного тела для громадного интервала температур, начиная от абсолютного нуля до 50000 К. По оси абсцисс отложены логарифмы длин волн в сантиметрах, по ординатам -- логарифмы величины, пропорциональной интенсивности излучения. Действительные длины волн указаны на нижней шкале в микронах. При таком изображении максимумы спектров излучения располагаются на прямой линии, как отмечено на рисунке пунктиром. Из этого рисунка сразу видно, например, что при температуре человеческого тела (около 310 К) максимум излучения абсолютно черного тела соответствует длине волны около 10 мкм в далекой невидимой инфракрасной

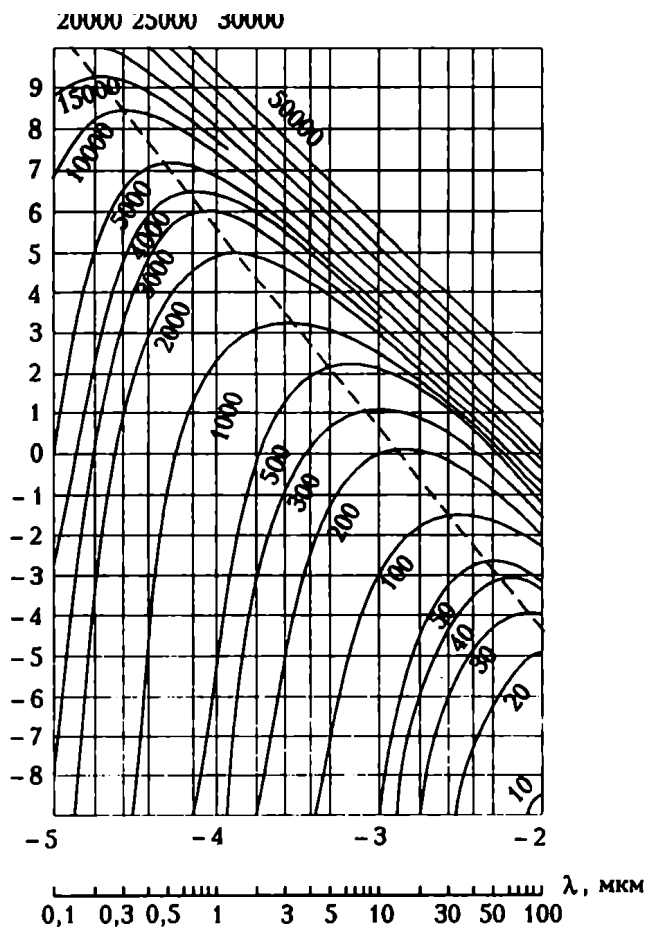


Рис. 2

части спектра. Максимум свечения при привычных для нас температурах тепловых источников (около 3000 К) отвечает примерно 1 мкм, т.е. также находится в невидимой инфракрасной области спектра.

Легко понять на основании закона (*), что для излучателей не черных, т.е. не полностью поглощающих падающий на них свет, спектральные кривые излучения расположатся ниже.

Только после того как удалось установить квантовый характер излучения и поглощения света, стал возможным ответ на первый вопрос, поставленный выше, — о причине малости коэффициента полезного светового действия тепловых излучате-

лей. До открытия квантов это оставалось, в сущности, неразрешимой задачей.

Теперь мы знаем, что при тепловом равновесии абсолютно черного тела средняя тепловая энергия его молекул, участвующая в тепловом обмене, и средняя энергия световых квантов, находящихся в энергетическом равновесии с молекулами, должны быть теми же самыми, иначе равновесие было бы нарушено. При этом надо иметь в виду, что энергия по спектру распределяется по обе стороны от указанного среднего значения. Как видно из рисунков 1 и 2, даже при самых выгодных условиях — при температуре, близкой к 6000°C , — когда максимум теплового излучения совпадает с максимумом спектральной чувствительности человеческого глаза, основная часть энергии излучения приходится на области меньшей или полностью отсутствующей видимости. В этом и кроется причина очень малой экономичности тепловых излучателей. В условиях теплового равновесия между излучением и телом нет возможности сосредоточить всю энергию на световых квантах, наиболее выгодных для глаза.

ВСЕЛЕННАЯ

Я. Зельдович

Как устроена Вселенная? Каково ее прошлое, настоящее и будущее?

Эти вопросы естественно появляются после того, как мы в общих чертах поняли, как устроена ближайшая наша окрестность — сначала земной шар, затем Солнце и вся Солнечная система, а потом и другие звезды, наша и другие галактики.

Космология — наука, исследующая Вселенную как целое, — пожалуй, самая трудная ветвь астрономии. За последние десятилетия достигнуты определенные успехи в понимании современного состояния и ряда этапов эволюции Вселенной. Эти успехи — результат работы многих людей, совместных усилий астрономов и физиков.

В настоящее время многое о Вселенной известно нам вполне достоверно. Перечислим основные факты.

1. Однородность Вселенной. Это значит, что Вселенная везде одинакова, но «однородность», «одинаковость» нужно понимать в определенном статистическом смысле. Поясню примером: воздух в сосуде однороден. В каждом кубическом сантиметре одинаково число молекул кислорода и одинаково число молекул азота. Если же взять очень маленькие объемы, например кубики с ребром $3 \cdot 10^{-7}$ см и объемом примерно 10^{-20} см³, то в них в среднем должна находиться одна молекула кислорода или азота. Значит, в каждый данный момент в каком-то одном или нескольких кубиках нет ни одной молекулы, в других — одна молекула N₂, в третьих — одна молекула O₂, а может быть и две или три молекулы, одинаковых или разных. Однородность же проявляется только тогда, когда мы рассматриваем достаточно большие объемы.

Опубликовано в «Кванте» в 1984 году.

Во Вселенной однородность проявляется в объемах (кубах) с характерным размером (ребром) больше 300 мегапарсеков (1 мегапарсек (Мпс) = 10^6 парсеков (пс) $\approx 3 \cdot 10^6 \cdot 10^{18}$ см = $3 \cdot 10^{24}$ см). Однородность Вселенной в масштабах 300 Мпс и больших означает, что в любом кубе с таким ребром, где бы его ни «поместить» во Вселенной, будет заключено приблизительно одинаковое количество скоплений галактик. Такие скопления представляют собой самые большие структурные единицы Вселенной и заменяют молекулы газа в приведенном выше примере. В масштабах же порядка 30 Мпс Вселенная неоднородна. Заметим, что масштабы ~ 300 Мпс значительно меньше того расстояния, до которого можно исследовать Вселенную современными телескопами.

2. Составные элементы Вселенной. Как мы уже сказали, самой большой структурной единицей является во Вселенной скопление галактик. Большие скопления содержат тысячи галактик, их линейные размеры достигают нескольких мегапарсеков. Входящие в скопления галактики состоят из сотен миллиардов звезд. Звезды же состоят из горячего газа, образованного атомными ядрами и электронами. Небольшая часть газа находится в пространстве между звездами. Если взять достаточно большой объем во Вселенной и поделить общее количество вещества в нем на объем, то получим среднюю плотность. Средняя плотность вещества во Вселенной заключена между 10^{-30} и 10^{-31} г/см³. Большой объем надо было взять для того, чтобы случайно не попасть на область, где вещества намного больше или меньше, чем в среднем.

Атомные ядра состоят, как мы знаем, из протонов и нейтронов (в свою очередь, протоны и нейтроны состоят из кварков, но это сейчас для нас несущественно). Среди ядер больше всего во Вселенной свободных протонов, т.е. ядер водорода — их примерно 70% от общего числа нуклонов (протонов и нейтронов). Около 15% протонов связаны в других ядрах, главным образом в ядрах гелия. И наконец, около 15% составляют нейтроны, также связанные в ядрах. Всего гелия во Вселенной приблизительно 25—28%. На ядра тяжелых элементов остается всего лишь около 2% нуклонов.

Плотность электронов (число штук в 1 см³) равна плотности протонов, так что электрические заряды их уравнивают друг друга. В среднем Вселенная электронейтральна. Протоны и нейтроны имеют приблизительно одинаковую массу $1,67 \cdot 10^{-24}$ г, масса электрона намного меньше — она равна $9,1 \cdot 10^{-28}$ г. Понятно теперь, что среднее (для больших объемов!) число

нейтронов и протонов в 1 см^3 можно оценить, поделив $(10^{-30} - 10^{-31}) \text{ г/см}^3$ на $1,67 \cdot 10^{-24} \text{ г}$. Оказывается, что в 1 см^3 во Вселенной в среднем $6 \cdot (10^{-7} - 10^{-8})$ нуклонов. Другими словами, один нуклон (протон или нейтрон) приходится в среднем на несколько кубических метров!

Подчеркнем еще раз, что внутри тех больших объемов, о которых мы говорили, вещество распределено крайне неравномерно. Например, в центре нашего Солнца плотность около 100 г/см^3 , что в $(10^{32} - 10^{33})$ раз больше средней. Существуют и гораздо более плотные звезды — плотность в центральных областях нейтронных звезд $\sim 10^{14} \text{ г/см}^3$. И в то же время между галактиками плотность вещества меньше средней.

3. Реликтовое излучение. Вселенная заполнена первичным радиоизлучением с длинами волн от 1 метра до 1 миллиметра. Это излучение называют еще реликтовым, потому что оно сохранилось от самых первых стадий эволюции Вселенной. Оно не связано с какими-либо источниками, например со звездами или с радиогалактиками.

Читатели «Кванта» знают, что излучение можно рассматривать как поток частиц — квантов электромагнитного поля, иначе их называют фотонами. Поэтому можно не только говорить о потоке и плотности энергии излучения, но и подсчитать число фотонов, находящихся в данный момент в единице объема. Оказывается, что это число велико — 500 фотонов в 1 см^3 . Средняя энергия фотона составляет $1,6 \cdot 10^{-22} \text{ Дж}$. Общая энергия всех фотонов в единице объема около $8 \cdot 10^{-14} \text{ Дж/м}^3$. Для сравнения со средней плотностью вещества во Вселенной выразим энергию фотонов через массу. Воспользуемся для этого формулой Эйнштейна $E = mc^2$. Тогда по порядку величины «фотонная плотность массы» равна 10^{-11} г/см^3 . (Говоря о массе фотона, мы имеем в виду определяемое формулой Эйнштейна соответствие массы и энергии; напомним, что масса покоя фотона равна нулю. Энергия фотона ϵ , его импульс p и масса μ связаны формулой: $\epsilon = \mu c^2 = cp$. Буквами E и m мы обозначаем в тексте соответственно суммарную энергию и массу всех фотонов в 1 см^3 .)

Вырисовывается любопытная картина: по числу штук фотонов гораздо больше, чем протонов, нейтронов и электронов. Если же вести подсчет плотности, т.е. массы в единице объема, то протоны и нейтроны в 100 или 1000 раз превосходят фотоны (излучение). Хочется сравнить ситуацию со слонами в лесу, где есть также муравьи: число слонов меньше числа муравьев, но они тяжелее, и общая масса всех слонов больше массы всех муравьев. Однако это сравнение неточное. Фотоны не муравьи, они не

сидают в муравейниках, они со скоростью света летают во всех направлениях и нигде не собираются в кучи или стаи — именно потому, что они «легкие»; протоны и нейтроны — «тяжелые», поэтому силы тяготения собирают их в плотные кучи — планеты, звезды, галактики.

Подсчет числа реликтовых фотонов совершается с помощью радиотелескопов. Технически это довольно трудная задача, так как на Земле есть много фотонов местного, земного и солнечного происхождения. Преодолев все эти трудности, радиоастрономы измерили общий поток фотонов реликтового излучения. Он оказался равным $1,3 \cdot 10^{12} \text{ (см} \cdot \text{с} \cdot \text{стер)}^{-1}$. Отсюда и была вычислена указанная выше концентрация реликтовых фотонов во Вселенной.

Есть основания считать, что кроме фотонов Вселенную пронизывают и другие частицы, в частности нейтрино и антинейтрино разных сортов. Если масса покоя нейтрино равна нулю, то их вклад в суммарную плотность примерно равен вкладу в плотность от излучения. Однако даже очень малая масса покоя одного из видов нейтрино (в 25000 раз меньше массы покоя электрона) радикально изменила бы наши представления о средней плотности вещества во Вселенной.

Современная физика уже вполне охотно приписывает нейтрино малую массу покоя, хотя и не дает определенного числа. В свою очередь астрономы приводят доводы в пользу того, что масса галактик и скоплений галактик больше массы содержащегося в них обычного вещества. Предполагается, что существует еще какая-то «скрытая» масса, которая обнаруживается только по той силе тяготения, которую она создает.

4. Эволюция Вселенной. Вселенная не остается все время в одном и том же состоянии — она эволюционирует. Об этом можно судить, измеряя скорость движения далеких галактик. Наблюдения показывают, что далекие галактики удаляются от нас со скоростью u , пропорциональной расстоянию r до них. Формула $\vec{u} = H\vec{r}$ выражает знаменитый закон Хаббла. Коэффициент пропорциональности H называется постоянной Хаббла и приблизительно равен 50 (км/с) / Мпс . Отметим здесь же, что название «постоянная» указывает в этом случае только на независимость H от величины и направления вектора \vec{r} . В то же время H зависит от времени.

Для того чтобы установить этот закон, нужно было научиться определять скорости движения галактик и расстояния, на которых они находятся.

Принцип определения скорости таков. Излучение галактик содержит спектральные линии, принадлежащие определенным

химическим элементам (вспомните, например, «желтую линию» натрия, которую вы видите, когда поваренная соль NaCl попадает в пламя газовой горелки). Законы физики везде одинаковы. Длина волны определенной линии в момент излучения $\lambda_{\text{изл}}$ одинакова на Земле и в любой самой далекой галактике. Если источник удаляется, то согласно эффекту Доплера покоящийся наблюдатель будет принимать излучение, смещенное к красному концу спектра, другими словами, длина волны для наблюдателя $\lambda_{\text{набл}}$ увеличится. Относительная величина смещения в космологии обозначается буквой z и определяется формулой

$$z = \frac{\lambda_{\text{набл}} - \lambda_{\text{изл}}}{\lambda_{\text{изл}}}.$$

Для случая, когда скорость u много меньше скорости света c , смещение $z = u/c$. В случае же, когда скорость u приближается к c , формула, связывающая u и z , становится более сложной, но нам она не потребуется. Понятно, что, измеряя смещение спектральных линий в спектрах небесных тел и галактик, можно вычислить их скорость удаления (так называют составляющую скорости, направленную вдоль «луча зрения»).

Эффект Доплера даст возможность не только измерять скорость удаляющихся от нас галактик, но «работает» и на автомобильных дорогах. Автоинспекторы вооружены специальным прибором — «пистолетом», измеряющим скорость приближающихся или удаляющихся автомашин. В отличие от космических объектов, автомашины сами не излучают, а лишь отражают электромагнитный импульс, испускаемый «пистолетом». Подумайте, как это влияет на величину эффекта Доплера?

А как же определить расстояния до галактик? Эта задача — одна из самых важных и самых трудных в космологии.

Говорят, что нужно иметь «стандартный метр» или «стандартную свечу». Это означает следующее. Если есть далекий объект с известным размером d («метр») и если можно измерить угол θ , под которым этот объект виден, то $d = r\theta$, а значит, $r = d/\theta$.

Представим себе другую возможность. Будем считать, что известна светимость удаленного объекта («свеча»). Пусть этот объект испускает L единиц энергии в секунду, тогда поток энергии от такого источника, падающий на единицу поверхности земного приемника, составляет $F = L/(4\pi r^2)$, откуда $r = \sqrt{L/(4\pi F)}$.

Астрономы, изучая и классифицируя сравнительно близкие к нам объекты, нашли среди них такие, светимость и размеры которых хотя бы приблизительно известны. Это позволило найти расстояния до аналогичных объектов, находящихся далеко.

Сопоставляя расстояния со смещениями спектральных линий, астрономы установили закон Хаббла и нашли постоянную H . С другой стороны, когда постоянная Хаббла H уже известна, измерение расстояния может быть сведено к определению скорости u (или смещения z). Разумеется, у нас нет никаких оснований думать, что мы занимаем какое-то выделенное положение во Вселенной. Естественно поэтому, что наблюдатель в любой другой галактике тоже увидит картину убегающих удаленных от него галактик. Относительная скорость любых двух галактик пропорциональна расстоянию между ними. Именно это утверждение следует из закона Хаббла (проверьте!).

5. Большой взрыв. Процесс разбегания галактик заключается в увеличении со временем расстояний между ними. Можно задать вопрос — когда это движение началось?

