

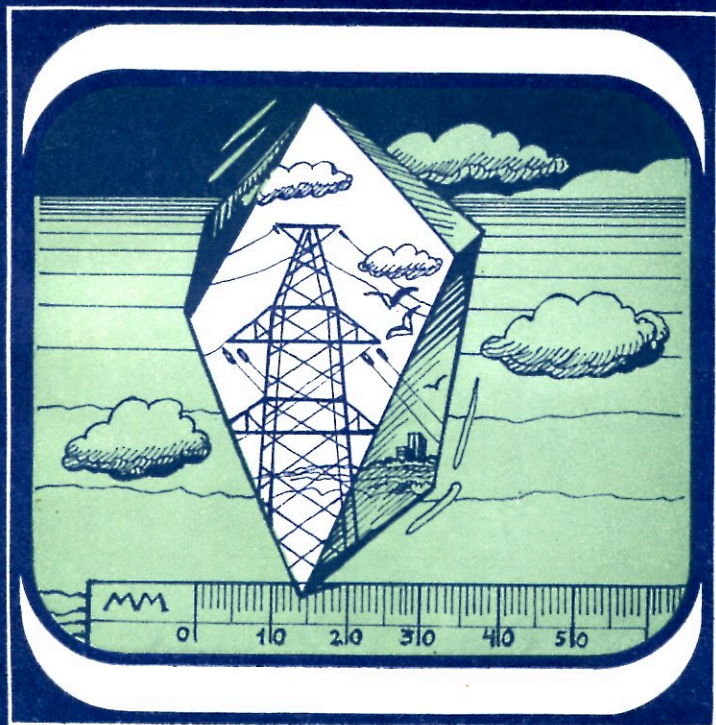
ФИЗИКА

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



М.И. Каганов

МИКРО... И МАКРО...



ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

ФИЗИКА

2/1986

Издается ежемесячно с 1967 г.

М. И. Каганов

МИКРО... И МАКРО...

(МЕТОДОЛОГИЯ КОНКРЕТНОГО ЗНАНИЯ,
ЧЕМУ УЧИТ КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ
КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ)



Издательство «Знание» Москва 1986

ББК 22.31

К 12

КАГАНОВ Моисей Исаакович — доктор физико-математических наук, профессор, старший научный сотрудник Института физических проблем АН СССР,

Рецензент: **Болотовский Б. М.** — доктор физико-математических наук,

Каганов М. И.

К 12 Микро... и макро... (Методология конкретного знания. Чему учит квантовая теория конденсированного состояния).— М.: Знание, 1986.— 64 с.— (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Физика»; № 2).

11 к.

В брошюре популярно рассказано об идеях и принципах современной квантовой теории твердого тела. На большом числе примеров показано, что для построения микроскопической теории макроскопических свойств конденсированных систем необходимо вводить принципиально новые понятия. Одно из таких понятий — квазичастица квант элементарного возбуждения в твердом теле.

Брошюра рассчитана на научных работников, лекторов, слушателей и преподавателей народных университетов.

1704020000

ББК 22.31
530.1

© Издательство «Знание», 1986 г.

Что значит знать? Вот, друг мой, в чем вопрос.

В. Гёте

Мы диалектику учили не по Гегелю...

В. В. Маяковский

1. ПРИГЛАШЕНИЕ К РАЗГОВОРУ

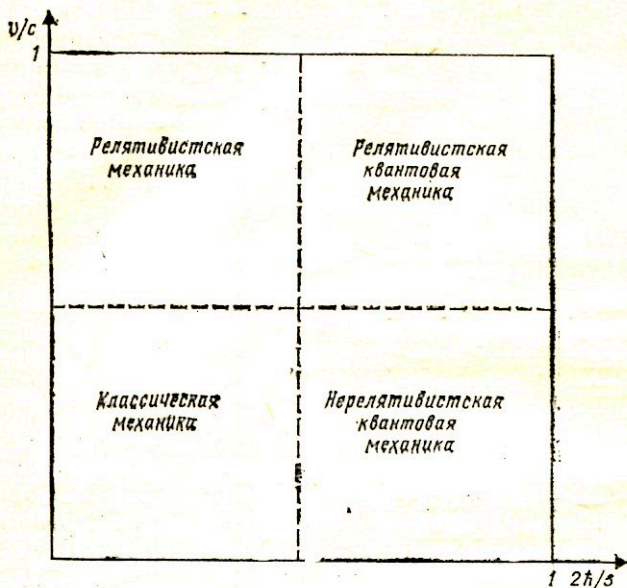
Стало трюизмом утверждение о том, что размеры познанного мира огромны. И все же постараемся осмыслить познанную область, подкрепляя слова известными численными соотношениями и примерами.

При движении в глубь материи мы сталкиваемся с непознанными еще основными законами движения только тогда, когда пытаемся понять структуру нуклонов, мезонов — того, что еще недавно считалось элементарными частицами. Размер нуклона 10^{-13} см, он в 100 тысяч раз меньше атома. А при изучении макрокосма сигналы, требующие для своей расшифровки пересмотра основных представлений о структуре вещества, приходят из баснословно удаленных областей пространства. Сигналы-загадки движутся от момента зарождения до момента попадания в прибор 10^{10} и более лет! Представим себе эту огромную область пространства, заполненную познанной материей. В ней, правда, есть миллиарды «белых» пятен (по оценкам $\sim 10^{42}$), к которым приковано внимание тех, кто пытается проникнуть в структуру элементарных частиц. Число 10^{42} не должно вселять мистический ужас: все однотипные элементарные частицы тождественны. Осознание структуры одной из них ликвидирует все «белые пятна».

Так как сигналы распространяются с конечной скоростью, то утверждение о познанности материи в области с размерами 10^{10} световых лет означает, что мы умеем проникать в историю неорганической материи на глубину 10^{10} лет.

О степени познанности мы будем говорить ниже. Зададим себе вопрос: можно ли пытаться изобразить познанный мир, нарисовать картину мира?

Известная человечеству картина мира неизвестна ни одному человеку. Наиболее глубоко образованные люди не знакомы со всей картиной (энциклопедистов больше



нет), в лучшем случае они знают, что где нарисовано (или написано), т. е. какая наука «ответственна» за те или другие явления, и представляют себе исходные положения различных подходов к изучению природы. И все же картину науки нарисовать можно. Точнее, не картину, а планшет, воспользовавшись тем, что, во-первых, основа основ всех наук о Природе — механика (классическая или квантовая), наука о движении частиц и тел, а во-вторых, существует уверенность: частица не может двигаться со скоростью v , превышающей скорость света в пустоте $c \approx 3 \cdot 10^{10}$ см/с, а действие¹ S частицы не может быть меньше, чем $h/2$ (h — знаменитая постоянная Планка, равная 10^{-27} эрг·с). Тогда все движения «размещаются» в квадрате 1×1 (см. рисунок), вне которого нет ничего.