Определить момент, когда все галактики находились «в одном и том же месте» («в точке»), совсем просто, если предположить, что скорость u удаления от нас каждой галактики остается постоянной с течением времени. Достаточно для этого разделить сегодняшнее расстояние r на скорость u . Получим

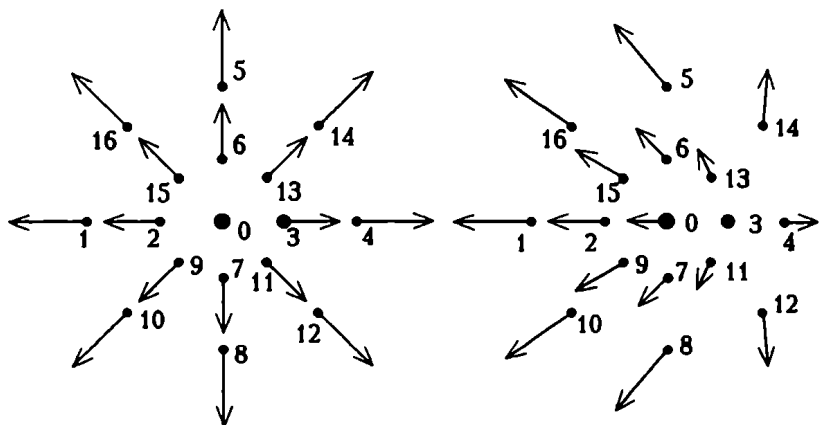
$$t = \frac{r}{u} = \frac{r}{Hr} = \frac{1}{H} = 20 \text{ млрд лет.}$$

Предположение о постоянстве u не противоречит закону Хаббла: хотя расстояние r увеличивается со временем, H , как уже упоминалось выше, тоже зависит от времени.

Более аккуратные рассуждения показывают, что скорость удаления каждой галактики к тому же уменьшается с течением времени. Причина этого в том, что галактикам приходится преодолевать силы тяготения, действующие на них со стороны остальных галактик. Это приводит к тому, что в действительности время, прошедшее с начала расширения (возраст Вселенной), оказывается ближе к $t_0 = \frac{2}{3} \frac{1}{H} \approx 13$ млрд лет. (Вычисляя возраст, мы подставляем в формулы сегодняшнее значение постоянной Хаббла H , раньше величина этой постоянной была больше.)

Итак, твердо установлено, что около 13 миллиардов лет тому назад произошел Большой взрыв. Более того, прослежена последовательность событий, начинающихся с расширения очень плотного вещества. Это вещество было и очень горячим, поэтому принято говорить о теории «горячей» Вселенной. Расширение сопровождается не только уменьшением плотности, но и понижением температуры. На основе известных нам законов физики можно надежно проследить, какие процессы происходили во Вселенной начиная с того момента, когда температура вещества

составляла около 10^{13} градусов, плотность была 10^{31} г/см³, давление 10^{51} Н/м² = 10^{48} атм. При этих условиях вещество представляло собой «суп» из всевозможных частиц и античастиц. «Тяжелые» частицы и античастицы в основном аннигилируют, «выживают» кванты электромагнитного излучения (фотоны) и нейтрино. Количество вещества в «супе» немного превосходило количество антивещества. Поэтому выживает и небольшое (по сравнению с фотонами и нейтрино) количество протонов, нейтронов и электронов. Выжившие нейтроны с частью протонов соединяются в ядра гелия. Гораздо позже (через примерно 300 000 лет) протоны и ядра гелия соединяются с электронами, превращаясь в нейтральные атомы. Расчетное количество образующегося гелия хорошо совпадает с тем, которое наблюдается. Это укрепляет нашу уверенность в правильности теории горячей Вселенной.



Для иллюстрации закона Хаббла на рисунке слева показано распределение скоростей убегающих галактик с точки зрения наблюдателя, находящегося в нашей Галактике (0). На рисунке справа приведено распределение скоростей тех же галактик, но с точки зрения наблюдателя, находящегося в галактике 3. Стрелки, изображающие скорости, на обоих рисунках направлены от наблюдателя, а их длины пропорциональны расстояниям от наблюдателя до соответствующих галактик

Общее расширение между тем продолжается. Фотоны остаются равномерно распределенными в пространстве и до настоящего времени. Они-то и образуют уже упоминавшийся выше космический фон радиоизлучения — реликтовое излучение.

Атомы же, наряду с общим расширением, образуют местные «сгущения» — звезды, квазары, галактики, скопления галактик. Тяжелые элементы рождаются позже — в процессах ядерного горения в звездах. При взрывах звезд они выбрасываются и

начинают свое путешествие внутри галактик, часть их попадает в звезды второго поколения (Солнце!) и в планеты (Земля!). Общее число атомов тяжелых элементов, однако, невелико.

Такова история эволюции Вселенной в самом кратком очерке. Уверенность в том, что эта картина эволюции в целом правильна, не исключает необходимости дальнейшей трудной работы, в ходе которой возможны и открытия, и ошибки.

Необходимо, например, подробно исследовать последнюю стадию, связанную с образованием отдельных небесных тел и галактик и с их расположением в пространстве. Один из центральных вопросов космологии — это вопрос о том, какова сегодняшняя структура Вселенной и как эта структура образовалась. Сюда же относятся вопросы о происхождении скоплений и сверхскоплений галактик. Ответы на эти вопросы зависят от начальной малой неоднородности плотности, которую потом тяготение усиливало.

Усиление неоднородности плотности проявляется в сжатии, сжатии газообразного вещества. В трехмерном пространстве «газовое облако» могло бы сжиматься в каждом из трех взаимно перпендикулярных направлений. Однако одновременное сильное сжатие вдоль двух или трех осей — явление нехарактерное. Как правило, сжатие каждого «облака» происходит в одном выделенном направлении. Такой процесс приводит к образованию тонких слоев, их называют «блинами». Плотность вещества внутри этих слоев увеличивается по мере их сжатия. При падении новых порций газа на уже образовавшиеся «блины» они разогреваются и разрастаются в направлении своей плоскости. На более поздних стадиях «блины» начинают пересекаться. В результате формируется сложная ячеистая структура, напоминающая пчелиные соты. В этой структуре слои сжатого газа окружены областями, где газа практически нет. Размеры отдельных ячеек достигают сотен мегапарсеков, а их «стенки» образуются сильно уплотненными сверхскоплениями. Именно в «блинах» происходит рождение отдельных звезд, галактик и их скоплений.

Образование структуры описывается уравнением, определяющим положение частиц вещества в произвольный момент времени t . Если задать положение частицы в некоторой системе отсчета вектором \vec{X} , то уравнение имеет вид

$$\vec{X} = t^{2/3} \vec{x} + t^{1/3} \vec{v}(\vec{x}),$$

где \vec{x} — вектор, определяющий начальное положение частицы (при $t = 0$).

Перное слагаемое в правой части этого уравнения описывает общее расширение Вселенной. Функция $\bar{v}(\bar{x})$ задает начальные возмущения для частицы, которой соответствует вектор \bar{x} , второе слагаемое в целом характеризует рост возмущений со временем. Векторы \bar{x} и $\bar{v}(\bar{x})$ таковы, что размерности обоих слагаемых в правой части уравнения совпадают с размерностью вектора \bar{X} (понятно, что при такой записи размерность \bar{x} не совпадает с размерностью \bar{X}). Анализ написанного уравнения требует в общем случае сложных расчетов на современных вычислительных машинах.

Попробуйте сами проанализировать более простой случай, когда мы имеем дело со свободным движением вдоль одной прямой:

$$X = x + \tau v(x).$$

Здесь X — положение частицы в произвольный момент времени, x — начальное положение частицы, $v(x) = v_0 \sin kx$ — начальное возмущение. Найдите распределения частиц, их скоростей и плотности по оси X в различные моменты времени τ . Начальную плотность (при $\tau = 0$) можно считать постоянной. Заметьте, что в этом случае размерности x и X совпадают, а $v(x)$ имеет смысл скорости.

Проблема структуры тесно связана с тем, какие еще частицы (кроме атомных ядер, электронов, фотонов) содержатся во Вселенной и определяют ее среднюю плотность. Проблема «скрытой массы», уже упоминавшаяся выше, как и проблема структуры Вселенной, требует еще очень большой работы астрономов-наблюдателей. Нужно также, чтобы физики, занимающиеся элементарными частицами, закончили составление полного каталога частиц с указанием их масс и других свойств.

Есть и другая сторона вопроса: что из себя представляет вся Вселенная, Вселенная как целое? Общая теория относительности Эйнштейна говорит о том, что геометрия пространства не подчиняется законам Евклида. Пространство в целом может быть замкнутым, иметь ограниченный объем и в то же время не иметь границ. Говоря про такую возможность, всегда пользуются двумерной аналогией: поверхность шара имеет вполне определенную площадь ($4\pi R^2$), она замкнута, но не имеет границ, все ее точки равноценны. Вместе с тем, малая часть сферы по своим геометрическим свойствам очень близка к малой части плоскости. Ответ на вопрос о том, замкнута ли Вселенная, тоже связан с тем, как велика «скрытая масса».

Подчеркнем еще раз, что решение всех этих сложных задач не изменит в целом того сценария расширения, который был изложен выше.

Существуют еще и более глубокие и трудные вопросы о том, что представляет собой начальное состояние с высокой темпера-

турой и плотностью, откуда оно взялось, почему Вселенная расширяется.

Мы говорили выше о Большом взрыве. Но Большой взрыв Вселенной очень не похож на взрыв даже самой большой бомбы. Заряд из обычного взрывчатого вещества в результате химической реакции превращается в газ с давлением в сотни тысяч атмосфер. Этот газ окружен воздухом с давлением в одну атмосферу. Разность давлений газа и окружающей атмосферы представляет собой ту силу, которая вызывает движение газа и окружающего воздуха, расширение газа и весь комплекс явлений, который называется взрывом. Между тем в Большом взрыве Вселенной с хорошей точностью плотность, температура и давление одинаковы во всех точках пространства в один и тот же момент времени.

Большой взрыв — результат определенного начального распределения скоростей в горячем веществе. Разлет частиц происходит по инерции. Высокое давление отнюдь не ускоряет разлет, а силы тяготения даже замедляют его. С самого начала относительная скорость разлета любых двух малых объемов вещества пропорциональна расстоянию между ними, другими словами, с самого начала «работает» закон Хаббла. Для объяснения всего того, что происходит позже, в теории Большого взрыва нужны очень специфические начальные условия.

Только в последние годы наметились ответы на вопросы о том, как же получаются эти начальные условия, что приводит к расширению Вселенной. Ответы эти связаны с тем, что современная теория допускает возможность существования состояния с отрицательным давлением, а в этом состоянии гравитационные силы вызывают отталкивание вместо обычного притяжения. Тем, кто не захочет поверить мне на слово, придется сначала серьезно изучить общую теорию относительности.

Мы коснулись в этой статье только некоторых вопросов, связанных с историей и эволюцией Вселенной. Законченная теория возникновения Вселенной пока еще не создана, космология при всех ее успехах отнюдь не завершена. Она имеет определенные хорошо сформулированные проблемы, ожидающие систематической исследовательской работы. Чтобы развивать космологию дальше, необходимы более совершенные наблюдения, прогресс физической теории и большая научная смелость.

БРОУНОВСКОЕ МОЛЕКУЛЯРНОЕ ДВИЖЕНИЕ

А. Иоффе

Существует непосредственное доказательство непрерывного теплового движения молекул — так называемое броуновское молекулярное движение. Еще в 1827 году английский ботаник Р. Броун заметил в растительных препаратах под микроскопом постоянное движение или дрожание мелких взвешенных в жидкости частиц. Впоследствии оказалось, что это свойство не ограничивается живой природой, что всякая достаточно мелкая крупинка, помещенная в среду, где она может двигаться, совершает постоянные перемещения самого случайного характера. Исследование этого явления показало, что оно не может быть объяснено побочными причинами, например потоками, которые возникают в жидкой или газообразной среде под влиянием неравномерного нагревания, электризации, освещения и т.п. Это движение никогда не прекращается, оно тесно связано с тепловым состоянием жидкости: с повышением температуры интенсивность броуновского движения возрастает. Можно считать доказанным, что в совершенно спокойной жидкости или газе существует невидимое непрекращающееся движение мельчайших частиц, так как только такое движение способно сообщить те толчки, которые передвигают наблюдаемую крупинку то в одну, то в другую сторону.

Легко понять, почему понадобились микроскопические крупинки, чтобы обнаружить тепловое движение. Даже в сравнительно разреженном газе при нормальных условиях заключается $2,7 \cdot 10^{19}$ молекул в каждом кубическом сантиметре; все эти молекулы движутся с громадными скоростями по всевозможным направлениям. Поэтому число толчков, испытываемых телом обычных размеров, так велико, что мы не только не успеваем

Из книги А.Ф.Иоффе «Основные представления современной физики», изданной в 1949 году. Опубликовано в «Кванте» в 1976 году.

отметить отдельный толчок, но и не замечаем случайного преобладания толчков в одном направлении над толчками в противоположном направлении. Чем меньше тело, тем меньше толчков оно испытывает, а для микроскопических пылинок число испытываемых ими толчков уже так невелико, что преобладание толчков то одного, то другого направления случается постоянно, и пылинка кидается ими из стороны в сторону. Такая пылинка заключает в себе еще миллионы молекул, поэтому ее беспорядочное движение, которое мы видим, не есть собственно молекулярное движение. Мы не замечаем толчка отдельной молекулы, а только преобладание толчков какого-нибудь направления, но зато пылинка является верным показателем существования молекулярного движения, подобно тому как вид качающегося на море судна указывает на существование волн.

Чтобы составить себе представление о хаотическом характере броуновского движения, рассмотрим рисунок, полученный Ж.Перреном, подробно исследовавшим это явление (рис.1).



Рис. 1

На рисунке отмечено положение одной и той же частицы в поле микроскопа через каждые $1/2$ мин. Прямые линии, соединяющие эти положения, ни в какой степени не соответствуют действительному пути частицы за протекшие полминуты. Наоборот, путь между двумя положениями представляет собой такую же сложную запутанную картину, как весь рисунок. Каждое столкновение частицы с молекулой окружающей жидкости немного меняет направление ее движения, а таких стол-

кновений — до 10^{12} в течение 1 секунды. Изобразить действительный путь частицы мы не можем, однако даже наблюдение положений частицы в определенные моменты времени уже выясняет некоторые типичные черты теплового движения.

Как и следовало ожидать, через каждые $1/2$ мин частица оказывается смещенной вправо, влево, вверх или вниз, причем по смещению за предыдущие $1/2$ мин нельзя сделать предсказаний о направлении смещения за следующие $1/2$ мин. Величина смещения различна, но все же большей частью близка к некоторому среднему значению — около 5 мм на рисунке.

Отступления и в ту, и в другую сторону тем реже, чем дальше смещения отходят от среднего. Много, например, смещений в 3 или в 8 мм, но значительно меньше в 2 или 12 мм и совсем не видно смещений в 1 или 20 мм за 1/2 мин. Если бы мы проследили не 200 смещений, как на рисунке, а тысячи, как это сделал Перрен, то встретили бы и большие отступления, но их было бы мало.

Это свойство мы можем описать графически (рис.2), нанося по оси абсцисс величину смещения Δx и по оси ординат — число случаев n , когда наблюдалось данное смещение Δx , причем все возможные их значения мы разобьем на группы — например, смещения от 0 до 1 мм, от 1 до 2 мм и т.д. График покажет некоторый максимум вблизи 5 мм. Отсюда кривая будет спадать до нуля в ту и другую сторону. Это спадание происходит настолько быстро, что число случаев, соответствующих очень далеким от 5 мм смещениям, окажется ничтожно малым.

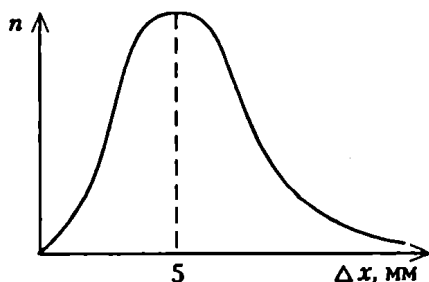


Рис.2

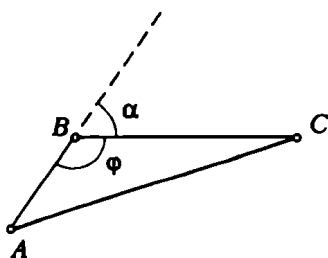


Рис.3

Мы привыкли характеризовать движение частицы скоростью v , понимая под нею отношение смещения за данный промежуток времени Δt к величине этого промежутка. Когда движение равномерно, путь пропорционален времени. Когда движение неравномерно, мы можем, постепенно уменьшая промежуток времени Δt , получать все более сходящиеся значения v , наконец, перейти к пределу этого отношения при бесконечно малом Δt . Этот метод, однако, совершенно не применим к наблюдениям, изображенным на рисунке 1.

Перейдем от смещений AB и BC (рис.3) за одни промежутки времени, например за каждые 1/2 мин, к смещениям AC за двойные промежутки времени — 1 мин. Так как второе смещение BC никак не связано с предыдущим AB и с одинаковой вероятностью может происходить под любым углом ϕ к нему, то общее смещение AC за 1 мин обычно будет меньше чем $AB + BC$, а иногда

может равняться нулю, когда $AB = BC$ и угол $\varphi = 0$. Таким образом, смещение за 1 мин может принимать все значения от $AB + BC$ до $AB - BC$ в зависимости от угла φ . Предсказать результаты каждого отдельного смещения мы не можем, но, наблюдая очень большое число смещений, можно установить некоторую связь между средним значением смещения частицы за $1/2$ мин и средним значением ее смещения за 1 мин.

При любом угле φ между AB и BC мы имеем

$$AC^2 = AB^2 + BC^2 - 2ABBC \cos \varphi.$$

Вместо угла φ можно ввести дополнительный угол α между BC и продолжением линии AB :

$$AC^2 = AB^2 + BC^2 + 2ABBC \cos \alpha.$$

Наблюдая длительное движение частицы, мы составим для каждой пары последовательных смещений подобные уравнения, сложим все эти уравнения почленно и разделим на число уравнений. Тогда получим

$$\begin{aligned} \frac{A_1 C_1^2 + A_2 C_2^2 + \dots + A_n C_n^2}{n} = \\ = \frac{A_1 B_1^2 + A_2 B_2^2 + \dots + A_n B_n^2}{n} + \frac{B_1 C_1^2 + B_2 C_2^2 + \dots + B_n C_n^2}{n} + \\ + \frac{2}{n} (A_1 B_1 B_1 C_1 \cos \alpha_1 + A_2 B_2 B_2 C_2 \cos \alpha_2 + \dots + A_n B_n B_n C_n \cos \alpha_n). \end{aligned}$$

Если движение совершенно хаотично, то все значения угла α должны встречаться одинаково часто. Слагаемые последнего члена, благодаря множителям $\cos \alpha_i$, одинаково часто принимают положительные и отрицательные значения, поэтому их алгебраическая сумма, а вместе с тем и весь последний член чрезвычайно близки к нулю. По сравнению с остальными членами, состоящими из одних положительных слагаемых, он будет настолько мал, что им можно пренебречь. Оставшиеся члены выражают связь между средним значением квадратов всех смещений частиц за каждую минуту, которые мы обозначим через $(\Delta x_2)^2$, и средним значением квадратов смещений за полминуты (его обозначим $(\Delta x_1)^2$). При этом предыдущее уравнение переписывается так:

$$\overline{(\Delta x_2)^2} = 2 \overline{(\Delta x_1)^2}.$$

Точно так же можно найти средний квадрат смещения частицы

$(\Delta x_3)^2$ за тройной промежуток времени:

$$\overline{(\Delta x_3)^2} = 3\overline{(\Delta x_1)^2}.$$

Обозначим через $A, B, C, D, E, \dots, Y, Z$ (рис.4) положения крупинки через ряд последовательных и равных между собой промежутков времени Δt и вычислим, на сколько в среднем

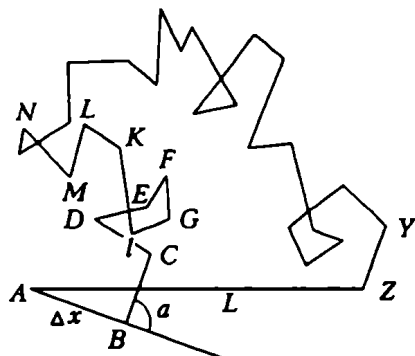


Рис.4

крупинка удалится от своего начального положения в точке A в результате n смещений за время $n\Delta t$. Для удаления AZ получим

$$AZ^2 = (AB^2 + BC^2 + CD^2 + \dots + YZ^2) + \\ + (2ABBC \cos \alpha_1 + 2ACCD \cos \alpha_2 + \dots + 2AYYZ \cos \alpha_n).$$

Сумма членов, содержащих множители $\cos \alpha_1, \cos \alpha_2, \dots, \cos \alpha_n$, одинаково часто может иметь положительный и отрицательный знаки, так как все значения углов α_i одинаково вероятны. Поэтому при повторении опыта среднее значение этой суммы будет тем ближе к нулю, чем больше число опытов. При вычислении среднего результата ею можно пренебречь по сравнению с суммой положительных величин AB^2, BC^2, \dots, YZ^2 . Средние значения квадратов каждого смещения будут, очевидно, одинаковы:

$$\overline{AB^2} = \overline{BC^2} = \overline{CD^2} = \dots = \overline{YZ^2}.$$

Мы обозначим их через $\overline{(\Delta x)^2}$. Среднее значение квадрата полного смещения AZ будет в n раз больше. Итак, в результате хаотического смещения крупинки в течение n промежутков времени Δt среднее значение квадрата окончательного удаления

ее $L = \overline{AZ}$ в каком-нибудь направлении от исходного положения выразится формулой

$$\overline{L^2} = n(\overline{\Delta x})^2.$$

Обозначим через t продолжительность опыта, в течение которого произошло n смещений Δx , измеренных через промежутки времени Δt . Тогда

$$n = \frac{t}{\Delta t}, \quad \overline{L^2} = \frac{(\overline{\Delta x})^2}{\Delta t} t.$$

Отметим прежде всего, что, участвуя в хаотическом движении, крупинка с течением времени в среднем удаляется от первоначального положения на величину L , квадрат которой (а не сама величина L) растет пропорционально времени t .

Среднее смещение L_0 за время t мы определим как $\sqrt{\overline{L^2}}$:

$$L_0 = \sqrt{\overline{L^2}} = \sqrt{\frac{(\overline{\Delta x})^2}{\Delta t}} \sqrt{t} = B\sqrt{t}.$$

Среднее смещение $\sqrt{\overline{L^2}}$ с одинаковой вероятностью может иметь любое направление в пространстве. Мы можем утверждать, что крупинка, находившаяся в начальный момент времени в точке A , через время t окажется в среднем где-нибудь вблизи поверхности шара радиусом $R = B\sqrt{t}$. Радиус этого шара растет не пропорционально времени t , а пропорционально корню квадратному из t . Указанное значение радиуса оправдывается тем точнее и тем увереннее, чем больше отдельных значений Δx входит в состав смещения L или чем чаще повторяется опыт для вычисления среднего значения $\overline{L^2}$.

Легко убедиться, что понятие скорости движения частицы как отношения смещения L_0 частицы за некоторый промежуток времени к величине t этого промежутка теряет смысл для хаотического движения. Действительно,

$$\frac{L_0}{t} = \frac{L_0}{\sqrt{t}} \frac{1}{\sqrt{t}} = \frac{B}{\sqrt{t}}.$$

В противоположность скорости упорядоченного движения тела v , которая стремится к определенному пределу по мере уменьшения промежутка времени $\left(v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t}\right)$, в хаотическом движении величина $\frac{L_0}{t}$ растет беспредельно по мере сокращения промежутка времени t . И только тогда, когда t делается меньше, чем время между двумя соударениями с молекулами среды, движе-

ние в течение этого времени можно считать упорядоченным и обычным образом определить скорость этого движения.

Если проследить весь запутанный путь частицы и разделить общую его длину на промежуток времени, то это отношение даст нам среднюю скорость \bar{v} теплового движения частицы, а величина $\frac{1}{2}m\bar{v}^2$ — среднюю кинетическую энергию этого движения.

Вычисления позволяют установить связь между коэффициентом B и средней кинетической энергией молекул среды:

$$B = \frac{1}{3\pi a\eta} \frac{1}{2}m\bar{v}^2,$$

где a — радиус крупинки, η — коэффициент, определяющий вязкость среды. Найденное из этого уравнения значение $\frac{1}{2}m\bar{v}^2$, как показывает опыт, не зависит ни от свойств среды, ни от выбора крупинки, ни от других условий опыта, пока он производится при неизменной температуре. Наблюдая же броуновское движение частиц при различных температурах, можно установить прямую связь средней кинетической энергии с абсолютной температурой T :

$$\frac{1}{2}m\bar{v}^2 = \frac{3}{2}kT,$$

где k — универсальная постоянная, одинаковая для всех веществ и в любых состояниях. Постоянную k называют постоянной Больцмана.

ЛАЗЕРЫ

Н. Карлов, А. Прохоров

Около двух тысяч двухсот лет назад римские войска взяли греческий город Сиракузы, расположенный в Сицилии. Этот факт был бы, наверное, известен только специалистам по истории становления Римской империи, если бы при взятии Сиракуз не погиб Архимед — один из величайших физиков Земли.

Много легенд связано с личностью Архимеда, его открытиями, обстоятельствами их появления на свет или их применением. Большая часть этих легенд имеет под собой реальную почву. Но одна, самая красивая, — легенда об уничтожении римского флота сконцентрированным солнечным светом — к сожалению, чистая фантастика.

Дело в том, что законы геометрической оптики для обычных источников света говорят о невозможности сконцентрировать световую энергию в виде лучевого шнура и сфокусировать ее на расстоянии, большем размеров фокусирующего прибора. Иное дело лазеры. После возникновения квантовой электроники и создания лазеров появилась возможность концентрации мощных световых потоков в виде лучевых шнуров.

(Квантовая электроника ведет свое начало с 1954 года. Первый лазер появился в 1960 году. Нобелевская премия по физике 1964 года за создание квантовой электроники присуждена Н.Г.Басову, А.М.Прохорову (СССР) и Ч.Таунсу (США). — *Прим. ред.*)

Слово лазер является сокращенной записью английской фразы *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, которая переводится так: усиление света путем индуцированного излучения. Попробуем разобраться, что это означает. Мы знаем, что свет — это электромагнитное излучение, распространяющееся в виде волн и несущее энергию. Световая волна —

Опубликовано в «Кванте» в 1970 году.

быстропеременная электромагнитная волна, распространяющаяся в вакууме со скоростью $3 \cdot 10^8$ м/с. Основными характеристиками волнового процесса являются длина волны — расстояние между двумя гребнями бегущей волны и частота — величина, показывающая, сколько раз в секунду в какой-то фиксированной точке пространства возникает гребень волны. Длина световой волны λ и ее частота ν связаны со скоростью света c простым соотношением $\lambda \nu = c$. Видимому свету соответствуют волны длиной от 0,4 до 0,8 мкм и частоты от $0,75 \cdot 10^{15}$ до $0,375 \cdot 10^{15}$ Гц.

В световой волне периодические изменения в пространстве и во времени испытывают электрическое и магнитное поля, подобно тому как это происходит в радиоволне. Однако обычная световая волна, в отличие от радиоволны, не является монохроматической. О волне говорят как о монохроматической, когда периодическое изменение электрического и магнитного полей волны происходит на одной строго постоянной частоте. В этом случае вся переносимая волной энергия сосредоточена на этой частоте. Такая электромагнитная волна подобна звуковой волне, создаваемой хорошим камертоном.

Частота (длина волны) светового излучения определяет цвет видимого света. Слово «монохроматическое» означает одноцветное. Поэтому если монохроматическая звуковая волна соответствует предельно чистому музыкальному тону, то монохроматическая световая волна соответствует предельно чистому цвету.

Длины волн излучений, исходящих от разных источников, могут, вообще говоря, совпадать. Если при точном совпадении частот гребень одной волны все время совпадает с гребнем другой, пришедшей в ту же точку пространства, то происходит удвоение амплитуды результирующей волны. В этом случае говорят, что волны складываются в фазе. Фазовые соотношения между волнами характеризуют расположение гребней одной волны по отношению к гребням другой волны. Если это взаимное расположение остается все время неизменным, то волны называются когерентными. Слово «когерентность» буквально означает сцепленность, связность. Понятие когерентности играет большую роль и широко используется в физике.

Обычная световая волна не является монохроматической. Дело в том, что свет, который мы видим, — солнечный свет, свет люминесцентных ламп или ламп накаливания — излучается большим количеством отдельных независимых излучателей (атомов), каждый из которых испускает свет вне какой-либо связи с тем, испускают или не испускают свет его соседи. В результате такого хаотического испускания световые волны, из которых

состоит наблюдаемое нами излучение, не когерентны друг другу, а результирующая световая волна не является монохроматической. Именно немонохроматичность и некогерентность обычного света препятствуют концентрации световой энергии в лучевой шнур (отсюда -- невозможность построить «гиперболоид инженера Гарина»).

Мы знаем, что свет испускается атомами. Именно атомы являются теми отдельными независимыми излучателями, о которых мы только что говорили. На атомном уровне представление светового излучения в виде непрерывной световой волны несправедливо. Атом может поглощать или излучать свет только в виде определенных порций световой энергии — световых квантов. Величина энергии кванта $E = h\nu$, где $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка, а ν — частота света.

Энергия квантов видимого света заключена в пределах от $2,5 \cdot 10^{-19}$ до $5 \cdot 10^{-19}$ Дж. Хотя эта энергия очень мала, квантовая природа света существенно проявляется во взаимодействии света с веществом. Вместе с тем свет не утратил своей волновой природы, проявляющейся во всех тех явлениях, где важны фазовые соотношения (сложение волн, формирование световых пучков и т.д.). Таким образом, свет обладает совокупностью волновых и корпускулярных, т.е. присущих частицам, свойств.

Итак, микроизлучателями света являются атомы, дающие в обычных условиях поток квантов некогерентного излучения. Очевидно, что излучение осуществляется атомами, обладающими некоторой избыточной энергией, так называемыми возбужденными атомами. Но возбужденный атом неустойчив, он может самопроизвольно, без каких-либо внешних причин испустить квант излучения. Акты самопроизвольного испускания происходят случайно. Такое излучение носит нерегулярный, хаотический характер. Оно некогерентно. Но возможности излучения световой энергии не ограничиваются только самопроизвольными процессами. Необходимо помнить, что внутренняя энергия атомов может принимать только некоторые определенные значения. Как говорят, атом может находиться только на том или ином уровне энергии. Переходы атома с одного уровня на другой сопровождаются изменением его внутренней энергии. При переходе с нижнего уровня энергии на верхний атом поглощает энергию, при переходе с верхнего на нижний атом отдает энергию. Эти переходы, следовательно, сопровождаются либо поглощением, либо излучением света. Частота светового излучения, поглощаемого или излучаемого при переходе с уровня

энергии E_1 на уровень E_2 , определяется формулой

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}.$$

Кроме самопроизвольных переходов атомов с верхнего уровня энергии на нижний, существует удивительное явление индуцированного излучения, о котором догадался А.Эйнштейн. Процесс индуцированного излучения от самопроизвольного отличается прежде всего тем, что происходит не сам по себе, а под воздействием внешнего по отношению к атому излучения. При этом вторичные кванты неотличимы от первичных. Они точно повторяют частоту и направление распространения первичных квантов. Индуцированное излучение потому и называют индуцированным, что акты его испускания индуцируются (вызываются) внешним по отношению к атому излучением. В результате, в отличие от самопроизвольного излучения многих атомов, индуцированное излучение когерентно.

Таким образом, в оптике имеется явление, пригодное для получения когерентного излучения. Это — индуцированное излучение. Но для одного атома вероятность индуцированного излучения при переходах с верхних уровней энергии на нижние равна вероятности поглощения при переходах с нижних уровней на верхние. Для того чтобы индуцированное излучение преваляло над поглощением, надо на верхних уровнях иметь больше атомов, чем на нижних. А в условиях теплового равновесия дело обстоит как раз наоборот: на нижних уровнях энергии атомов больше, чем на верхних. При взаимодействии излучения с такой системой атомов часть излучения поглотится, и часть атомов перейдет на верхний уровень энергии (рис.1). Если же система атомов так предварительно подготовлена, что на верхнем уровне энергии атомов больше, чем на нижнем, то при взаимодействии излучения с такой системой атомов в силу эффекта индуцированного испускания произойдет усиление исходного излучения, как это схематически показано на рисунке 2. В силу свойств индуцированного излучения вторичное излучение усиливает первичное, являясь точной его копией. Вместе они

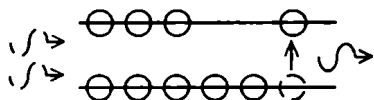


Рис.1

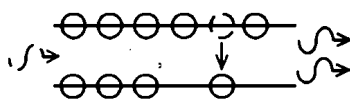


Рис.2

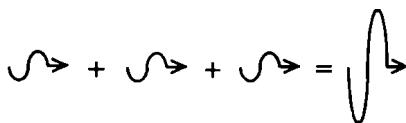


Рис.3

составляют одну волну, амплитуда которой нарастает пропорционально числу актов индуцированного испускания (рис.3). Системы атомов, в

которых хотя бы для двух уровней энергии существует такая ситуация, что верхний уровень энергии населен более нижнего, называются системами с инверсией населенностей. Слово инверсия означает перевернутость, изменение нормального порядка вещей на обратный.