Надписи внутри частей квадратов должны напоминать о тысячах томов, посвященных детальному исследованию

¹ Действие — характеристика движения частицы, играющая важную роль в классической и квантовой механике. Действие приблизительно равно произведению размеров траектории частицы на ее импульс. Согласно законам квантовой механики действие частицы, совершающей финитное движение, квантуется; оно равно целому или полужелому числу «квантов действия» h .

дованию разнообразнейших движений и свойств материи. Три субквадрата включают логически совершенные и в этом смысле законченные науки. В четвертом (в правом верхнем), содержащем релятивистскую квантовую механику, буквально ежегодно происходят революционные преобразования, пересматриваются основные представления: кварки сменяют партоны, квантование пространства-времени заменяется релятивистскими струнами и мешками, возникает и развивается хромодинамика, объясняется ненаблюдаемость кварков в свободном состоянии.

Чаще всего, когда речь идет о познании мира, о физике как о питательной среде гносеологии, внимание и физиков и философов обращается на ту область физики, которая в данный момент сотрясается революционными катаклизмами. В начале века это — теория относительности и квантовая механика; сегодня — релятивистская квантовая механика (или, что то же, теория элементарных частиц) и астрофизика с ее обостренным интересом к первым мгновениям существования Вселенной в ее нынешнем воплощении. Не стремясь отвлечь внимание от той области, где граница между познанным и непознанным особенно отчетлива, мы хотим сформулировать гносеологическое различие разных областей физики, подчеркнув особую роль современной квантовой физики макромира.

2. ИЗВЕСТНЫ ЛИ НАМ ЗАКОНЫ ПРИРОДЫ?

Казалось бы, мы только что довольно подробно очертили область познанного. И все же постараемся, если возможно, уточнить сформулированный вопрос. Что означают сами слова «познать», «понять»? Давайте упростим вопрос, несколько приземлим его. Спросим себя: «Понятны ли наблюдаемые явления природы?» Естествен ответ: «Нет!» Ведь ежедневно (буквально) открываются все новые и новые явления, иногда они понятны в момент открытия (это значит: теория предшествовала эксперименту), но чаще проходит какое-то время, прежде чем приходит понимание. Сверхпроводимость была открыта в 1911 году и только через 45 лет получила объяснение. И то нет уверенности, что объяснение исчерпывающее: создавая новый сплав, экспериментаторы не могут предсказать, будет он сверхпроводником или нет.

Только измерив сопротивление сплава или его магнитные свойства, фактически обнаружив или не обнаружив переход в сверхпроводящее состояние, можно причислить новый сплав к сверхпроводникам или к нормальным металлам. Более того, теория сверхпроводимости не может пока ответить на насущный вопрос техники: как создать, а если невозможно, то почему, высокотемпературный сверхпроводник?

И все же наверняка почти любой физик, занятый макрофизикой, удивится, если к нему обратятся с вопросом о познании и (или) непознании законов природы. И разъяснит: практически всегда известно, что объяснение существует или должно существовать, но еще не найдено. Пусть открыли то или другое новое, неожиданное (даже!) свойство твердого тела: особый ход сопротивления с магнитным полем, или поглощение света в непривычном диапазоне длин волн, или что-нибудь другое. Придется подумать, покопаться в разных вариантах теорий, описывающих поведение электронов проводника в электрическом и магнитном полях, или перебрать различные механизмы, ответственные за поглощение света — и выяснится, что какой-то вариант поведения электронов не был ранее учтен или какой-то механизм, который почти всегда был несущественным, именно в данной (новой!) ситуации оказался определяющим.

И что наиболее важно для нашего рассказа, объяснение не потребовало ломки основных представлений, тех представлений, с помощью которых построен планшет науки² (см. рисунок). У ученых-естественников есть четкое ощущение, какое явление к какому разделу науки относится. И вполне реалистичен такой обмен репликами:

— Вы ищете по-настоящему непознанные явления и свойства?

— Да!

— Вам надо спрашивать не у физиков, занятых ис-

² Естественно, деление представлений на основные и неосновные условно. Так как слово «неосновной» несет на себе какой-то презрительный оттенок, то уточним: основными представлениями здесь называются те, которые относятся к законам движения и взаимодействия отдельных частиц. Даже это уточнение не всегда, как мы убедимся, поможет избежать некоторой семантической неточности.

следованнем твердых тел или жидкостей, а у тех, кто занят исследованиями элементарных частиц при больших энергиях³ или у астрофизиков...

Вот наиболее резкая формулировка сказанного. Она принадлежит Р. Фейнману: «Если бы в результате какой-то мировой катастрофы все накопленные научные знания оказались бы уничтоженными и к грядущим поколениям живых существ перешла бы только одна фраза, то какое утверждение, составленное из наименьшего количества слов, принесло бы наибольшую информацию? Я считаю, что это — атомная гипотеза (можете называть ее не гипотезой, а фактом, но это ничего не меняет): *все тела состоят из атомов — маленьких телец, которые находятся в непрерывном движении, притягиваются на небольшом расстоянии, но отталкиваются, если одно из них плотнее прижать к другому.* В одной этой фразе... содержится невероятное количество информации о мире, стоит лишь приложить к ней **немного** **воображения** и **чуть** **соображения**» (Фейнмановские лекции по физике. Т. 1. М., Мир, 1968, с. 23).

Слова, напечатанные полужирным шрифтом, выделили мы. Из цитаты ясно: автор считает, что в результате катастрофы не была потеряна информация о законах движения отдельных атомов и что, владея ею, сравнительно просто построить картину свойств макрообъектов. Мы еще будем спорить с несколько пренебрежительным отношением к пути познания от микро- к макро-. С фейнмановскими «немного» и «чуть».

Все же мы опять пришли к чудовищно огромной познающей области... Правда, по сути, не познанной, но познаваемой. Познаваемой не в общепhilosophическом смысле слова, а в конкретно физическом. Последнее означает, что нам не придется производить ревизию основ для объяснения наблюдаемых свойств объектов, заполняющих эту область: ядер атомов и их электронных оболочек, кристаллов и аморфных твердых тел, жидкостей и плазмы, звездных и планетных систем, галактик и т. д. и т. п. Это не значит, что мы всё знаем об элементарных частицах, т. е. о том, из чего состоят

³ Только энергичные частицы, проникая друг в друга, могут давать информацию о характере взаимодействий в очень малых пространственных областях (о внутреннем устройстве элементарных частиц).

более сложные системы. Но то, что мы знаем сегодня, сохранится и в более широкой (и глубокой) системе знаний завтрашнего дня. И самое главное (для дальнейшего): не придется искать какие-то специфические свойства микрообъектов, необходимые для объяснения свойств макроскопических тел и систем. Объяснение использует то, что мы о микрообъектах знаем, как о микрообъектах (так подсказывает имеющийся у нас опыт).