Так вот, основой квантовой электроники как науки в целом служит явление индуцированного излучения, и главным в лазерах является использование индуцированного излучения в системах с инверсией населенностей для когерентного усиления и генерации световых волн.

Здесь следует подчеркнуть разницу между усилением и генерацией. Оптический усилитель служит для того, чтобы увеличивать напряженность электрического поля световой волны, поступающей на его вход. На выходе усилителя должна быть получена более интенсивная, но точная копия входного излучения. В этом смысле оптический усилитель полностью подобен своему предшественнику — радиоусилителю. Оптический же генератор должен быть источником оптического излучения, зарождающегося непосредственно в генераторе и выходящего из него во внешнее пространство.

Для работы оптического генератора необходима обратная связь. Она осуществляется следующим образом. Система атомов с инверсией населенностей располагается между двумя строго параллельными друг другу зеркалами. В какой-то точке между зеркалами самопроизвольно возникает излучение. Оно распространяется в сторону зеркал и по мере распространения усиливается. Дойдя до зеркал, световые волны отражаются и поворачивают назад. Если гребни отраженных волн совпадают с гребнями падающих волн, то волны усиливают друг друга. Для этого расстояние между зеркалами должно быть кратно целому числу полуволен. (Обычно между зеркалами укладываются сотни тысяч полуволен.) Излученная энергия накапливается в пространстве между зеркалами и воздействует на систему атомов, вызывая индуцированное излучение. Если мощность индуцированного излучения превышает мощность неизбежных потерь на нагрев зеркал, рассеяние, а также на полезное излучение во внешнее пространство, то возникает незатухающая световая волна. Эта волна в высшей степени монохроматична, все атомы работают

синхронно. Так их заставляет работать обратная связь, осуществляемая излучением, накопленным между зеркалами.

Для применения лазеров очень важно, что при индуцированном излучении вторичные кванты повторяют не только частоту, но и направление распространения первичных квантов. В результате лазерное излучение обладает как высокой степенью монохроматичности, так и идеальной направленностью. Таким образом, формирование светового шнура происходит автоматически.

Прежде чем перейти к описанию собственно лазеров, завершим изложение основ квантовой электроники следующей грубой аналогией. Представим себе трибуны большого стадиона, заполненные тысячами страстных болельщиков. Перед началом игры болельщики о чем-то говорят, что-то выкрикивают, но каждый независимо друг от друга. Создается сильный и ровный шум. Игра началась, все замерли. Тихо. А затем вдруг, начавшись где-то, нарастает и достигает оглушительной силы единодушный крик «шай-бу, шай-бу». Все кричат в унисон, кричат синхронно, чем и достигается эффект, подобный лазерному.

В первом лазере был применен рубин — монокристалл окиси алюминия (Al_2O_3). В кристалле рубина часть атомов алюминия заменена атомами хрома. При концентрации около 0,05% примесь хрома придает рубину характерный розовато-красный цвет. Инверсия населенностей в рубине достигается с использованием трех уровней энергии и вспомогательного излучения накачки. В методе трех уровней для увеличения числа атомов на верхнем энергетическом уровне или (что эквивалентно) для уменьшения их числа на нижнем уровне применяется мощное вспомогательное излучение, которое связывает один из рабочих уровней с третьим вспомогательным уровнем и перекачивает атомы снизу вверх.

В настоящее время рекордные энергии и мощности в импульсе дают лазеры на рубине и лазеры на стекле с примесью неодима. Поэтому они представляют наибольший интерес.

Основной элемент лазера на рубине — кристалл синтетического рубина высокой однородности. Кристалл обычно имеет форму цилиндра диаметром 0,4 — 2 см и длиной 3 — 20 см. Источником возбуждения является лампа-вспышка. Накачка происходит следующим образом. Атомы хрома, которые до вспышки находились на нижнем невозбужденном уровне, благодаря поглощению зеленого или синего цвета, содержащегося в излучении лампы-вспышки, переходят в возбужденное состояние (рис.4). Время жизни атомов на верхнем возбужденном

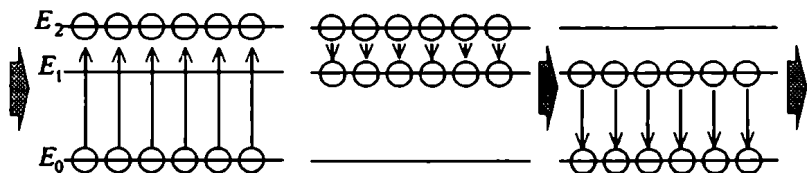


Рис. 4

уровне мало — менее 10^{-7} с. Они быстро переходят на нижний возбужденный уровень, отдавая избыточную энергию решетке кристалла, т.е. нагревая кристалл. На новом возбужденном уровне время жизни уже сравнительно велико и составляет примерно 10^{-3} с. Поэтому этот уровень называется метастабильным. С него атомы переходят в основное невозбужденное состояние с испусканием кванта света в красной области спектра. При достаточно мощной вспышке можно перебросить на метастабильный уровень достаточное количество частиц для создания сильной инверсии.

В качестве ламп накачки применяются мощные газоразрядные лампы. Вначале они делались в виде спирали, охватывающей кристалл. Сейчас, как правило, используются более мощные стержневые лампы, устанавливаемые параллельно кристаллу. Лампы работают в импульсном режиме. Длительность импульса вспышки составляет тысячную долю секунды. Вспышка производится от батареи конденсаторов емкостью до 10000 мкФ, заряженных до нескольких тысяч вольт. При разряде через лампу конденсаторы в одном импульсе отдают энергию в десятки, а то и в сотни тысяч джоулей. Мощность накачки в импульсе может превышать десятки миллионов ватт. Только часть энергии излучения лампы-вспышки, приходящаяся на зеленую и голубую части спектра, идет на возбуждение ионов хрома. Остальная энергия переходит в тепло.

Использование импульсного режима обусловлено двумя обстоятельствами. Во-первых, трудно иметь источник света накачки большой мощности, работающий непрерывно. Во-вторых, кристалл сильно нагревается при длительном возбуждении и теряет оптическую однородность. Естественно, что при импульсной накачке генерация тоже носит импульсный характер. При этом полученная в кристалле инверсия может быть реализована двояко. Рассмотрим обе возможности.

Пусть зеркала-отражатели настроены в резонанс и жестко закреплены. Тогда, как только на метастабильном уровне накопится достаточное количество частиц, начнется генерация, кото-

ия будет продолжаться до тех пор, пока накачка будет эффективна. Обычно такая так называемая свободная генерация начинается через 100–300 мс после начала вспышки и продолжается 1 мс. В режиме свободной генерации большие кристаллы при мощной накачке дают в импульсе энергию до 1000 джоулей. Этому соответствует импульсная мощность до миллионов ватт.

Другой режим достигается путем включения зеркал резонатора в тот момент, когда инверсия достигла максимальной величины. Тогда все накопленные на метастабильном уровне астицы излучают практически сразу, и генератор выдает гигантский импульс излучения очень короткой длительности (10^{-8} – 10^{-9} с) со сравнительно небольшой энергией (около трех джоулей). Но так как эта энергия излучается в очень короткое время, о максимум мощности импульса достигает значений 300 миллионов – 3 миллиарда ватт.

Здесь встает вопрос о коэффициенте полезного действия КПД) лазера. Из приведенных оценок видно, что в лазерное излучение преобразуется лишь малая доля энергии накачки. В режиме свободной генерации КПД рубинового лазера менее 1%, в режиме гигантских импульсов и того меньше. В чем же тогда выигрыш, который дает лазер? Дело в том, что мы, проигрывая энергии излучения, неизмеримо выигрываем в его качестве. Это новое качество – монохроматичность и направленность – обусловлено свойствами эффекта индуцированного излучения.

Длина волны излучения рубинового лазера равна $6943 \text{ \AA} = 6,943 \cdot 10^{-7} \text{ м}$. И в окрестности этой длины волны, в очень узком интервале шириной порядка $0,1 \text{ \AA}$, заключена вся мощность лазера. Ширина же спектра излучения теплового источника видимого света составляет примерно 3000 \AA , т.е. в 30000 раз больше. Один из самых мощных тепловых источников света – наше Солнце – с одного квадратного сантиметра поверхности в видимом свете излучает мощность $8 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$. При этом на интервал длин волн в $0,1 \text{ \AA}$ приходится $0,2 \text{ Вт/см}^2$. А рубиновые лазеры дают в этом интервале 10^6 – 10^9 Вт/см^2 . Соответствующие электрические поля составляют $3 \cdot 10^4$ – 10^6 В/см . Солнце в том же интервале длин волн создает поле 12 В/см .

Новое качество лазерного излучения можно проиллюстрировать следующим образом. Излучение Солнца в принципе не может нагреть какое-либо тело до температуры выше 6000°C . Цветовое излучение газоразрядных ламп более ярких, чем Солнце, не способно нагреть тело до температуры свыше 4000°C . Но когда то же излучение газоразрядных ламп, пусть даже с большой потерей энергии, преобразовано в лазерное

монохроматическое излучение со спектральной плотностью энергии в миллиарды раз больше исходной, оно может нагреть тело до нескольких миллионов градусов.

Лазеры на кристаллах могут работать и в непрерывном режиме. Но большие мощности дают, конечно, импульсные лазеры.

Несколько особняком стоят газовые лазеры. В настоящее время лазеры на газах, возбуждаемых электрическим разрядом, работают в очень широком диапазоне частот — от ультрафиолетового излучения до далекого инфракрасного. Основным конструктивным элементом газового лазера — газоразрядная трубка, т.е. трубка, в которой поддерживается электрический разряд в газе. Обычно газ разрежен до давлений, в 100—1000 раз меньших атмосферного. Материал трубок — стекло или кварц. Длина трубок в зависимости от назначения лежит в пределах от 5 см до 50 м. Газоразрядные трубки газовых лазеров в значительной мере подобны трубкам неоновой светящейся рекламы. Зеркала лазеров установлены либо непосредственно на торцах газоразрядных трубок, либо снаружи, но в любом случае строго перпендикулярно оси трубки.

В настоящее время наиболее распространенным является неон-гелиевый лазер непрерывного действия на длине волны 6328 Å (красный свет). С его помощью получены световые колебания очень высокой стабильности и высокой монохроматичности. Хотя КПД этого лазера крайне невелик ($\approx 0,01\%$), высокая степень монохроматичности и направленности его излучения, обусловленные, в частности, однородностью его газовой активной среды, сделали этот лазер незаменимым при всякого рода юстировочных и нивелировочных работах: при прокладке метро, выравнивании взлетно-посадочных полос больших аэродромов и т.п.

Большим достижением стало создание мощного лазера непрерывного действия, рабочим телом которого служит смесь углекислого газа, азота и гелия. Он дает инфракрасное излучение с длиной волны 10,6 мкм. Интерес к этому лазеру обусловлен прежде всего тем, что его КПД, достигающий 30%, превосходит КПД всех существующих в настоящее время лазеров, работающих при комнатной температуре. Уже сейчас с помощью этого лазера можно получить в непрерывном режиме мощность в 10 киловатт. Монохроматичность, направленность и высокая мощность этого лазера делают его весьма перспективным для целого ряда технологических применений

Сейчас промышленность выпускает лазеры различных типов. Они используются как эффективный инструмент в научных

исследованиях, для решения разного рода практических задач медицины (бескровный скальпель) и технологии (точная обработка тугоплавких материалов, раскрой текстильных материалов). Лазерный луч измерил расстояние до Луны с большей точностью, чем это было сделано радиосредствами. (После того как на Луне был установлен специальный отражатель, расстояние до нее было измерено с точностью до четырех метров.)

Самое широкое применение лазеры нашли в физике. Они дают возможность проводить уникальные физические эксперименты. Например, с помощью лазеров, работающих в режиме гигантских импульсов, осуществлен пробой воздуха электрическим полем световой волны. Этот пробой происходит в фокусе линзы, собирающей энергию лазерного пучка в точку. Монохроматичность и высокая направленность лазерного излучения позволяют при фокусировании концентрировать лазерный свет в очень малом объеме (в принципе размер пятна в фокусе может быть доведен до длины волны). В образующуюся при пробое лазерную «искру» практически мгновенно «вкачивается» почти вся энергия импульса. Плазма «искры» сильно разогревается. Получена температура в несколько миллионов градусов. Установлено, что лазерная искра излучает рентгеновские лучи. Уже получены первые нейтроны, рожденные возникающей при таком нагреве термоядерной реакцией.

Работа с лазерами ведется в лабораториях всего мира. Много сделано, но много еще нерешенных проблем. Нет сомнения, что развитие квантовой электроники будет и дальше продолжаться высокими темпами.

ПОЧЕМУ ФИЗИКА НУЖНА ИНЖЕНЕРУ?

Л.Мандельштам

Приступая к чтению лекций по физике, я хотел бы, прежде чем перейти к систематическому изложению предмета, остановиться сегодня на одном общем вопросе и поделиться с вами некоторыми соображениями насчет того положения, которое физика занимает и, по моему убеждению, должна занимать в ряде наук, изучению которых вы собираетесь посвятить ближайшие годы.

Мне хотелось бы дать вам материал, на основании которого вы могли бы сами убедиться, что физика нужна инженеру всегда, во все время его деятельности, и что на нее нельзя смотреть как на предмет, который нужно — да и нужно ли? — раз пройти, а потом можно и забыть, так как ведь все равно то, что необходимо знать инженеру из физики, еще раз повторяется при прохождении специальных предметов.

Говоря, что инженеру нужна физика, я имею в виду не только то, что он должен быть знаком с теми отдельными явлениями и законами, с которыми он непосредственно встречается в своей практической деятельности. Такое утверждение было бы само собой очевидным. Что инженер-строитель, рассчитывая прочность сооружения, должен быть знаком с основными законами упругости, что инженер-электротехник в проектировании, скажем, осветительной сети должен знать закон Ома, связывающий силу тока, сопротивление и электродвижущую силу батареи, и т.д. — это, конечно, не нуждается в доказательстве. Нет, когда я говорю, что инженеру нужна физика, я этим хочу сказать, что ему нужно широкое владение этим предметом в его совокупности; я утверждаю, что ему нужно знание физики

Из лекции, прочитанной Л. И. Мандельштамом студентам Одесского политехнического института в 1918 году. Опубликовано в «Кванте» в 1979 году.

самой по себе как цельной дисциплины с ее специфической методикой, а не только в зависимости от текущих применений. Я утверждаю, наконец, что для этого инженеру недостаточно знать только опытную часть ее, а что он должен быть основательно знаком с теорией.

Но для того чтобы показать, что это действительно так, мы прежде всего должны постараться выяснить структуру физики как науки и посмотреть, в каком соотношении находятся теория и тот опытный материал, которым физика оперирует.

Конечно, мы не можем решать здесь вопрос о сущности физической науки во всей его полноте. Этот вопрос, относящийся к теории познания и крайне интересный как для физика, так и для философа, значительно более сложен, чем это может показаться на первый взгляд. В истории философской мысли он всегда занимал важное место. Но нам для нашей цели и нет надобности особенно сильно в него углубляться. Нам достаточно будет заняться только одной его стороной, хотя, правда, и здесь нам придется начать несколько издалека.

Не подлежит сомнению, что единственным средством, с помощью которого мы черпаем наши сведения об окружающем нас мире, являются наши органы чувств. Но единичные чувственные восприятия слишком мимолетны и неустойчивы, чтобы служить материалом для дальнейшей переработки. И вот человек выделяет и фиксирует в памяти те общие черты отдельных восприятий, которые повторяются и которые для него практически важны. Этот процесс, совершающийся абсолютно произвольно, ведет к образованию того, что в логике называется понятиями.