Если вдуматься, это необычайно смелое и, по существу, логически не доказуемое утверждение. Ведь оно означает, что нам *уже* известны *все* те свойства электронов, протонов, нейтронов (кирпичей, из которых построен материальный мир, мир вещей, предметов и живой природы), которые понадобятся для объяснения ядерных, атомных, молекулярных и, наконец, макроскопических свойств⁴. В недоказуемое можно верить или не верить. Кажется, большинство физиков разделяет нашу веру.

Чтобы придать остроту обсуждаемому тезису, спросим себя: а как обстоит дело в этом смысле с биологическими проблемами? Успехи молекулярной биологии, оперирующей с молекулами, электронами и ионами как с материалом для биологических конструкций, подсказывают мысль, что феномен жизни может быть объяснен на основании наших знаний о молекулярных и субмолекулярных частицах. Так ли это? Как же со *специфической* биологической формы существования материи? Не впадаем ли мы в грех механицизма, сводя законы жизни к законам физики? О специфике и сводимости мы выскажемся ниже, а пока еще раз подчеркнем: думаем (надеемся, верим), что для объяснения биологических закономерностей не придется открывать специфически биологические свойства у отдельного электрона. Его физических свойств (присущих ему как электрону) окажется достаточно.

Итак, по-видимому, большинство физиков согласно

⁴ Мы подчеркнули слова «уже» и «все» не потому, что настаиваем на том, что *все*, что может понадобиться, действительно, уже известно. Хочется подчеркнуть: элементарные частицы, именно как элементарные частицы со своими наборами *индивидуальных* свойств, могут служить *основой* объяснения более сложных (составных) объектов и систем. А факт существования частиц (электронов, протонов, нейтронов), из которых построен мир, действительно *уже* известен.

с тем, что в настоящее время объяснена или может быть объяснена, если понадобится, огромная совокупность фактов, явлений, свойств.

Но не нужно думать, что процесс объяснения прост. Главная (основная) задача этой статьи — показать, что объяснение (познание) невозможно без введения новых понятий, без расширения набора основных представлений, из которых, как из деталей, конструируется картина мира. Сама процедура конструирования целого — из частей, из элементов — оказалась не только удивительно разнообразной, но, если можно так сказать, продуцирующей осложнения, осложнения, не преодоленные полностью до настоящего времени. Убежденность в фактической познаваемости (в принципе) явлений макромира сосуществует с пониманием сложности возникающих в процессе объяснения проблем, заставляющих откладывать на будущее многие задачи фактического объяснения тех или иных свойств и явлений. В нашу эпоху это особенно отчетливо проявляется в молекулярной биологии, берущейся за выяснение элементарных биологических феноменов, а для сколько-нибудь сложных проявлений жизнедеятельности (эволюционного процесса, мышления...) ограничивающей себя описанием. Слово «описание» (часто говорят: «феноменологическое описание») несет на себе отпечаток второстепенности в сравнении со словом «объяснение». Но надо помнить, что правильное научное описание часто разъясняет явление, делая многие его черты не требующими специального объяснения.

Приведем простейший пример. Закон Ома (линейная связь между плотностью тока и напряженностью поля в проводнике) есть пример описания свойств большого класса проводников. Записанный в дифференциальной форме, он позволяет сделать глубокие выводы на основании общих законов неравновесной термодинамики, не прибегая к анализу движения заряженных частиц в проводнике (выясняется, например, что удельная электропроводность тел, находящихся в равновесии, с обязательностью положительна, а электропроводность кристалла кубической симметрии столь же изотропна, как электропроводность изотропного тела, жидкого металла, скажем).

Понимание атомного строения вещества привело к специфической расшифровке понятия «объяснение».

Объяснить явление означает: выяснить, как движение отдельных атомов или субатомных частиц, подчиняющихся известным законам классической или квантовой механики, приводит к наблюдаемому явлению. Объяснение завершается строго доказуемым утверждением, что в тех условиях, когда явление наблюдается, частицы, подчиняющиеся законам механики, движутся именно так, чтобы явление имело место.

Например, выяснив, как движутся электроны в сильном магнитном поле, мы определяем зависимость проводимости от магнитного поля и тем самым объясняем гальваномагнитные свойства металлов и полупроводников. Разнообразие в движении электронов, различная роль столкновений в разных условиях дают возможность объяснить разнообразие поведения проводников в магнитном поле — непрерывно обогащающуюся совокупность экспериментальных фактов, а иногда предсказать новые свойства, еще не обнаруженные на опыте.

Процедура объяснения макроскопических явлений путем выяснения характера движения отдельных атомных частиц требует развития специального математического аппарата, удобного для исследования поведения гигантских коллективов частиц. Такой аппарат существует и носит название *статистической физики*. Объединение механики со статистической физикой привело к возникновению молекулярно-кинетической теории газов, жидкостей и твердых тел.

Именно молекулярно-кинетическая теория объяснила огромную совокупность свойств тел, с которыми мы встречаемся в быту, в технике, объяснила на основании знания свойств атомных и субатомных частиц, объяснила по формуле

макро...	через	микро...
----------	-------	----------

Для молекулярно-кинетической теории свойства микроскопических частиц — исходный пункт объяснения. Не только заряды электрона, протона, их массы, спины, но и законы их движения вносятся в теорию как данность. С точки зрения молекулярно-кинетической теории они не объяснены, а описаны. Неизвестное объясняется через известное. Неизвестное в молекулярно-кинетической теории — поведение коллектива, совокупности частиц в новых (ранее не исследовавшихся) условиях, извест-

ное — микрочастицы с набором зафиксированных (описанных, учтенных) свойств, в число которых, естественно, включена механика отдельных частиц со всеми ее следствиями.

В использованном здесь смысле глагол «объяснить» применим только к сложным объектам, свойства которых можно объяснить через свойства его частей. Конечно, это сужение понятия. «Объяснить», кроме того, означает — подобрать (обнаружить, найти) или построить общую теорию, логическим следствием которой окажется то, что требует объяснения. Например, спектр масс элементарных частиц, их время жизни, способность их к взаимодействиям и взаимопревращениям и т. п. Если такой теории нет, приходится ограничиваться описанисм, часто требующим введения новых понятий и весьма изощренного математического аппарата, так как описание должно быть логически совершенным: фиксируя новые свойства материи, оно не должно разрушать структуру всей физики.

Наука значительно более консервативна, чем это принято думать. Среди физиков в одни научные эпохи чаще, в другие реже проявляется тяга к единой теории — основе основ, из которой в виде логического (математического) следствия будут «получаться» все «физики» — и квантовая механика, и электродинамика, и теория гравитации. Созданию такой теории отдали годы своей жизни такие гении, как Альберт Эйнштейн и Давид Гильберт. Единой теории пока нет, каждый задумывающийся об этом физик в меру своего оптимизма или пессимизма приближает или удаляет мысленно срок ее появления. Но если (когда) она появится (похоже, что ее появление не за горами), сама она ничего объяснять не будет — «объяснять» в том (зауженном) смысле, о котором мы говорили выше. Единая теория будет служить для объяснения другим теориям, сама же будет (по определению!) чисто описательной, феноменологической наукой, фиксирующей те свойства материального мира, которых окажется достаточно для ее (науки) формулировки.

Еще одна довольно длинная цитата из Р. Фейнмана (Характер физических законов. М., Мир, 1968, с. 184): «Некоторые, указывая на противоречивость принципов физики, говорят, что существует только один внутренне непротиворечивый мир, а поэтому если мы соберем все

принципы вместе и будем вычислять все очень и очень точно, то сможем вывести все настоящие принципы, которые могут существовать, исходя при этом из условия, что все должно оставаться внутренне непротиворечивым. Мне такой замах кажется слишком большим. Мне кажется, что это все равно, что «вилять собакой, держа ее за хвост» (английская поговорка. — М. К.). Я думаю, необходимо принять существование некоторых вещей... а затем окажется, что вся наблюдаемая сложность устройства нашего мира является естественным следствием этого факта и справедливости определенных принципов. И я не думаю, что все это можно получить из одних рассуждений о внутренней непротиворечивости» — с этим утверждением мы не спорим. Оно нам кажется совпадающим со сказанным нами.

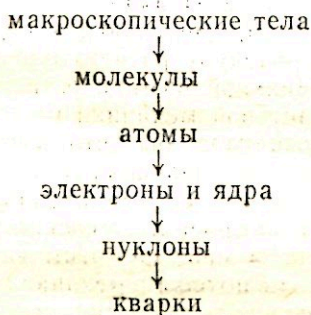
Это длинное отступление по поводу единой теории нам необходимо для того, чтобы разъяснить отличие подходов к объяснению и тем самым к пониманию в разных разделах физики. При создании квантовой или атомной механики, по существу, речь шла об угадывании новых понятий, адекватных микромиру, а с их помощью — способа описания движения микроскопических частиц. Понимание означало создание новых представлений о движении, допускающих непротиворечивую математическую процедуру расчета наблюдаемых физических величин. Никакой возможности логически вывести уравнения квантовой механики не было и не могло быть. Иначе это означало бы, что уже существовала более общая теория, включающая в себя квантовую механику как предельный частный случай. Подчеркивая догадку как метод построения (создания) квантовой механики, мы ни в коей мере не хотим умалить значение преемственности: квантовая механика не только не должна была разрушить классическую механику, но должна была «вывести» ее, получить как предельный случай при переходе к описанию движений макроскопических тел. При этом необходимо было понять огромную совокупность опытных фактов, кардинально противоречащих классической физике (устойчивость атома, линейчатые спектры и т. п.), но зафиксированных классическими приборами, а значит, описанных в классических терминах.

Гениальные догадки привели к построению последовательной квантовой механики. Роль интуиции особенно

отчетливо видна по тому удивительному факту, что почти одновременно были угаданы две разные формы квантовой механики — волновая (Э. Шредингер) и матричная (В. Гейзенберг) — и лишь некоторое время спустя была доказана их идентичность.

И сегодня проникновение в структуру элементарных частиц путем накопления экспериментальных данных сопровождается более или менее убедительными догадками о законах движения на расстояниях, меньших 10^{-13} см. Теории, из которой можно было бы вывести свойства материи при столь малых расстояниях, нет. Физика реально подошла к границе познанной области, за ней — реальная неизвестность.

Интересно, что привычный путь познания — от большого к малому, от целого к части, — по-видимому, еще не исчерпал себя. Кварки (еще недавно гипотетические, а теперь совершенно реальные части нуклонов и мезонов), их свойства, способность взаимодействовать друг с другом служат в настоящее время основой для объяснения свойств протонов, нейтронов, мезонов. Пирамида, обращенная внутрь (матрешки, вложенные друг в друга), можно думать, еще не достроена:



Возможно, пирамиду вовсе нельзя достроить: проникновение вглубь «элементарной» частицы сопровождается множественным рождением частиц, не менее и не более «элементарных», чем изучаемая. Понятие «отдельная» частица, как оказалось, имеет весьма ограниченный смысл. При определении свойств «отдельной» (т. е., казалось бы, изолированной?) частицы возникает необходимость исследовать ее взаимодействие с окружающим ее физическим вакуумом, способным порождать частицы, как совпадающие с исследуемой, так и

совсем другие. Не имея возможности останавливаться на этом вопросе сколько-нибудь подробно (он явно за пределами нашей темы), подчеркнем только: изолированность, отдельность не имеет абсолютного смысла, а тем самым деление представлений на основные и неосновные (см. сноску на с. 8) делается совсем условным. Если нельзя говорить об отдельной частице, то к чему относить понятие «основные представления»? А главное: одна частица в определенных условиях ведет себя как сгусток материи, порождающей много частиц, и эти «много» объясняют поведение одной. Как тут быть с формулой «макро... через микро...»?

К счастью, все эти сложности (по существу, гносеологические) возникают главным образом в релятивистской квантовой механике (правый верхний угол нашей схемы на рисунке), характерные черты которой — взаимопревращение частиц, их рождение и гибель, и в значительной меньшей мере затрагивают физику твердого тела.

С другой стороны, именно физика твердого тела помогает (на до конца осмысленных примерах) понять, что в дважды упомянутой формуле «макро... через микро...» не всегда «микро» — отдельная частица — деталь из кем-то заготовленного конструктора...

3. ЧАСТЬ И ЦЕЛОЕ

Физика твердого тела — один из разделов молекулярно-кинетической теории. Вторая половина наименования («кинетическая») безукоризненна: без движения не может существовать ни один состоящий из чего-либо объект, все микроскопические частицы (всегда!) движутся. А вот первая половина «молекулярно» не совсем точна. Не все твердые тела состоят из молекул, некоторые — из ионов (например, кристаллы обычной поваренной соли), а некоторые — металлы — из ионов и электронов. И что вообще означает слово «состоять»? Только что мы нарисовали обращенную вглубь пирамиду структур и фиксировали свое внимание на том, что построение ее не закончено. Что же дает нам право утверждать, что поваренная соль NaCl состоит из ионов Na^+ и Cl^- , кристалл азота⁵ — из молекул N_2 , а металлический литий — из ионов Li^+ и электронов? Дело в

⁵ Азот кристаллизуется при температуре 63,2 К.

том, что если задан вопрос «Из чего состоит?», и спрашивающий, и отвечающий понимают, что речь идет о наиболее слабо связанных частях твердого тела, о таких его микроскопических частях, на которые тело можно разложить (разделить), используя наименьшие усилия. Мерой связи частей служит энергия связи (в расчете на одну частицу). Энергия связи молекулы N_2 с кристаллом меньше той энергии, которую надо затратить, чтобы разорвать молекулу N_2 на два атома азота, а чтобы ионизовать атом азота (оторвать от него электрон), требуется еще во много раз большее усилие. Это и делает четкими утверждения:

кристалл азота состоит из молекул N_2 ,
молекула N_2 состоит из атомов азота N ,
атом азота состоит из ядра и электронов...