В образовании понятий состоит первый шаг на пути познания природы. Они являются той базой, на которой строится дальнейшее. Но образованные таким образом первоначальные понятия обладают, как мне кажется, следующим свойством. Они не поддаются строгому определению. Мы все владеем понятием «свет». Но объяснить словами, определить один другому сущность этого понятия мы не можем. Чтобы научиться ему, нужно иметь глаза, нужно видеть, как освещается все нас окружающее при восходе солнца и как погружается опять во мрак при его заходе. Если быть прозаичнее, тому же можно научиться, включая и выключая электрическую лампочку. Но одно несомненно — слова, определения здесь бессильны. Попробуйте объяснить слепому от рождения, что такое свет.

Итак, одними словами первоначальным физическим понятиям научить нельзя. Вот почему, позвольте мне это здесь подчер-

кнуть, ни учебник, ни учитель недостаточны, чтобы научить физике. Учащийся должен хоть немного работать опытно сам. Он должен хоть поверхностно, но сам слышать, сам осязать те явления, о которых ему говорят.

Мы несколько отвлеклись в сторону. Вернемся к первым шагам на пути познания природы, к понятиям, непосредственно навязанным нам природой. По мере того, как человечество увеличивало свой запас навязанных опытом понятий (опытных знаний), все настоятельнее являлась потребность в их систематизации, без которой нет возможности разобраться в бесконечном обилии окружающих нас явлений. В этой систематизации громадную службу оказывает нам наша способность образовывать другого рода понятия, понятия более определенные, чем те, о которых шла речь выше, и менее зависящие от наших чувств. В первую очередь сюда относятся понятие о числе и те понятия, которыми оперирует математика. В области этих понятий, другими словами, в области математического мышления, мы себя чувствуем несравненно более уверенно, чем при оперировании с материалом, непосредственно поставляемым нам нашими чувствами. При помощи математических понятий можно определенно формулировать послышки и так же определенно и легко делать из них выводы и заключения. И вот, зная за собой эту силу, человек старается — вначале инстинктивно, а затем, с развитием науки, и сознательно — приспособить математические понятия и специально понятие о числе к сырому опытному материалу, к понятиям физическим.

В этом процессе перехода от качественных соотношений к количественным заключается важнейший этап научной мысли. На нем основано как понятие об измерении, так и сам процесс измерения физических величин. Можно смело утверждать, что какая-нибудь область физических явлений вообще становится наукой только с того момента, когда мы вводим в нее измерения. Так например, пока не было точного понятия температуры и не умели ее измерять, науки о теплоте почти или даже совсем не существовало.

Пользуясь в описанном смысле математикой, мы стараемся теперь найти систему в окружающих нас явлениях и облегчить себе их понимание тем, что ищем такие математические формулы в общем смысле слова, не непременно узко алгебраическом, которые охватывали бы возможно большее число единичных фактов или общую сторону различных явлений. Если такая формула найдена, то мы говорим, что нашли физический закон. Возьмем пример. Закон преломления света при переходе

из одной прозрачной среды в другую гласит: падающий и преломленный лучи лежат в одной плоскости, и отношение между синусом угла падения и синусом угла преломления есть величина постоянная. Например, для воды и воздуха это отношение равно 1,33. Что представляет собой этот закон? Это — формула, охватывающая бесчисленное множество единичных случаев преломления. Она избавляет нас от необходимости делать в каждом отдельном случае опыт, запоминать или заносить в таблицы для каждого отдельного случая угол преломления луча. Зная закон преломления, вы уверены, что в любой момент, когда это вам понадобится, при помощи простейших вычислений вы сможете решить всякий представившийся в этом направлении вопрос.

По мере того как физические знания росли, по мере того как число найденных законов увеличивалось, все труднее и труднее становилось разобраться в их разнообразном обилии. Движимые опять необходимостью возможно лучше ориентироваться в этом громадном материале, люди старались найти такие картины, такие точки зрения, которые позволили бы объединить в одно целое отдельные законы. Так создавалась физическая теория или, вернее, теории.

Теория, таким образом, находится в таком же отношении к отдельным законам, в каком законы находятся к отдельным явлениям. Систематизирующая роль теории, конечно, не исчерпывает всей ее сущности, но все же, как вы видите, в систематизации наших знаний она имеет громадное значение. И тут математика является огромным подспорьем. Только что рассмотренные соотношения между различными сторонами физики и постепенное развитие их могут быть прослежены на любой физической теории. Очень просто это сделать, например, на оптике.

Оптика, между прочим, — одна из самых древних научно разработанных областей физики. Изучение оптических явлений уже в древности привело к установлению некоторых законов. Закон прямолинейного распространения света и закон отражения от зеркал были известны давно. Позже, в XVII веке, был найден закон преломления. Смотря по тому, какая группа явлений подвергалась исследованию и с каких точек зрения к ним подходили, были установлены различные отрывочные законы. Были открыты явления дифракции света, интерференции и т.д. Но пока не было общей, объединяющей точки зрения, было чрезвычайно трудно разбираться во всей совокупности оптических явлений. Более того, отдельные законы, казалось, находи-

лись в противоречии друг с другом. Загибание света не вязалось, например, с прямолинейным распространением луча.

Так было до тех пор, пока усилиями ряда гениальных физиков, из которых в первую очередь должны быть названы Х.Гюйгенс и О.Френель, не удалось найти ту картину, которую мы теперь называем волновой теорией света и которая позволила объединить всю оптику в одно стройное целое. И все, что казалось сложным и противоречивым, сделалось простым и ясным.

А возьмите теорию всемирного тяготения И.Ньютона. Объединяя с гениальной смелостью столь разнородные на взгляд наших чувств явления, как падение камня и движение небесных светил, она грандиозна именно своей простотой. В одной простой формуле она содержит всю динамику всего мироздания.

Я ограничусь этими примерами. Может быть, в них осталось кое-что вам неясным. Это ничего. Понимание фактической стороны придет по мере того, как вы будете изучать физику, но я думаю, что для вас, по крайней мере в общих чертах, теперь выяснилось соотношение между ее опытной и теоретической сторонами.

Эти две стороны, как вы видели, тесно связаны между собой, они вместе представляют одно целое. В достижении нашей конечной цели — познания природы — могучим подспорьем, систематизирующим наш опыт и дающим возможность пользоваться материалом, является теория. Теория, а значит и орудие, которым, как мы видели, она пользуется, — математика, не являются балластом и чем-то искусственно пристегнутым к науке о природе. Нет, она есть то орудие, без которого мы не были бы в состоянии осилить окружающий нас мир как в практическом смысле, так и в смысле удовлетворения умственных потребностей. Поэтому я нахожу — не считайте это парадоксом, — что нельзя требовать знания только опытной физики, но вовсе не потому, что слишком мало, а потому, что это слишком трудно. Более или менее полное знание опытной физики без помощи теории человеку не под силу.

Изложенный взгляд на систематизирующую роль теории очень хорошо иллюстрируется одним красивым сравнением, сделанным А.Пуанкаре.

Пуанкаре сравнивает всю физику с огромной библиотекой. Отдельные опытные данные, отдельные явления — это те тома, из которых библиотека состоит. Теория — это каталог нашей библиотеки. Как без каталога библиотека, особенно большая, представляет собой лишь сборище книг, очень ценных книг,

которыми в сущности продуктивно пользоваться нельзя, точно так же физика без теории не есть наука, а лишь довольно малоценный конгломерат отдельных фактов, разобраться в которых нет возможности.

А теперь нам будет уже нетрудно ответить на тот вопрос, который мы поставили себе вначале. Нужна ли инженеру физика в ее целом? Не достаточно ли ему знания отдельных, непосредственно для его практической работы нужных фактов? Ответ, мне кажется, ясен. Чтобы продуктивно работать — позвольте мне говорить на языке сравнения Пуанкаре, — инженеру не достаточно прочесть и знать несколько книг из громадной библиотеки знания. Он должен быть знаком или, по крайней мере, уметь разбираться в каталоге всей библиотеки.

История техники знает немало примеров загадочных неуспехов, неуспехов повторных и имевших иногда весьма неприятные последствия. И очень часто оказывалось, что загадочность обуславливалась не присутствием действительно новых, до сих пор вообще неизвестных факторов, а отсутствием у тех, кто данными вопросами занимался, широкого физического горизонта. И когда за решение брались люди, обладавшие действительно широкими физическими знаниями, то загадка не только разъяснялась и находился способ предотвратить неуспех, но часто открывались и новые пути для дальнейшего прогресса.

Позвольте мне в заключение остановиться на одном примере, как мне кажется, иллюстрирующем значение широкого физического горизонта при разрешении технических вопросов.

Я имею в виду вопрос об оптических инструментах и, в частности, вопрос о микроскопе. Микроскопом особенно интересовались уже в середине прошлого столетия, после того как применение его в биологии открыло совершенно новые пути в изучении явлений жизни. Но после первых успехов обнаружилось, что существовавшие тогда микроскопы не были хороши и не были сильны. Исследователи ясно чувствовали, что если бы удалось построить микроскоп с большим увеличением, то вместе с тем явилась бы возможность проникнуть еще дальше в сущность жизни. А такая перспектива всегда с особенной силой манила людей. И фантазия не останавливалась перед постройкой микроскопов, увеличивающих в десятки, сотни тысяч и миллионов раз, и ждали от их применения чудес. Исследователи ждали, что с их помощью можно будет проникнуть в самые сокровенные детали строения живой материи.

Понятно, что при такой конъюнктуре и специалисты-конструкторы оптических приборов взялись с усиленной энергией за

усовершенствование микроскопа. И они считали принципиально возможным достигнуть любых увеличений. Весь вопрос, казалось, сводился к преодолению технических трудностей.

Дело в том, что в то время все расчеты, касавшиеся оптических приборов, велись исключительно при помощи так называемой геометрической оптики. В основании расчетов лежала та теория микроскопа, которая оперирует со световыми лучами как с прямыми линиями. А с точки зрения геометрической оптики действительно не существует принципиальной границы для возможного увеличения микроскопа.

Однако же весьма скоро обнаружилось, что работа, направленная на усовершенствование микроскопа, не дает тех результатов, которых, казалось, можно было ожидать. Между тем, что казалось достижимым, и тем, что достигалось, было противоречие, которому объяснения не находилось.

Так обстояло дело, когда йенский механик К. Цейс, имевший небольшую механическую и оптическую мастерскую и изготовлявший сам недурные по тому времени микроскопы, пригласил в качестве консультанта тогда еще молодого физика Э. Аббе. Аббе обладал хорошей теоретической подготовкой, хорошо владел теоретической оптикой. Она знал, что геометрическая оптика есть лишь удобная схема для обработки классического явления преломления. Он знал ее цену, потому что сам очень много внес нового в эту область. Но он знал также, что с точки зрения волновой теории света, служащей базой для геометрической оптики, последняя есть не более как приближение. И он сразу подошел к вопросу о микроскопе с широким, не связанным узкими рамками геометрической теории взглядом.

Результаты такого подхода к делу не заставили себя долго ждать. Одним из главных результатов, к которым пришел Аббе, был следующий. Он показал, что волнообразная природа света ставит принципиальный предел тому полезному увеличению, которое может быть достигнуто при помощи микроскопа или вообще любого оптического инструмента. Если детали объекта мельче определенной величины, то эти детали не могут быть видимы, выявить их ни один микроскоп не может. Все мечты об увеличении в 100000 и больше раз и все связанные с ними надежды должны быть принципиально оставлены, и работа тех, кто хотел такие микроскопы построить, совершенно бесцельна. Блестящими опытами Аббе подтвердил правильность своих теоретических выводов.

Позвольте мне на этом остановиться. Я надеюсь, что вы теперь согласитесь со мной, что знание, широкое, полное знание

физики для инженера — не роскошь, а необходимость, что широкий физический горизонт должен быть достоянием не только тех отдельных избранных людей — инженеров, которым суждено прокладывать новые пути в технике, но и достоянием всякого инженера, сознательно относящегося к своему делу. Если то, что я сказал, могло бы способствовать укреплению в вас этого взгляда, то моя цель была бы достигнута.

КАК УСТРОЕНА ПУСТОТА?

А. Мигдал

Речь пойдет о том, как изменились наши представления о самом распространенном во Вселенной и, быть может, самом важном объекте физических исследований — пустоте.

Что такое пустота: абстрактное понятие, «ничто», вместилище для физических тел?

Что останется, если идеальный насос удалит из замкнутого объема все частицы?

Что находится в межзвездном пространстве, где почти нет вещества?

Развитие физики последних десятилетий показало, что наше физическое пространство — вакуум — не просто геометрический объект, не пространство, в котором ничего нет, а сложная система, обладающая интереснейшими свойствами, совершенно непохожими на свойства твердых сред, жидкостей или газов; его изучение касается самых глубоких понятий, таких, как причинность, связь геометрии с материей, симметрии пространства и времени, связь симметрии с законами сохранения.

НЕЛЬЗЯ ТОЛКНУТЬ, НЕ ПРИКАСАЯСЬ

Мы знаем, что тела действуют друг на друга при соприкосновении. Бросим в воду камень, от него побежит волна и всколыхнет плавающие ветки — воздействие передается от точки к точке. Звук распространяется потому, что давление передается от одного объема среды к соседнему, и т.д. Если накрыть звучащий электрический звонок стеклянным колпаком и откачать воздух, то видно, как по-прежнему молоточек ударяет по колокольчику, но звук исчезает — в пустом пространстве звук не распространяется. В то же время период колебаний маятника, помещенного под колпак, не изменяется при

Опубликовано в «Кванте» в 1986 году.

удалении воздуха (если пренебречь трением); значит, не изменяется и сила тяжести.

В отличие от сил, возникающих при распространении звука, электрические и магнитные силы, гравитация действуют и в пустоте, в ней распространяется свет, поэтому мы видим солнце и звезды.

Естественно предположить, что в пространстве вблизи магнита, вблизи заряженного или массивного тела состояние пустоты изменяется. Пространство, окружающее эти тела, находится в «напряженном» состоянии, которое описывается словами: «в пространстве имеется поле». Заряды создают электрическое поле, магнит — магнитное, массивное тело вызывает гравитационное поле. Электрическое поле действует на заряженное тело, магнитное — на магнит, поле силы тяжести — на камень, заставляя их двигаться. Изменение скорости этих тел объясняется действием поля в той области пространства, где в данный момент времени они находятся. Сила передается через пустое пространство от точки к точке с помощью полей, как через невидимую жидкость. Такой механизм передачи воздействия называется близкодействием и принят современной физикой.

Но существовало и другое представление — дальное действие: влияние одного тела на другое мгновенно передается на расстояние. На основе этого взгляда И.Ньютон построил свою теорию тяготения. Предположение о мгновенной передаче воздействия не помешало ему найти закономерности движения небесных тел, с огромной точностью совпадающие с данными наблюдений. Сейчас мы знаем, почему: небесные тела движутся со сравнительно малыми скоростями, а гравитационное взаимодействие распространяется со скоростью света и может считаться в этом случае мгновенным.

Идею дального действия трудно согласовать со свойствами света: было известно, что свет распространяется с конечной скоростью и проходит все промежуточные точки на линии светового луча. Особенно хорошо это видно, когда луч света проходит в тумане — он непрерывен. Ньютон предположил, что светящееся тело испускает частицы, передающие свет, — корпускулы. Тогда конечность скорости не противоречит идее дального действия, но остаются без объяснения волновые свойства света, доказанные опытами по интерференции и дифракции. Корпускулярная теория Ньютона так и не смогла справиться с объяснением этих явлений.

Через двести с лишним лет после Ньютона, в 1905 году, появилась замечательная работа А.Эйнштейна по квантовой

природе света. Эйнштейн показал, что обнаруженные экспериментально закономерности фотоэффекта (вырывание электронов из атома при облучении) можно объяснить, только предположив, что свет представляет собой набор частиц — фотонов, которые взаимодействуют с электронами, выбрасывают их из атомов. (Представление о свете как о волне не могло объяснить главную особенность фотоэффекта — энергия вылетающего электрона не зависит от интенсивности света, а только от его частоты.)

В некотором смысле точка зрения Эйнштейна означала возврат к ньютоновской теории корпускул. И снова возник вопрос, на который не смог ответить Ньютон: как объединить оба представления — о волновой и о корпускулярной природе света? Возник важный парадокс, который был разрешен квантовой теорией, доказавшей, что свет — и волна, и частица, так же как электрон — и частица, и волна!

Это представление получило название квантово-волнового дуализма.