Для того чтобы вырвать из ядра азота нуклоны (протоны или нейтроны), уже нужны энергии, в миллионы раз превышающие те, с помощью которых мы «разделили» твердый азот на составные части.

Последние годы привели к пониманию того, что из утверждения «нечто состоит из чего-то» не всегда следует возможность извлечь это «что-то», т. е. фактически разделить «нечто» на «что-то». По-видимому, кварки — структурные единицы нуклонов — вовсе не существуют вне нуклонов. Как мы увидим ниже, это свойство кварков (правда, сформулированное в столь абстрактной форме, как это сделано здесь) находит себе аналогию (но только аналогию!) в физике твердого тела. С другой стороны, в ядре нет электронов и позитронов, хотя они испускаются ядрами при β^\pm -распаде, а в атоме, даже если он в возбужденном состоянии, нет фотона, который будет испущен атомом, когда он перейдет в основное состояние.

Изучением состава вещества, возможных комбинаций атомов, ионов, молекул занимается химия. Мы не будем останавливаться на ее успехах в познании атомно-молекулярных структур и их взаимопревращений. Подчеркнем только один (для нас фундаментальный) факт: представление о структуре, о составе, разделение на части предполагает аддитивность — хотя бы приближенную... Для пояснения того, об аддитивности чего идет речь, вернемся еще раз к энергии связи атомов в молекуле N_2 . Как считать: она мала или велика? Существует ли критерий, не зависящий от наших возмож-

ностей воздействия? Конечно! Энергию связи надо сравнить с энергией покоя $M_N c^2$ (M_N — масса атома азота, c — скорость света) и убедиться, что по сравнению с ней она ничтожна. Следствием этой малости и является аддитивность массы, которая выполняется с огромной точностью. Именно малость энергий связи при разложении всех веществ на составные части делает закон сохранения массы одним из основных законов химии. Это, естественно, не означает несущественность энергии связи. Стабильность вещества целиком и полностью определяется энергией связи — ее величиной, зависящей от температуры, от окружения (например, в воде энергия связи ионов в молекуле NaCl существенно понижается) и т. д.

Вернемся к аддитивности. Аддитивность при построении микроскопической теории макроскопических явлений и свойств в определенном смысле есть необходимое условие. Представление о молекулах (или об ионах и электронах) как о структурных единицах твердого тела основано, как мы уже говорили, на аддитивности массы: масса тела с большой степенью точности равна сумме масс молекул.

Для газа молекула — не только структурная единица массы, но и структурная единица энергии (движения). Действительно, газ по определению — такое состояние вещества, при котором энергия взаимодействия между его частицами значительно меньше, чем энергия движения отдельной частицы. Поэтому с хорошей степенью точности

энергия газа равна сумме энергий частиц газа,

и, следовательно, для того чтобы понять (объяснить) свойства газа, достаточно знать законы движения отдельных частиц газа и, конечно, уметь суммировать — вычислять макроскопические (газовые) характеристики по микроскопическим, относящимся к отдельным частицам. Газ — простейший объект молекулярно-кинетической теории. Его простота основана на том, что реальные (обычные) частицы (молекулы, атомы) одновременно суть структурные единицы и его вещества (массы) и движения (энергии).

Правда, следовало бы учесть и помнить по крайней мере два осложняющих обстоятельства:

1) полное пренебрежение взаимодействием между частицами газа совершенно недопустимо, так как без его учета невозможно даже приближенно понять релаксационные, кинетические и другие неравновесные свойства газов. Если бы молекулы газа не взаимодействовали друг с другом, то газ не мог бы прийти в состояние термодинамического равновесия: релаксация обусловлена обменом энергией и импульсом между частицами. Такие важные характеристики газа, как коэффициенты диффузии, теплопроводности, вязкости, пропорциональны длине свободного пробега молекулы, а последняя определяется столкновениями частиц друг с другом. Желая вычислить как можно точнее термодинамические характеристики газа (теплоемкость, свободную энергию и т. п.), мы тоже сталкиваемся с необходимостью учитывать взаимодействие между частицами, для чего вводят соответствующие коэффициенты (их называют вириальными). Однако все эти «усложнения», требующие рассмотрения взаимодействия между молекулами, не затрагивают (в большем числе случаев) индивидуальности элементарных носителей массы и энергии, хотя при этом

2) частица (молекула, атом) как простейшая элементарная единица движения в газе — понятие приближенное. Во-первых, потому что при достаточно мощном воздействии она может распасться (например, молекула на составляющие ее атомы). А во-вторых, из-за существования внутренних степеней свободы. В тех свойствах, где они могут проявиться, считать частицу газа элементарной попросту нельзя. Специалисты по термодинамике прекрасно знают, когда (при каких условиях), имея дело с молекулярным газом, необходимо учитывать примесь в нем «осколков» — атомов или ионов, из которых состоят молекулы газа. И наоборот, имея дело с атомарным газом, необходимо учитывать примесь молекул, возникающих (и живущих иногда очень недолго) при столкновении атомов.

Когда речь идет о тепловых свойствах газов, мерой элементарности частиц служит отношение $\Delta\varepsilon/k_B T$, где $\Delta\varepsilon$ — энергетическое расстояние от основного до нижайшего возбужденного состояния частицы⁶. При $\Delta\varepsilon/k_B T \gg 1$

⁶ T — температура в градусах Кельвина, k_B — постоянная Больцмана, равная $1,4 \cdot 10^{-16}$ эрг/град.

частицы можно считать элементарными, при $\Delta\varepsilon/k_B T \lesssim 1$ — нет. Напомним, что дискретность уровней энергии у атомных объектов — следствие квантовых законов. И еще: как правило, $\Delta\varepsilon$ не слишком отличается от энергии диссоциации (т. е. энергии, которая требуется для отрыва субатомной или субмолекулярной частицы от атома или молекулы).

Газ — макроскопический физический объект, на примере которого легко проследить, как строится объяснение по схеме «макро... через микро...».

Молекулы с их свойствами, законами поведения в различных условиях служат основой, исходным пунктом объяснения. Квантовую (атомную) механику, объяснившую свойства отдельных молекул и атомов, можно часто, но не всегда (см. след. раздел), вовсе не привлекать к объяснению свойств газов, ограничиваясь фиксацией свойств отдельных частиц. Последнее обстоятельство весьма существенно. Оно демонстрирует весьма общий гносеологический принцип современного естествознания. Принцип этот можно назвать иерархичностью подхода. Исследуя тот или другой физический объект, объясняя его свойства и явления, в нем происходящие, часто нет необходимости углубляться в его структуру до бесконечности. При исследовании газа, как мы говорили, достаточно «остановиться» на молекулах (иногда на атомах или ионах). Это относится не только к физике газов. Физике макроскопических объектов, как правило, достаточно просто знать характеристики атома, не вдаваясь в размышление, почему они такие, а не другие. Физике атома из физики ядра нужны только итоговые факты о свойствах ядра — его заряд, масса, магнитный и электрический моменты. А для понимания свойств атомных ядер часто нет нужды знать структуру нуклонов.