Сейчас нам известно, что в пустоте все взаимодействия — электрическое, магнитное, гравитационное, ядерное — передаются от точки к точке со скоростью, не превышающей скорость света. Если одно тело передвинуть, должна измениться сила тяготения, действующая с его стороны на другое тело. Но если это другое тело находится далеко от первого, то пройдет заметное время, прежде чем оно получит воздействие. Где же находится возмущение, когда первое тело уже переместилось, а второе еще не имеет сведений о его новом положении? На этот вопрос теория дальнего действия не могла ответить, и многие физики отказались от нее еще в прошлом веке.

Для объяснения передачи воздействия на расстояние была придумана специальная среда — эфир, заполняющий все пространство между частицами вещества. Воздействие передается за счет того, что вокруг заряженных или намагниченных тел эфир деформируется, и возникает сила, действующая на другое заряженное или намагниченное тело. Деформация эфира передается последовательно — от точки к точке. Свет распространяется в нем так же, как звук в среде.

Вплоть до начала XX века физики пытались строить эфир по образу и подобию известных твердых и жидких тел, а его нужно было изучать самого по себе. Это среда особого рода. Следствием неверного представления о природе пустоты было возникновение интереснейших парадоксов, разрешение которых приводило к созданию новых физических теорий.

Дж.Максвелл своими удивительными уравнениями, найденными в 1865 году, объединил различные разделы физики: оптику, электричество, магнетизм.

Начало на этом пути было положено его могучим предшественником М.Фарадеем, открывшим в 1831 году закон электромагнитной индукции. Если изменять магнитное поле, пронизывающее проволочное кольцо, то в проводнике возникает электрический ток — заряды в нем начинают двигаться под действием образующегося в пространстве кольцевого электрического поля. Итак, переменное магнитное поле рождает в пустоте переменное электрическое.

Еще в 1820 году другой предшественник Максвелла Х.Эрстед обнаружил, что ток, текущий по проводнику, создает вокруг себя кольцевое магнитное поле. Если периодически изменять напряженность электрического поля в проводнике, возникает переменный ток и переменное магнитное поле. Максвелл высказал гениальную догадку о том, что не только движущиеся заряды создают магнитное поле, его образует и само переменное электрическое поле.

Из этих двух замечательных свойств пустоты последовало третье, не менее важное, — в пустоте распространяются электромагнитные волны. Когда вблизи антенны радиопередатчика возникает переменное электрическое поле, оно образует вокруг себя, согласно Максвеллу, переменное магнитное поле, а магнитное — по закону Фарадея — создает уже в соседнем месте переменное электрическое. Так возмущение передается все дальше и дальше.

Из уравнений Максвелла следовало, что электромагнитные колебания должны распространяться со скоростью света. Существование электромагнитных волн было экспериментально доказано Г.Герцем в 1886 — 1889 годах. Естественно было прийти к заключению, что свет — тоже электромагнитная волна. Это предположение было проверено и подтверждено опытом.

Как абстрактно выглядели эти представления во времена Максвелла! И как быстро они стали основой почти всех благ современной цивилизации: от телефона и радио до современных средств космической связи — не перечислить всего того, что родилось из опытов в маленьких лабораториях прошлого века, из смутных догадок великих умов!

Теория Максвелла была триумфом близкодействия: все электромагнитные воздействия передаются через среду — эфир. Но тут же возникли новые противоречия.

Когда в эфире движется тело, движется ли вместе с ним эфир? Эксперименты дали противоречивые результаты, некоторые опыты показали частичное или полное вовлечение эфира в движение, другие — что эфир вовсе не увлекается движущимся телом. В 1851 году французский физик А. Физо измерил скорость света в текущей воде и показал, что эфир частично захватывается движущейся средой. Американский физик А. Майкельсон в 1881 году измерял скорость света вдоль и поперек направления орбитального движения Земли. Если бы эфир был неподвижен, то скорость света вдоль движения Земли складывалась бы из скорости света в эфире и скорости Земли относительно эфира. Оказалось, что скорость света одна и та же, т.е. она не зависит от скорости источника, и если свет действительно распространяется в эфире — значит, эфир полностью увлекается Землей.

Разрешить противоречия эфира предстояло теории относительности.

ЭФИР УМЕР — ДА ЗДРАВСТВУЕТ ЭФИР!

В начале XX века идея близкодействия получила дальнейшее развитие и обоснование в теории относительности и теории тяготения Эйнштейна. Оказалось, что не только электромагнитные, но и гравитационные воздействия распространяются в пустоте со скоростью света. Скорость света вошла не только в электродинамику, но и в механику, и в теорию тяготения.

Противоречие между опытом Физо и опытом Майкельсона было снято новой формулой сложения скоростей, вытекавшей из теории относительности, свойства эфира здесь роли не играли. Отпала необходимость в самом понятии эфира, его заменил вакуум — новый непротиворечивый объект. Эфир умер.

Но в науке новое, как правило, не отменяет старого, старые и новые идеи переплетаются и проникают друг в друга. Даже коренная научная революция не отменяет, а только пересматривает, переосмысливает прежнее, устанавливает границы применимости найденных ранее соотношений. Судьба эфира — убедительное подтверждение этому.

В начале XX века казалось, что все свойства пустоты объясняются гравитационными и электромагнитными воздействиями. Но изучение атомных ядер показало, что существуют силы, удерживающие нейтроны и протоны в ядре, — ядерные силы. И с точки зрения близкодействия их тоже нужно рассматривать как особое, напряженное состояние вакуума. Вакуум обогатился еще одним свойством.

Когда к электромагнитному полю и к полям, описывающим, например, пары частиц электрон — позитрон, протон — антипротон и т.д., применили квантовую механику, оказалось, что в пустоте происходят непрерывные колебания этих полей, рождаются и исчезают элементарные частицы. При столкновениях нуклонов (нейтронов и протонов) из пустоты возникает целый сноп различных частиц. Вакуум полон частицами! Удивительно сложную и интересную среду — вакуум — можно было бы снова назвать эфиром, если бы не боязнь путаницы с наивным понятием XIX века.

КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА ВАКУУМНЫХ ПОЛЕЙ

Без некоторых минимальных сведений о квантовой механике нельзя составить даже грубую физическую картину явлений, происходящих в вакууме. Поэтому, прежде чем говорить об удивительных свойствах вакуумных полей, нам придется немного отвлечься и поговорить о том, к каким результатам приводит применение квантовой механики к системам, колеблющимся около положения равновесия. Такие системы часто встречаются в физике и называются осцилляторами. Как бы ни был конкретно устроен осциллятор — будь то маятник, грузик на пружинке, колебательный контур, — его энергия состоит из двух слагаемых: потенциальной энергии, пропорциональной квадрату некоторой величины, которую можно назвать «обобщенной координатой», и кинетической, пропорциональной квадрату скорости изменения этой «координаты». Для грузика на пружинке «обобщенная координата» — смещение грузика от положения равновесия, для колебательного контура — заряд на обкладках конденсатора. Коэффициент пропорциональности в кинетической энергии определяет «обобщенную массу». Мы называем эти величины обобщенными потому, что они не зависят от реализации осциллятора — «координате», как вы видите, совсем не обязательно иметь размерность длины.

Остановим маятник — в положении равновесия его энергия минимальна: и кинетическая, и потенциальная энергии равны нулю. Так ведет себя классический осциллятор. Но вот что получилось, когда к осцилляторам применили квантовую механику.

Один из важнейших принципов квантовой механики — принцип неопределенности, сформулированный В.Гейзенбергом в 1927 году, гласит: некоторые физические величины не могут одновременно принимать определенные значения. Именно таки-

ми величинами являются «обобщенная координата» и «обобщенный импульс» — произведение «обобщенной массы» на «обобщенную скорость». Прodelывая мысленные эксперименты, Гейзенберг пришел к заключению, что чем точнее измерять координату электрона, тем менее определенным становится его импульс, и наоборот. Это — принципиальное ограничение, которое природа накладывает на понятия координаты и импульса.

Когда квантовая механика была применена к осцилляторам, сразу стало ясно, что кинетическая и потенциальная энергии квантового осциллятора не могут одновременно равняться нулю: если бы это было так, то должны были бы одновременно быть определены и равны нулю и координата, и импульс осциллятора, а это противоречит принципу неопределенности. Квантовый осциллятор, в отличие от классического, даже в состоянии с наименьшей энергией не покоится. Он совершает так называемые нулевые колебания около положения равновесия.

Это замечательное свойство квантовых осцилляторов хорошо проверено на опыте и чрезвычайно важно для современной физики.

Упругие колебания твердого тела, так же как и колебания струны, описываются набором осцилляторов различных частот. Если учесть, что осцилляторы должны подчиняться квантовой механике, то получится, что при абсолютном нуле температуры атомы твердого тела не неподвижны, а участвуют в нулевых колебаниях. Это подтвердили опыты по рассеянию света в твердых телах при низких температурах.

Электромагнитные волны в пустоте тоже можно рассматривать как результат колебаний набора осцилляторов. Представим себе, что между параллельными металлическими экранами, перпендикулярно им, образовалась стоячая электромагнитная волна — она получится, если между экранами укладывается целое число полуволн. Стоячая волна возникает в результате сложения бегущих волн, отражающихся от левого и правого экранов. Похожая волна возникнет в обычной струне — дернешь струну, по ней побегут волны, отразятся от мест закрепления, и установится стоячая волна. Подобное же происходит в органичной трубе.

Напряженность электрического поля в стоячей электромагнитной волне будет периодически колебаться — перед нами снова осциллятор. В качестве «обобщенной координаты» такого осциллятора можно взять напряженность электрического поля в какой-либо точке (например, в точке, где амплитуда колебаний напряженности максимальна). Импульсом должна быть величина

на, пропорциональная скорости изменения «координаты», именно такая величина — напряженность магнитного поля. (Школьные знакомы с другой силовой характеристикой магнитного поля — магнитной индукцией. — *Прим. ред.*) Но раз «координата» и «импульс» квантового осциллятора не имеют одновременно определенных значений, значит, энергии электрического («потенциальная» энергия) и магнитного («кинетическая» энергия) полей не могут одновременно равняться нулю.

Даже если в пространстве нет ни одной частицы, ни одного кванта, электрические и магнитные поля совершают нулевые колебания. Последовательное применение квантовой механики к электромагнитному полю, взаимодействующему с электронами, было начато в конце 20-х годов в работах П. Дирака и завершено через 20 лет физиками-теоретиками Р. Фейнманом, Ю. Швингером, С. Томонагой, Ф. Дайсоном. Возник раздел теоретической физики — квантовая электродинамика, которая позволила с большой точностью описывать все процессы взаимодействия электронов между собой и с электромагнитным полем.

Нулевые колебания электромагнитного поля заставляют дрожать электрон, движущийся в атоме, — он как бы превращается в шарик радиусом, равным амплитуде дрожания. Но шарик слабее взаимодействует с ядром, чем точечный электрон. В результате энергетические уровни атома слегка сдвигаются по сравнению со значением, вычисленным без учета дрожания. Это явление называется лэмбовским сдвигом, по имени впервые наблюдавшего его экспериментатора Лэмба. Квантовая электродинамика позволила рассчитать лэмбовский сдвиг с огромной точностью. Получилось удивительнейшее совпадение с данными, найденными на опыте.

Еще одно свойство квантового осциллятора — его энергия изменяется порциями величиной $h\nu$, где h — постоянная Планка, а ν — частота колебаний соответствующего классического осциллятора. В применении к электромагнитному полю это означает, что энергия электромагнитного осциллятора с определенной длиной волны λ и частотой $\nu = c/\lambda$ тоже изменяется порциями $h\nu$. Когда энергия волны изменяется на одну порцию, говорят, что появился квант электромагнитного поля. В бегущей электромагнитной волне одновременно с увеличением энергии на величину $h\nu$ увеличивается и импульс на величину $h\nu/c$. Таким образом, в бегущей волне каждый квант имеет энергию $h\nu$ и импульс $p = h\nu/c$. Можно сказать, что квантовое поле описывает набор частиц-фотонов (так называются кванты бегущей электромагнитной волны) с разными энергиями и

импульсами. В этом и состояла гипотеза световых квантов, развитая Эйнштейном за 20 лет до того, как она была доказана квантовой электродинамикой.

В результате квантования поля само собой возникло понятие частицы как характеристики возбуждения электромагнитной волны с определенной длиной. Так была решена проблема дуализма волн-частиц. Удивительная идея — воспринимать частицы как квантовые состояния осцилляторов некоего поля — оказалась на редкость плодотворной. Она пронизывает всю современную теоретическую физику. Поле оказывается первичным понятием, а элементарные частицы возникают в результате его квантования.

Применение квантовой механики к полям, описывающим не фотоны, а другие частицы, например электроны и позитроны или пи-мезоны, приводит к очень похожему результату. В пустоте существуют нулевые колебания электрон-позитронного, пионного и вообще полей всех возможных частиц. Эти нулевые колебания проявляются в том, что в вакууме возникают и исчезают пары «частица — античастица»: электрон — позитрон, нуклон — антинуклон. Вакуум наполнен такими не вполне родившимися, образующимися и исчезающими частицами, они называются «виртуальными» (от латинского *virtue* — возможность). Но стоит в вакууме столкнуться двум нуклонам или электрону с позитроном, как виртуальные частицы могут превратиться в реальные — при столкновениях рождаются новые частицы.

* * *

Мы рассказали лишь о малой части удивительных свойств пустоты. В последние годы стало известно, что в пустоте под влиянием внешних полей или высокой температуры могут происходить переходы в другие состояния, подобно плавлению твердых тел. Но самое замечательное — это нулевые колебания геометрических свойств пространства, которые, возможно, дадут ключ к пониманию связи сил тяготения с другими силами природы.

СУЩЕСТВУЕТ ЛИ ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ДЛИНА?

А. Сахаров

От физики элементарных частиц ученые во всем мире ждут очень важных результатов практического и общеполософского значения, быть может, даже уточнения основных понятий о пространстве, времени и причинности. Таких изменений основных принципов нет оснований ожидать во всех остальных отраслях физики, в которых атомные частицы (электроны, фотоны, ядра) можно рассматривать как заданные. В биофизике, физике молекул и кристаллов, оптике и в большинстве других отраслей физики основные принципы квантовой механики, статистической физики и теории относительности дают твердую надежно проверенную базу для теоретического описания и объяснения наблюдаемых явлений, для новых предсказаний, открытий и практических применений (подобных транзистору, лазеру, электролюминесценции, парамагнитному резонансу, эффекту Мёссбауэра, голографии и т.д.). И мы уверены, что любое явление в этих отраслях может получить исчерпывающее описание на основе известных принципов, быть может, правда, с привлечением более мощных математических средств и новых экспериментальных данных (как это имеет место, например, в последние годы для явлений сверхтекучести и сверхпроводимости).

Но как только физики пытаются объяснить природу массы, заряда и другие свойства самих элементарных частиц, их взаимопреобразования и взаимодействия, возникает впечатление, что в этой области физики известных сейчас основных принципов недостаточно. Экспериментальные исследования с помощью ускорителей элементарных частиц и с использованием «природ-

Из статьи, написанной А.Д.Сахаровым для журнала «Физика в школе» в 1968 году. Опубликовано в «Кванте» в 1991 году.

ных ускорителей» — космических лучей — непрерывно преподносят неожиданности. Только за последние 10 лет открыты десятки новых элементарных частиц с очень причудливыми свойствами, в том числе установлено существование двух «сортов» нейтрино («электронной породы» и «мюонной породы»), а также открыты нарушения симметрии законов природы при зеркальном отражении, при превращении частиц в античастицы и при обращении направлений течения физических процессов. Последнее нарушение симметрии особенно удивительно; оно до сих пор не имеет даже феноменологического описания.

Автор только с некоторой натяжкой может считать себя специалистом по физике элементарных частиц. Тем не менее он отваживается здесь на обсуждение одной из основных проблем в этой области — так называемой проблемы элементарной длины. Речь идет о предполагаемом существовании принципиальной границы применимости основных идей современной науки о пространстве и причинности (т.е. теории относительности и квантовой теории), о необходимости описывать «мелкомасштабные» явления, лежащие за этой гранью, с помощью каких-то новых, еще более абстрактных и глубоких физических идей и математических методов.

В этой статье не будет рассказа о каких-либо новых удивительных открытиях. Основное утверждение, содержащееся в статье, носит в основном негативный характер. Тем не менее автору представляется, что в вопросе о принципиальных основах науки (причем таких незыблемых до сих пор, как понятие длины и интервала времени) любое продвижение вперед и любое уточнение нюансов должно представить интерес не только для специалистов. Поэтому, несмотря на неясность ситуации, автор решил в этой статье рассказать о мучительной драме идей в одном из уголков современной теоретической физики так, как она ему представляется.