Принцип иерархичности, как почти любой принцип, не следует догматизировать. Говоря о его применимости, мы использовали наречие «часто», а не «всегда», потому что бывают случаи (и нередко!), когда явление как бы «выпадает» из своего уровня: например, наблюдаемое на макроскопическом уровне, оно требует более углубленного разбирательства, чем это кажется на первый взгляд. Вообще определение на основании непосредственных экспериментальных фактов (по зависимо-

сти от параметров, по значениям величин и т. п.) уровня, который необходим для правильного понимания этих фактов, — один из самых важных этапов построения правильной теории.

Можно наметить такую схему:

экспериментальные факты → их обобщение; словесная формулировка явления → феноменологическое его описание → создание микроскопической теории (именно последний этап требует перехода на более глубокий уровень).

Обсуждение деталей этой схемы — не тема нашей статьи⁷. Отметим только, что в физике твердого тела этап «феноменологическое описание явления» часто использует терминологию микроскопического подхода (как бы «опускается» на более глубокий уровень), оставляя истинно микроскопической теории обоснование используемых терминов и понятий. Так, для описания свойств металлов используют понятие «электронный газ», оставляя квантовой теории твердого тела объяснение того, откуда в металле появились свободные электроны и каковы их свойства.

4. ИНДИВИДУУМ И КОЛЛЕКТИВ

Все атомные и субатомные частицы существуют в коллективах, в ансамблях, из которых только искусство экспериментатора позволяет их извлечь для исследования. Отдельный электрон или отдельный атом — не меньшая редкость, чем уникальное произведение искусства. И наверное, невозможно было бы постичь устройство мира, если бы не то обстоятельство, что одинаковы все электроны, все протоны и вообще все элементарные частицы. Сказать, почему это так, до тех пор пока не построена теория элементарных частиц, нельзя. Даже задавать такой вопрос бессмысленно; нет почвы не только для ответа на него, но и для его научной формулировки.

Интересно отметить, что уже Дж. К. Максвелл понимал: одинаковость всех молекул одного химического элемента требует объяснения и показывает неприменимость к молекулам обычно использовавшегося тогда представления «простое твердое тело». Ссылка на авто-

⁷ См., однако, раздел 9.

ритет «самого» Максвелла позволяет пофилософствовать вокруг вопроса, о котором мы только что сказали, что нет почвы даже для его научной постановки.

Во-первых, заметим: утверждение об одинаковости (тождественности) частиц требует уточнения — «одинаковы в тождественных условиях». Думаю, что это «уточнение» может вызвать недоумение у строгих логиков, так как, естественно, требуется новое уточнение, включающее определение условий. Может возникнуть порочный замкнутый круг. И все же, надеюсь, высказанная мысль о тождественности частиц приблизительно понятна⁸.

Во-вторых, понятие тождественности весьма тесно связано с понятием элементарности, с уровнем наших знаний о частицах. Атомы одного элемента тождественны, пока мы не узнаем, что существуют изотопы, и понимаем, что они отличаются структурой ядра. Еще один пример дает история с нейтрино. Оказалось, что есть разные нейтрино. У электронов есть какие-то странные аналоги — μ - и π -мезоны. А у протонов — целые семейства баронов.

И наконец, в-третьих: похоже на то, что «Великое объединение», которого все ждут (с разной степенью нетерпения), по-видимому, превратит все частицы (точнее, прачастицы) в тождественные, а наблюдаемые в реальном мире различные частицы окажутся их различными комбинациями, обязанными единому взаимодействию. Ведь удалось понять, что весь наблюдаемый мир построен из трех (всего из трех!) типов частиц — из протонов, нейтронов и электронов... Не так все просто и очевидно с тождественностью.

Мало того что частиц бесконечно много. Они взаимодействуют друг с другом. Для описания взаимодействия мы привлекаем специальные понятия «заряд» и «поле», утверждая, что частицу окружает нечто, называемое полем, — то, что ощущает другая частица. Величина (напряженность) поля тем больше, чем больше у частицы заряд, а «ощущает» другая частица поле потому, что в поле на нее действует сила, пропорциональ-

⁸ Особенно тем, кто знает, что в квантовой механике она берет сравнительно простой математический смысл: квадрат модуля волновой функции двух одинаковых частиц не меняет знак при формальной перестановке частиц, т. е. при взаимном переобозначении их координат,

ная ее заряду и напряженности поля. Таким образом, заряд частицы — ее атрибут, пригодный для описания «общения» частиц с себе подобными. Использование слова «заряд» не означает, что речь идет только об электрическом заряде, хотя электрический заряд — наиболее привычный из зарядов. Вокруг электрически заряженной частицы (например, протона) существует электрическое поле — тоже хорошо изученная физическая реальность. А вот нейтрон нейтрален, у него нет электрического заряда, но есть магнитный момент, поэтому вокруг нейтрона есть магнитное поле, которое «чувствуют» другие частицы. Но, кроме того, и вокруг протона и вокруг нейтрона — поле ядерных сил; следовательно, они обладают ядерным зарядом. Роль полей не ограничивается служебной функцией — передавать взаимодействие от частицы к частице. Поля могут вести независимое существование, распространяясь в виде волн в пространстве. Поле — одна из форм существования материи. Важнейшее следствие квантовой механики — ликвидация дилеммы: «или поле — волна, или частица — корпускула». Частицы обладают волновыми свойствами, волны (поля) — корпускулярными. Это утверждение получило название корпускулярно-волнового дуализма. Нам еще придется с ним встретиться.

Давайте на мгновение лишим частицы всех зарядов. Этот «страшный» эксперимент попросту означает, что мы пренебрежем силовым взаимодействием частиц друг с другом. Что же собой представляет истинно идеальный газ — газ невзаимодействующих элементарных частиц? Согласно классической статистической физике:

1) все газы идеальных частиц одинаковы;

2) движение различных частиц совершенно независимо; это, в частности, проявляется в независимости средней энергии частицы от плотности газа $n = N/V$ (N — число частиц в объеме V), благодаря чему выполняется закон равнораспределения, согласно которому $\bar{\epsilon} = (3/2)k_B T$ (T — температура газа). Отсюда энергия газа есть $(3/2)Nk_B T$, а

3) между давлением P , объемом V и температурой T существует простое соотношение, именуемое законом Вояля—Мариотта—Гей-Люссака

$$PV = Nk_B T.$$

Последние две формулы (и вообще вся термодинамика идеального газа) могут быть выведены средствами теории вероятности. Для этого вводится функция распределения — среднее число частиц⁹ в элементе фазового объема частицы. Функция распределения $f(\epsilon)$ — ее зависимость от энергии — главное содержание статистического подхода, обосновывающего термодинамику классического газа. «Нашел» классическую функцию распределения Л. Больцман: $f(\epsilon) = A \exp(-\epsilon/k_B T)$. Ее так и называют — функция распределения Больцмана (A — нормировочная постоянная).