Еще до создания квантовой теории, при попытке описания электрона как точечной частицы возникла трудность при вычислении электростатической энергии точечного электрона. Напомним, что электростатическая энергия заряженного по поверхности шарика равна $W = e^2/(2r)$, где e — заряд, а r — радиус. Вообще же при произвольном распределении плотности заряда по радиусу имеем $W \sim e^2/r$. Для точечного электрона $r \rightarrow 0$ и $W \rightarrow \infty$. По соотношению Эйнштейна, энергии W сопоставляется масса покоя $m = W/c^2$, т.е. масса точечного электрона должна быть бесконечна. Если положить $m = e^2/(rc^2)$ и подставить наблюдаемую на опыте массу электрона, то найдем $r = 2,8 \cdot 10^{-13}$ см. Так

определенная величина r называется классическим радиусом электрона.

С возникновением квантовой теории положение осложнилось еще больше. С одной стороны, формулы для электромагнитной энергии электрона при учете квантовой теории изменяются и приводят к гораздо меньшим численным значениям ее при тех же значениях r . По-прежнему остается трудность $W \rightarrow \infty$ при $r \rightarrow 0$, но W пропорционально не r^{-1} , а $\ln(r^{-1})$. С другой стороны, принципиальные трудности рассмотрения электрона как точечной частицы распространяются на другие основные вычисляемые в теории величины — на силу взаимодействия частиц, на вероятность процессов рассеяния и распадов и т.п. Вместе с тем понятие неточечной частицы очень трудно согласовать с принципами теории относительности — ведь по твердому телу протяженной частицы мы смогли бы передавать сигнал со скоростью, большей скорости света.

Возникло предположение, что квантовая теория элементарных частиц логически и математически не полна. Особенно ясно сформулировал (в 30-х годах) это предположение один из создателей квантовой механики выдающийся немецкий физик-теоретик В.Гейзенберг. Ход его мысли сводился к следующему. Трудности теории элементарных частиц, по его мнению, носят глубоко принципиальный характер, они столь же затрагивают основные принципы, как трудности теории электромагнитных явлений в движущихся телах до создания теории относительности и как трудности теории атомных явлений до создания квантовой теории.

Трудности электродинамики не могли быть преодолены без пересмотра и уточнения такого казавшегося самоочевидным понятия, как одновременность. Новые формулы теории относительности — это уже вторичный продукт такого гносеологического пересмотра понятий. Трудности корпускулярно-волнового дуализма потребовали еще более глубоких идей — принципа дополнительности, статистической интерпретации волновой функции. По Гейзенбергу, трудности рассмотрения элементарных частиц как точечных, а также отсутствие в современной теории каких-либо критериев, определяющих численную величину масс и зарядов элементарных частиц, — это все симптомы неполноты и неточности самих понятий о пространстве, времени и причинности для «мелкомасштабных» явлений.

Гейзенберг обращает внимание на то, что теория относительности Эйнштейна отличается от представлений Галилея — Ньютона о пространстве — времени тем, что в ней введена

абсолютная единица скорости, являющаяся в теории Эйнштейна максимальной скоростью распространения взаимодействий и численно равная скорости света в вакууме ($c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с). При скоростях, много меньших c , доэйнштейновские представления правильно отображают действительность. Аналогично грань между квантовой и классической (в смысле «неквантовой») теориями определяется другой основной постоянной, имеющей размерность «энергия \times время», — постоянной Планка \hbar , определяющей коэффициент пропорциональности между разностью энергий двух квантовых уровней и частотой квантового перехода:

$$E_1 - E_2 = \hbar \omega.$$

При измерении ω в угловых единицах рад/с численное значение $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-27}$ эрг \cdot с; сам Планк измерял частоту $\nu = \omega/(2\pi)$ в с⁻¹ и соответственно определил постоянную $h = 2\pi\hbar = 6,6 \cdot 10^{-27}$ эрг \cdot с; определение и обозначение \hbar предложено Дираком. (Физики, как правило, не пользуются системой единиц СИ, а предпочитают систему СГС (первые буквы основных единиц: сантиметр, грамм, секунда). В этой системе эрг — единица измерения энергии (1 эрг = 10^{-7} Дж); если какая-то величина измеряется в единицах, не имеющих специального названия, пишут: единица СГС. — *Прим. ред.*)

Классические представления являются соответствующими действительности при изучении макроскопических процессов, например при исследовании испускания радиоволн антенной, когда испускаемая энергия W гораздо больше энергии одного кванта $\hbar\omega$, и совсем неприменимы при исследовании излучения одного фотона возбужденным атомом.

Гейзенберг обращает далее внимание на то, что трудности квантовой теории элементарных частиц возникают при анализе тех проблем, где существенна передача от одной частицы другой большого импульса или большой энергии, т.е. при очень тесных столкновениях частиц с очень малой длиной волны де Бройля. Поэтому Гейзенберг выдвигает тезис, что при некоторой элементарной длине l_0 , которую он в первоначальном варианте своей гипотезы отождествил с классическим радиусом электрона r , известные нам законы квантовой теории и теории относительности перестают быть справедливыми, необходимо введение новых понятий, еще более абстрактных, чем в этих теориях.

По Гейзенбергу, именно величина l_0 задает также характерный масштаб масс элементарных частиц. Приняв за единицу

массы $\frac{\hbar}{c l_0} = \frac{70 \text{ МэВ}}{c^2}$, мы получаем с хорошей степенью точности массы покоя частиц (таблица составлена по современному списку элементарных частиц): μ -мезона — $3/2$, π -мезона — 2 , K -мезона — 7 , η -мезона — 8 , протона и нейтрона — $13,5$, Λ -гиперона — 16 , Σ -гиперона — 17 , Ξ -гиперона — 19 , электрона — $1/137$, фотона, нейтрино и гравитона — 0 и т.д.

Отвлекаясь несколько в сторону, заметим, что наличие в современной теории двух «естественных» единиц (размерности которых $[c] = \text{длина}/\text{время}$ и $[\hbar] = \text{энергия} \times \text{время}$) приводит к тому, что из трех основных единиц, лежащих в основе любой системы единиц измерения (например, в случае СИ: м, с, кг), лишь одна (например, единица длины L) должна считаться произвольной. Единица времени может быть определена как $T = \frac{L}{c}$, и единица массы — как $M = \frac{\hbar}{Lc}$, единицей энергии будет служить величина $W = \frac{\hbar c}{L}$ и т.д. В работах по теоретической физике обычно принимают $\hbar = c = 1$, измеряя все величины в степенях длины; это очень упрощает формулы, из которых исчезают коэффициенты \hbar и c . Импульс p , масса m и энергия W выражаются в обратных единицах длины, скажем, в см^{-1} . При этом релятивистские формулы для энергии и импульса имеют вид:

$$W = \frac{m}{\sqrt{1-v^2}} = \sqrt{m^2 + p^2}, \quad p = \frac{mv}{\sqrt{1-v^2}}.$$

Магнитный момент выражается в единицах длины или обратных единицах массы. Например, магнитный момент электрона (так называемый нормальный момент, или магнетон Бора — см. ниже) равен $e/(2m)$. Аналогично выражаются все остальные физические величины. Пользование этой «одномерной» системой единиц удобно, если в качестве единицы массы или длины выбирать величину, характерную для исследуемой проблемы. После этого отступления возвратимся к идеям Гейзенберга.

В то время, когда Гейзенберг выдвигал свои идеи, список элементарных частиц включал только электрон (и его античастицу — позитрон), протон, нейтрон и фотон. Сейчас список расширился до нескольких десятков частиц. Добавились μ -мезон и нейтрино двух «сортов», которые вместе с электроном и соответствующими античастицами образуют семейство слабо взаимодействующих частиц, или лептонов. Открыт также ряд новых, сильно взаимодействующих частиц; те из них, которые

обладают очень малым временем жизни, получили название частиц-резонансов (пример: η -мезон в приведенной выше таблице). Сильно взаимодействующие частицы, или адроны, распадаются на две большие группы — так называемые барионы, родственные по своим свойствам протону и нейтрону (долгоживущие барионы Λ , Σ , Ξ получили название гиперонов), и так называемые мезоны, типичными представителями которых являются ответственные за ядерные силы π -мезоны и ρ -мезоны, а также приведенные в таблице K - и η -мезоны.

Сейчас уже нет оснований предполагать, что массы всех тех частиц, которые существуют в природе, обязательно порядка $1/l_0 = 70$ МэВ (положив $\hbar = c = 1$, мы используем здесь 1 МэВ в качестве единицы не только энергии, но и массы, импульса и обратной длины). Например, есть все основания предполагать, что существуют частицы (вероятно, не стабильные) с гораздо большими массами. Таким образом, этот «эмпирический» аргумент в пользу принятого Гейзенбергом численного значения величины элементарной длины сейчас вряд ли убедителен. Не убедителен также аргумент, связанный с классической оценкой электромагнитной массы, в силу упомянутого нами выше уменьшения этой величины в квантовой теории. Это обстоятельство представляется нам особенно существенным.

Гейзенберг предполагал, что в законах взаимодействия элементарных частиц при энергиях, больших чем $1/l_0 = 70$ МэВ, должны наблюдаться разительные отклонения от современной теории. На первых порах когда в космических лучах были открыты частицы с большой проникающей способностью, возникло предположение, что это электроны, которые обладают высокой энергией и поэтому «не подчиняются» квантовой электродинамике. Но вскоре оказалось, что это просто частицы с массой в 200 раз большей (их назвали μ -мезонами), и именно это «тривиальное» обстоятельство объясняет их проникающую способность. Сейчас не известно никаких явлений, которые можно было бы с уверенностью интерпретировать как явное нарушение современной теории. Остановимся на этом важном обстоятельстве подробнее.

В современной физике известно 4 типа взаимодействий:

1. «Сильные» взаимодействия, типичным примером которых являются ядерные силы.
2. Электромагнитные взаимодействия.
3. «Слабые» взаимодействия, ответственные за процессы β -распада.
4. Гравитационные взаимодействия.

Наиболее полная количественная теория и наиболее полные экспериментальные данные существуют для электромагнитных взаимодействий, поэтому именно здесь имеется самое подходящее поле для попыток обнаружить отклонения от современной теории. До сих пор все такие попытки дали отрицательный результат. Мы опишем некоторые из них, так как в таком важном вопросе даже и негативный результат представляется очень важным; анализ точности экспериментов дает оценку для возможной грани справедливости современных представлений. Вместе с тем этот вопрос имеет многообразные связи с другими разделами современной физики и представляет самостоятельный интерес.

На сегодня самым изученным из электромагнитных свойств элементарных частиц является магнитный момент. По предположению, высказанному в 1925 году Уленбеком и Гаудсмитом, электрон подобен маленькому волчку — обладает механическим моментом вращения, численно равным $1/2$ (в единицах \hbar), и, кроме того, обладает магнитным дипольным моментом, равным $e/(2m)$. Это предположение получило многочисленные подтверждения в спектроскопии и при изучении магнитных явлений. В дальнейшем выдающийся английский физик Дирак показал, что предположение Уленбека и Гаудсмита совместимо с описанием электрона как точечной заряженной частицы, подчиняющейся уравнениям теории относительности и квантовой теории.

Однако в 30-е годы оказалось, что магнитный момент протона в 2,9 раза больше, чем $e/(2m_p)$, где m_p — масса протона. Более того, советские теоретики Тамм и Альтшулер предсказали, а американский ученый Альварес обнаружил на опыте наличие магнитного момента у нейтрона, который электрически нейтрален и, согласно приведенной формуле, должен быть лишен магнитного момента. Сейчас принято величину $\mu_0 = e/(2m)$ называть нормальным магнитным моментом, а все, что сверх этого, — аномальным. Аномальный момент у протона и нейтрона обусловлен, по современным представлениям, их внутренней структурой, однако теория этого эффекта отсутствует, как, впрочем, вообще теория сильно взаимодействующих частиц.

До 1947 года считалось, что у электрона нет аномального момента. Однако изучение энергии взаимодействия магнитного момента электрона с магнитным моментом протона (эта энергия ответственна за излучение линии с длиной волны $\lambda = 21$ см космическим атомарным водородом, в развитии радиоастрономии исследования излучения с этой длиной волны играют

важную роль) привело к определенным неувязкам. Поэтому американский теоретик Брейт предположил, а вскоре американские экспериментаторы Каш и Фолли обнаружили на опыте наличие у электрона очень малого аномального магнитного момента. Относительная величина аномального момента составляет около $1,2 \cdot 10^{-3}$. Теория аномального магнитного момента была создана выдающимся американским ученым Швингером в 1948 году в результате достигнутых в те годы им (а также независимо Томонагой, Бете, Крамерсом, Фейнманом, Дайсоном и другими) крупных успехов в усовершенствовании математического аппарата квантовой электродинамики.

Согласно Швингеру, величина относительного аномального момента равна

$$a = \frac{\mu - \mu_0}{\mu_0} = \frac{e^2}{2\pi} = 1,16 \cdot 10^{-3}$$

и обусловлена взаимодействием электрона или μ -мезона с электромагнитными квантовыми флуктуациями (нулевыми колебаниями) вакуума.

В квантовой теории поля вакуум — это не просто пустота. Как известно, квантовая теория вводит для каждой системы понятие об энергетических уровнях (гипотеза Бора). Распространение этой идеи на вакуум дает интерпретацию фотона как возбужденного состояния одной из электромагнитных колебательных степеней свободы вакуума. Основное состояние каждой степени свободы соответствует отсутствию фотона с данной длиной волны, при этом среднее квантово-механическое значение электрического поля в каждый момент времени равно нулю, однако поле есть, так как амплитуда поля, соответствующая данной степени свободы, не может тождественно обращаться в нуль и испытывает квантовые нулевые колебания (квантовые флуктуации), образуя «облако вероятности», около среднего (равновесного) значения. Полная энергия взаимодействия заряженной частицы с нулевыми колебаниями вакуума складывается из взаимодействия с нулевыми колебаниями различных длин волн, изменение этой энергии при наличии «внешнего» магнитного поля интерпретируется, по Швингеру, как обусловленное аномальным магнитным моментом.

Энергия взаимодействия электрона с нулевыми колебаниями вакуума может быть представлена интегралом по возможным значениям импульса p (обратной длины волны) этих колебаний (p_0 — предполагаемая граница существующих представлений) и

пропорциональна

$$m_{эл} \sim e^2 \int_0^{p_0} dp \frac{m}{\sqrt{p^2 + m^2}} \approx \int_m^{p_0} e^2 m \frac{dp}{p} = me^2 \ln \frac{p_0}{m}.$$

При наличии магнитного поля напряженностью H подынтегральное выражение изменяется на величину, пропорциональную $e^2 H/p^2$ (по соображению размерности). Отсюда изменение энергии электрона в магнитном поле, которое мы в согласии с идеей Швингера приравняем $\mu - \mu_0$, пропорционально $me^3 H \int_m^{p_0} \frac{dp}{p^3}$.

Таким образом,

$$\mu - \mu_0 \sim me^3 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{p_0^2} \right)$$

(множитель пропорциональности, по Швингеру, равен $1/(4\pi)$). В приведенной выше формуле Швингера

$$\mu - \mu_0 = \frac{e^2}{2\pi} \mu_0 = \frac{e^2}{4\pi m},$$

т.е. опущен множитель $1 - \frac{m^2}{p_0^2}$, что соответствует $p_0 \rightarrow \infty$. При $p_0 \neq \infty$ имеем поправки к аномальному моменту, пропорциональные m^2/p_0^2 . Обозначая через $a_{теор}$ теоретическое значение, вычисленное Швингером и другими теоретиками, которые уточнили его оценку в рамках современной теории, имеем по порядку величины

$$\delta = \frac{a - a_{теор}}{a_{теор}} \approx \frac{m^2}{p_0^2}, \text{ или } p_0 = \frac{m}{\sqrt{\delta}}.$$

Из этой формулы видно, что наиболее «перспективным» объектом для изучения отклонений от квантовой электродинамики является самая тяжелая из известных сейчас частиц, аномальный момент которых носит флуктуационный характер, а именно μ -мезон (замечание советского физика Берестецкого).