Из этого коротенького экскурса в статистическую физику следует усвоить две истины: одну, казалось бы сводящуюся к трюизму: «Невзаимодействующие частицы не взаимодействуют (?)» — см. пункт 2. И вторую: «Описание свойств газа как макроскопической системы использует совершенно не те термины, которыми описывается поведение отдельных частиц газа». Отдельная частица не обладает температурой, а давление создается благодаря столкновению миллиардов молекул со стенками сосуда. Макроскопическая физика (термодинамика) выработала язык для описания макроскопических явлений, а микроскопическая выяснила *сущность* употребляемых «слов» этого языка, *объяснила* их: так, температура газа T есть $(2/3)\bar{\epsilon}/k_B$, а давление $P = (2/3)n\bar{\epsilon}$.

Квантовая механика не только вмешалась в жизнь отдельной микроскопической частицы, но и пересмотрела жизнь коллективов частиц. Возникла *квантовая статистика*, выяснившая, что между частицами существует *несиловое взаимодействие*. Движение одной частицы влияет на движение другой, даже если (искусственно) приравнять все заряды нулю (как мы уже сделали выше). Второй пункт перечня, который казался нам трюизмом, в действительности ограничен областью применимости классической статистики, которая в случае реальных газов, воздуха например, практически всегда перекрывает область существования газа в земных условиях: газ «раньше» (при более высокой температуре)

⁹ Слово «среднее» всегда в данном тексте означает среднее арифметическое (данное замечание призвано лишить это слово чуть мистического оттенка, который, боюсь, ощущается в нем для специалистов).

сконденсируется в жидкость, чем проявятся его квантовые свойства: формально температура, при которой и ниже которой учет квантовых свойств газа обязателен, есть $T_{\text{кв}} \approx n^{2/3} h^2 / m k_B$. Если в эту формулу подставить вместо n число Лошмидта 10^{19} см^{-3} , а вместо m — массу порядка массы атома азота (как промежуточную между O_2 и H_2), то мы увидим, что $T_{\text{кв}}$ для воздуха — порядка 10^{-3} К . Напомним: кислород кристаллизуется при $54,7 \text{ К}$, азот — при $63,3 \text{ К}$, а водород — при $14,0 \text{ К}$. Несомненно, что квантовые свойства этих газов проявиться не успеют. Но, с другой стороны, в природе огромные запасы квантовых газов: электроны металла, газ нуклонов в нейтронных звездах и др. Похоже, что квантовых газов гораздо больше, чем классических.

При температуре $T \gg T_{\text{кв}}$ квантовые свойства движения частиц не проявляются и функция распределения Больцмана хорошо описывает свойства газов. Только что мы подчеркивали, что земные газы (воздух) не «успевают» проявить свои квантовые свойства: они «раньше» (при более высокой температуре) сконденсируются. А вот электронный газ практически во всех металлах не «успевает» проявить свои классические свойства. Для него температура $T_{\text{кв}}$ столь высока, что большинство металлов «раньше» расплавится, чем электронный газ в них проявит свои классические свойства.

Наличие несилового взаимодействия (чаще говорят — корреляции в движении частиц) отменяет и другие пункты приведенного выше перечня. Поэтому придется еще раз спросить: «что представляет собой газ невзаимодействующих элементарных частиц?».

По манере вести себя в коллективе все частицы делится на два типа.

Существование именно двух типов поведения частиц можно объяснить следующим образом. Корреляционные соотношения для движения любого числа тождественных частиц могут быть выведены из соотношений, справедливых для двух частиц, а с принципом неразличимости двух тождественных частиц согласуются только два типа правил поведения: волновая функция двух тождественных частиц либо меняет знак при перестановке частиц местами, либо не меняется вовсе.

Итак, два типа частиц. Одни (их называют бозонами) — «коллективисты», Бозоны не только не меша-

ют друг другу, но, наоборот, наличие бозонов в данном состоянии увеличивает вероятность попадания бозонов в это состояние. Другие частицы (их называют фермионами) — «индивидуалисты». Для фермионов существует строгий запрет (принцип Паули), согласно которому только один фермион может находиться в данном состоянии.

Когда речь идет о частице в газе, то задание определенного состояния частицы это задание трех компонент ее импульса и проекции ее спина на какую-либо ось.

Электроны, протоны, нейтроны, нейтрино (все), μ -мезоны — фермионы; фотоны, π -мезоны — бозоны.

Роль принципа Паули огромна; то обстоятельство, что электроны в атомах с несколькими электронами не «сваливаются» на нижний энергетический уровень, а создают определенную «структуру» вокруг ядра — электронную оболочку атома, ответственную за большинство его свойств и отличающую атом одного элемента от атома другого элемента, — непосредственное следствие принципа Паули.

Принадлежность к одному из типов (к бозонам или к фермионам) диктуется величиной спина частицы

частицы с нулевым и целым спином — бозоны,
частицы с полуцелым спином — фермионы.

Спин — собственный (внутренний) момент количества движения. Как все моменты количества движения, спин может принимать только дискретные значения: $M_s = \sqrt{s(s+1)} \hbar$, причем s — либо целое (в частности, ноль), либо полуцелое число. Величиной спина принято считать значение s . Спин — вектор, правда, не обычный классический, а квантовый. Главное отличие между классическим вектором и квантовым в том, что квантовый вектор не может произвольно ориентироваться в пространстве, а только конечным числом способов. Так, спин может ориентироваться в пространстве $(2s+1)$ -м способом: его проекции на избранную ось суть $m_s \hbar$, где $m_s = -s, -s+1, \dots, s-1, s$. Направление оси в пустом пространстве произвольно — проявляет себя изотропия пространства.

У электрона, протона, нейтрона, у всех нейтрино и

μ -мезона спин равен $1/2$, у π -мезона — нулю, а у фотона — единице.

Наличие или отсутствие спина проявляется не только в «манере вести себя» в коллективе, но и в индивидуальных свойствах частиц. Благодаря наличию спина у электрона есть магнитный момент; при пропускании пучка электронов через неоднородное магнитное поле пучок расщепляется на два пучка в соответствии с тем, что спин $1/2$ ориентируется относительно магнитного поля двумя способами: по полю и против поля.

Нельзя объяснить, почему у электрона спин равен $1/2$. Это (пока?) — экспериментальный факт, точнее, способ описать большую совокупность экспериментальных фактов с помощью «простейшего» предположения: структуру спектральных линий, поведение в магнитном поле и т. д. Но то, что частицы, обладающие полуцелым спином, подчиняются принципу Паули (т. е. являются фермионами), а частицы с нулевым или целым спином — бозоны, нашло последовательное, логически строгое математическое объяснение. Оно принадлежит В. Паули.