Первоначальные эксперименты, приведшие к обнаружению аномального момента у электрона, были проведены методом молекулярных пучков. Создание этого метода, восходящего еще к классическому опыту Штерна — Герлаха, в значительной мере заслуга американского физика Раби. Однако наиболее точные определения величины a (с относительной точностью $\delta = 2 \cdot 10^{-5}$ для электрона и $\delta = 4 \cdot 10^{-3}$ для μ -мезона) были выполнены много позднее в ряде американских лабораторий по

другому методу. В этих опытах было найдено, что $a = 1,162 \cdot 10^{-3} \pm 0,004 \cdot 10^{-3}$ (результаты приведены для μ^+ -мезонов, аналогичные результаты найдены Фарли и Брауном для μ^- -мезонов). Теоретическое значение $a_{\text{теор}}$ со всеми известными поправками равно $1,1654 \cdot 10^{-3}$, т.е. совпадает с экспериментальной величиной в пределах ошибок измерения. Значит, величина $\delta = \frac{a - a_{\text{теор}}}{a_{\text{теор}}}$, определенная выше, безусловно меньше чем $4 \cdot 10^{-3}$.

Таким образом, квантовая электродинамика безусловно справедлива для энергий и импульсов, меньших чем $p_0 = \frac{m}{\sqrt{4 \cdot 10^{-3}}}$, т.е. для энергий и импульсов, меньших нескольких ГэВ.

Другой метод проверки квантовой электродинамики сводится к изучению столкновений электронов с электронами и электронами с позитронами в так называемых встречных пучках. Почему нужны именно встречные пучки? Теория относительности объединяет вектор импульса \vec{p} и энергию частицы W в так называемый четырехмерный вектор. Трехмерные векторы обладают тем свойством, что их скалярное произведение сохраняется при вращениях трехмерных координатных осей. Однако при более общих «лоренцевских» преобразованиях системы отсчета, учитывающих возможность не только поворота осей, но и перехода к другой инерциальной системе, инвариантом является лишь более общая величина — четырехмерное скалярное произведение Эйнштейна — Минковского. Для двух сталкивающихся частиц четырехмерное скалярное произведение векторов энергии — импульса имеет вид

$$I = W_1 W_2 - p_{1x} p_{2x} - p_{1y} p_{2y} - p_{1z} p_{2z}.$$

Очевидно, что все качественные утверждения теории, в частности эффекты отклонения от современной теории, могут зависеть лишь от инвариантной величины. Находим, что при столкновении покоящегося электрона ($p_1 = 0$) с электроном, имеющим импульс $\vec{p}_2 = \vec{p}$,

$$I_1 = m \sqrt{m^2 + p^2},$$

а в случае встречных пучков электронов с импульсами $\vec{p}_1 = \vec{p}$ и $\vec{p}_2 = -\vec{p}$

$$I_2 = m^2 + 2p^2.$$

Если $p = 10^3 m$ (энергия 500 МэВ), то $I_2 = 2 \cdot 10^3 I_1$. Из сравнения этих значений I_1 и I_2 ясно преимущество встречных пучков.

Опыты со встречными пучками в Советском Союзе проводятся в Новосибирске под руководством Будкера и являются весьма перспективными. В этих опытах тоже (в пределах точности эксперимента) не обнаружено отклонения от современной теории.

Итак, совокупность теоретических и экспериментальных аргументов заставляет признать, что предположенная Гейзенбергом граница теории $l_0 = r$ должна быть отодвинута в сторону гораздо более высоких энергий. Этот результат, хотя и негативный, представляется очень важным для современной физики элементарных частиц.

Еще очень давно американский физик Вигнер обратил внимание, что само понятие измерения очень малых интервалов длины и времени ($\Delta x \leq L_0 = 10^{-11}$ см, $\Delta t \leq \frac{L_0}{c} = 10^{-11}$ с) встречает принципиальные трудности, если учитывать гравитационные явления и одновременно эффекты квантовой теории.

Расстояние и интервал времени между любыми двумя точками пространства Эйнштейна — Минковского (т.е. между двумя «событиями») должны испытывать квантовые флуктуации, нулевые квантовые колебания, как и все иные физические величины. В этом отношении гравитационное поле не может качественно отличаться от электромагнитного и любого другого. Заметим, что оценка величины L_0 может быть получена из соображений размерности. В свое время Планк указал, что с использованием численного значения гравитационной постоянной $G = 6,67 \cdot 10^{-8}$ ед. СГС, постоянных \hbar и c можно построить систему «естественных» единиц для всех величин (т.е. от «одномерной» системы единиц, описанной выше, перейти к «нульразмерной» системе единиц). А именно, единицу длины L_0 можно определить, как

$$L_0 = G^{1/2} \hbar^{1/2} c^{-1/2} = 1,61 \cdot 10^{-33} \text{ см.}$$

Соответственно единица времени

$$T_0 = \frac{L_0}{c} = G^{1/2} \hbar^{1/2} c^{-3/2} = 5,35 \cdot 10^{-44} \text{ с.},$$

единица энергии

$$W_0 = \frac{\hbar}{T_0} = G^{-1/2} \hbar^{1/2} c^{1/2} = 2 \cdot 10^{16} \text{ эрг} = 10^{28} \text{ эВ.}$$

единица массы

$$M_0 = \frac{W_0}{c^2} = G^{-1/2} \hbar^{1/2} c^{-5/2} = 2,18 \cdot 10^{-5} \text{ г.}$$

Вигнеровские соображения, о которых мы упоминали, как раз и приводят к выделению величин L_0 , T_0 как граней представлений о пространстве и времени. Ряд ученых, в том числе советский ученый Компанец, указали, что принятие величины L_0 в качестве эффективного радиуса электрона в квантовой электродинамике не приводит к слишком большой величине электромагнитной массы (как это было бы в классической электродинамике), если использовать получающуюся в квантовой электродинамике пропорциональность электромагнитной массы величине $\ln(r^{-1})$. Недавно другой советский ученый Марков высказал гипотезу, что величина L_0 (и связанная с ней величина $M_0 = \frac{1}{L_0}$) определяет также максимальную возможную массу элементарных частиц: соответствующие частицы он назвал «максимонами». Как известно, при образовании стабильных частиц из составных частей, которые могут быть сами нестабильными, происходит уменьшение суммарной массы («дефект» массы в виде малой поправки к закону Проута, проявляющейся в ядерной физике). Поэтому нас, по Маркову, не должно удивлять, что наблюдаемые стабильные частицы (электроны, протоны и др.) гораздо меньше по массе, чем «естественная» единица массы $M_0 \approx 2 \cdot 10^{-5}$ г.

Сейчас все больше физиков склоняются к тому, что именно грань L_0 определит наиболее существенные перемены в наших представлениях.

Все же очень важно убедиться, что никакая промежуточная между $r = 2,8 \cdot 10^{-13}$ см и $L_0 = 1,61 \cdot 10^{-13}$ см характерная длина не играет столь же фундаментальной роли. Здесь есть пока только весьма косвенные теоретические аргументы. Вот один из таких аргументов. Он относится к анализу основ общей теории относительности.

Как известно, движение материальных тел в поле тяготения описывается в теории Эйнштейна как движение по кратчайшей линии в «искривленном» пространстве — времени. «Искривление» пространства — времени приводит к тому, что кратчайшей длиной обладают не «прямые», а «кривые» линии пространства — времени вида

$$x = f_1(t), \quad y = f_2(t), \quad z = f_3(t),$$

где f_1 , f_2 , f_3 не есть линейные функции.

В теории Эйнштейна величина искривления пространства находится из условия, которое качественно можно описать так. В окрестностях тел, обладающих массой (или, что то же самое,

энергией), на пространство действует искривляющая «сила» (конечно, слово «сила» здесь используется в некотором обобщенном смысле). В то же время пространство обладает свойством «упругости», оно как бы препятствует своему искривлению. Равновесие этих двух «сил» определяет истинную степень кривизны. Обычно отклонения свойств пространства от свойств, описываемых геометрией Евклида, очень малы, т.е. «упругость» пространства очень велика.

Чем же определяется «упругость» вакуума? Можно предполагать, что изменением квантовых флуктуаций вакуума. Мы уже говорили о флуктуациях вакуума в связи со швингеровской теорией аномального магнитного момента. Так вот, при искривлении пространства — времени этим флуктуациям становится «более тесно», они как бы «выходят из берегов», что приводит к увеличению энергии вакуума. Формально этот эффект бесконечен, если учитывать самые «коротковолновые» флуктуации. Величина гравитационной постоянной, обратно пропорциональная «коэффициенту упругости пространства», имеет правильное численное значение, если ограничиться флуктуациями с длиной волны λ , большей чем $L_0 \sim 10^{-33}$ см. Будущее покажет, правильно ли это.

Ну, а что за гранью L_0 ? Какие изменения следует внести в теорию (и следует ли вносить вообще!) для описания процессов на расстояниях, меньших чем 10^{-33} см, и при энергиях частиц, больших чем 10^{28} эВ? Этого пока никто не знает. Вероятно, нужно согласиться с теми, кто предполагает, что следует ожидать глубоко принципиальных изменений. Энергия 10^{28} эВ настолько далека от реально изучаемого сейчас диапазона (энергия Серпуховского ускорителя $7 \cdot 10^{10}$ эВ), что окончательное выяснение этого комплекса проблем может оказаться делом не очень близкого будущего.

ЗАЧЕМ МЫ ЗИМОЙ ИСПОЛЬЗУЕМ ОТОПЛЕНИЕ?

В. Фабрикант

Заметку с таким названием опубликовал в 1938 году немецкий астрофизик Р. Эмден в английском журнале «Nature» («Природа»). Это своеобразный журнал, где оригинальные научные работы (а некоторые из них удостоиваются впоследствии Нобелевских премий) публикуются совместно с популярными статьями, написанными на различные темы.

Хотя заметка Эмдена и была популярной, она все же не прошла незамеченной: выдержки из нее и ее обсуждение можно найти в шестом томе курса теоретической физики А. Зоммерфельда — видного физика-теоретика, много сделавшего для развития боровской теории строения атома. Вот что пишет Эмден в своей заметке: «На вопрос, почему мы топим зимой, неспециалист ответит: чтобы сделать комнату теплее; знаток термодинамики выразится, возможно, следующим образом: чтобы подвести недостающую энергию. В таком случае правым окажется профан, а не ученый». Разберемся, почему так.

Специалист имеет в виду внутреннюю энергию воздуха, которым заполнены наши дома, а в условиях, типичных для жилых помещений, воздух ведет себя как идеальный газ (точнее говоря, как смесь идеальных газов). Энергия идеального газа пропорциональна абсолютной температуре T и количеству вещества, а значит, и массе газа m . Поэтому для внутренней энергии воздуха можно написать

$$U = amt, \quad (1)$$

где a — некоторая постоянная.

Теперь становится очевидной та ошибка, которую допустил ученый. Он забыл, что в данной ситуации масса воздуха m

Опубликовано в «Кванте» в 1987 году.

является функцией температуры. И действительно — жилое помещение не изолировано от внешнего мира; при протапливании воздух, нагреваясь, расширяется и частично выходит сквозь щели и поры в стенах наружу. Чтобы определить зависимость m от T , воспользуемся уравнением Менделеева — Клапейрона для идеального газа

$$pV = \frac{m}{M} RT, \quad (2)$$

где M — молярная масса воздуха, R — универсальная газовая постоянная. Объем помещения V у нас не изменяется, давление p остается постоянным, равным внешнему давлению воздуха. Следовательно, правая часть уравнения (2) также должна, несмотря на изменение температуры, сохранять постоянное значение. Это возможно только при условии постоянства произведения mT .

Заметим, что обычно уравнение Менделеева — Клапейрона применяется в случаях, когда масса m фиксирована. В рассматриваемой нами задаче это условие не выполняется и, согласно уравнению (1), внутренняя энергия воздуха при постоянстве произведения mT должна оставаться неизменной. Увеличение средней кинетической энергии отдельной молекулы компенсируется уменьшением числа молекул.

Температура воздуха в помещении влияет на температурный режим работы человеческого тела. Слишком низкая температура вызывает сильное переохлаждение организма, в результате чего затрудняется протекание химических реакций, которые обеспечивают обмен веществ.

Будучи астрофизиком, Эмден не мог не вспомнить о роли Солнца как своеобразной «печки», что греет Землю своим излучением. Хотя Земля почти всю энергию, полученную от Солнца, излучает обратно в мировое пространство, оставшейся части энергии, которая, видоизменяясь, переходит в окружающую среду, вполне хватает, чтобы поддерживать на поверхности Земли необходимую для жизни температуру. Мощность солнечной энергии, падающей на единицу площади земной поверхности, определяет уровень температуры T (чем объясняется смена времен года и наличие климатических поясов), а тепло недр Земли составляет тысячные доли от тепла солнечных лучей, и его совершенно недостаточно для поддержания жизни. Поэтому опасность ядерной войны, по современным подсчетам ученых, состоит не только в разрушениях и непосредственном воздействии взрывов на живые организмы, но и в возникновении

«ядерной зимы» — ведь многочисленные пожары вызовут огромные тучи копоти и сажи, которые будут непроницаемы для солнечных лучей. Эти тучи окутают всю Землю, независимо от того, где возникнет «пожар» ядерной войны. Солнечное «отопление» Земли окажется выключенным, и на Земле наступит ледниковый период.

Но вернемся к проблемам отопления жилых помещений. В уравнениях (1) и (2) фигурирует температура в кельвинах. Абсолютная шкала температур названа шкалой Кельвина в честь английского физика У. Томсона, получившего за большие заслуги в области науки и техники титул лорда Кельвина. Титул был выбран по названию реки, на берегу которой стоит университет Глазго. В этом университете Томсон преподавал физику пятьдесят лет. Примечательно, что в семейном кругу шутливо обсуждались и другие варианты титула — лорд Кабель или лорд Компас. Они отражали две заслуги Томсона: он участвовал в создании первого трансатлантического кабеля из Америки в Англию в 1866 году и внес радикальные усовершенствования в конструкцию компасов для морских судов. Поэтому неудивительно, что, занимаясь разработкой основ термодинамики, Томсон задумался над рациональностью нашей системы отопления. В 1852 году он опубликовал работу, в которой показал, что использование так называемых тепловых насосов в несколько раз выгоднее обычных отопительных устройств. В тепловых насосах, которые работают по принципу холодильной машины, энергия затрачивается на перевод тепла от более холодного наружного воздуха к более теплomu воздуху в помещении.

Идеи Томсона долгие годы не получали развития и практического применения. В 1920 году на первом съезде советских физиков профессор В.А. Михельсон, известный своими работами в области теории теплового излучения, сделал доклад «О динамическом отоплении», в котором в значительной степени развил и дополнил идеи Томсона. Михельсон предложил использовать в тепловых насосах процессы испарения и конденсации рабочего вещества, что и делается в современных конструкциях. За последние десятилетия началось довольно широкое применение тепловых насосов для отопления. В частности, зимой прошлого года в ялтинском пансионате «Дружба» начала работать отопительная теплонасосная установка, где тепло извлекается из морской воды с температурой 8 °С. Так что согреться можно и с помощью холода.

Приложение к журналу «Квант» №2/96

**СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА —
ИЗ ПЕРВЫХ РУК**

Составитель *А.И. Черноуцан*

Редактор *В.А. Тихомирова*

Литературный редактор *Л.В. Кардаевич*

Технический редактор *Е.В. Морозова*

Компьютерная группа

М.Н. Грицук, Е.А. Митченко, Е.В. Титова

ИБ № 17

Формат 84×108/32. Бум. офс. нейтр.

Гарнитура кудряшевская. Печать офсетная.

Заказ 1954.

**117296 Москва, Ленинский пр., 64а,
«Квант»**

**Отпечатано на Ордена Трудового Красного Знамени
Чеховском полиграфическом комбинате
Комитета Российской Федерации по печати
142300 г. Чехов Московской области
Тел. (272) 71-336, факс (272) 62-536**

ВЫШЛИ ИЗ ПЕЧАТИ
ПРИЛОЖЕНИЯ К ЖУРНАЛУ «КВАНТ»

1. Материалы вступительных экзаменов. Задачи по математике и физике
2. Физический калейдоскоп, или Фрагменты из жизни замечательных людей, идей и понятий
3. Школа в «Кванте». Арифметика и алгебра
4. Школа в «Кванте». Алгебра и анализ
5. Школа в «Кванте». Геометрия
6. Практикум абитуриента. Механика
7. Практикум абитуриента. Молекулярная физика, оптика, квантовая физика
8. Практикум абитуриента. Молекулярная физика, оптика, квантовая физика
9. Школа в «Кванте». Физика 9 — 11. Выпуск 1
10. Школа в «Кванте». Физика 9 — 11. Выпуск 2
11. Московские математические олимпиады 60 лет спустя
12. Практикум абитуриента. Алгебра и тригонометрия
13. Практикум абитуриента. Геометрия. Выпуск 1 (Планиметрия)