Для элементарных частиц спин — такая же присущая им характеристика, как и заряд и масса. Спин сложного образования (ядра атома, атома, молекулы) есть векторная сумма спинов составляющих его частиц — электронов, протонов, нейтронов. Сложение квантовых векторов происходит по вполне определенным правилам, совмещающим правило параллелограмма с дискретностью направлений ориентации. Векторная сумма зависит от взаимной ориентации векторов-слагаемых. Поэтому спин сложного образования может изменяться: в разных состояниях по-разному ориентированы друг относительно друга спины составных частей. Но правила сложения «устроены» так, что сложное образование — бозон всегда остается бозоном, а сложное образование — фермион — фермионом. Только потеря или присоединение частицы (электрона, протона, нейтрона...) может превратить бозон в фермион или наоборот. Так, квази-молекула из двух электронов — куперовская пара в сверхпроводнике — бозон (это — важное обстоятельство при построении микроскопической теории сверхпроводимости).

Вернемся к различию в свойствах идеальных газов бозонов и фермионов. Зависимость (корреляция) в дви-

жении невзаимодействующих силовым образом частиц особенно отчетливо проявляется при абсолютном нуле температур, когда газы фермионов и бозонов совершенно не похожи друг на друга.

Абсолютный нуль температуры ($T=0$)

Газ бозонов (бозе-газ)	Газ фермионов (ферми-газ)
<p>Все частицы «покоятся» $\bar{\varepsilon}=0$; $E_{\text{газа}}=0$</p>	<p>Частицы занимают все состояния с импульсом, меньшим $p_F = \hbar [3n/(2s+1)4\pi]^{1/3}$.</p> <p>$\bar{\varepsilon} = \frac{3}{5} \frac{p_F^2}{2m}$; $E_{\text{газа}} = \frac{3}{5} N \frac{p_F^2}{2m}$.</p>

Слово «покоятся» взято в кавычки, так как согласно соотношению неопределенности при определенном импульсе (здесь равном нулю) координата частицы полностью не определена. Газ фермионов удобно представлять себе существующим в импульсном пространстве, т. е. в пространстве, в котором тремя координатами («длиной», «шириной» и «высотой») служат компоненты импульса p : p_x , p_y , p_z . При $T=0$ фермионы заполняют сферу (ее называют ферми-сферой) радиуса p_F .

Таблица описывает газы бозонов и фермионов при $T=0$ — в основном состоянии. Для понимания тепловых свойств газов и вообще любых макроскопических систем необходимо знать, что собой представляют простейшие (элементарные) возбужденные состояния (или, проще, возбуждения).

Для бозе-газа элементарные возбуждения — это отдельные движущиеся частицы. Пока их число мало, бозе-газ можно считать слабо возбужденным. Газ движущихся бозе-частиц (пока их мало) напоминает газ классических частиц в том смысле, что корреляция в движении частиц мала, но с тем важным отличием, что число движущихся (с $p \neq 0$) частиц $N_{\text{дв}}$ тем больше, чем выше температура

$$N_{\text{дв}} = N \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2}, \quad T_0 \sim T_{\text{кв.}}$$

При $T < T_0$ средняя энергия движущейся частицы $\varepsilon_{\text{дв}} \sim 0,75 k_B T$, что в какой-то мере свидетельствует об

отсутствии корреляции в движении частиц с $p \neq 0$. Полная энергия бозе-газа, конечно, не равна $N \cdot 0,75 k_B T$, так как вклад в энергию газа дают только движущиеся частицы ($E_{\text{газа}} \simeq N \cdot 0,75 k_B T (T/T_0)^{3/2}$). Выше температуры T_0 все частицы движутся. Температуру T_0 называют температурой бозе-эйнштейновского вырождения, а «выпадение» конечной части всех бозе-частиц в состояние с равным нулю импульсом ($N_{\text{дв}} < N$) — бозе-эйнштейновской конденсацией. С конденсацией газа классических частиц в жидкость она имеет мало общего, так как не связана с силовым взаимодействием между частицами¹⁰.

Последние формулы могут быть получены из функции распределения Бозе—Эйнштейна, заменяющей при $T \lesssim T_{\text{кв}}$ функцию распределения Больцмана: ниже температуры бозе-эйнштейновского вырождения она равна $[\exp(\varepsilon/k_B T) - 1]^{-1}$. Для частиц, энергия которых значительно меньше $k_B T$, функция распределения особенно проста: $k_B T/\varepsilon$. Можно убедиться, что она совпадает с классической функцией распределения электромагнитного поля по частотам ω , если заменить ε на $\hbar\omega$ (постоянная Планка входит в несущественный нормировочный множитель). Несомненно, не лишено интереса, что движущиеся бозе-частицы, когда их очень мало (по сравнению с полным числом частиц в газе), по своим статистическим свойствам больше похожи на волны, чем на частицы. Удивляться все же нет оснований: ведь при малом импульсе у частицы большая длина волны де Бройля. Отчетливо видно: необходимо мыслить квантовыми образами! Классические представления отказывают.

В ферми-газе простейшее возбуждение — переход какой-либо частицы из состояния с импульсом p , мень-

¹⁰ Формальное отличие бозе-эйнштейновской конденсации от превращения газа в жидкость, в частности, проявляется в характере фазового перехода: превращение газа в жидкость — фазовый переход 1-го рода, а бозе-эйнштейновская конденсация — фазовый переход 3-го рода. Это означает, что переход очень «мягок»: при $T = T_0$ непрерывны не только первые производные от термодинамических потенциалов (энтропия, удельный объем...), но и вторые (теплоемкость, сжимаемость...); только третьи производные при фазовом переходе 3-го рода изменяются скачком (например, производная по температуре от теплоемкости),

шим p_F , в состоянии с $p > p_F$. Ясно, что при этом не только появляется частица в той части импульсного пространства, где частиц не было, но и образуется пустое место — дырка в той части, которая была однородно заполнена частицами. Отсутствие частицы может быть обнаружено экспериментально, т. е. дырка — вполне материальный объект. Легко убедиться, что

энергия возбуждения в ферми-газе = энергия частицы + энергия дырки.

Энергии и частицы, и дырки удобно отсчитывать от энергии Ферми ϵ_F , равной $p_F^2 / 2m$:

$$\text{энергия частицы} = \frac{p^2}{2m} - \frac{p_F^2}{2m}, \quad p > p_F,$$

$$\text{энергия дырки} = \frac{p_F^2}{2m} - \frac{p^2}{2m}, \quad p < p_F.$$

При таком определении обе энергии положительны: появление элементарного возбуждения — частицы¹¹ и дырки, каждой в отдельности, — увеличивает энергию системы.

Появление элементарных возбуждений парами (частиц и дырок) — отличительная черта энергии ферми-газа. Энергия ферми-газа при отличной от нуля, но низкой температуре квадратично растет с температурой

$$E_{\text{газа}} - E_{\text{газа}}^0 \simeq \frac{mNT^2}{2\hbar^2} \left(\frac{\pi V}{3N} \right)^{2/3} k_B^2, \quad k_B T \ll \epsilon_F,$$

а число частиц и дырок — линейно

$$N_{\text{частиц}} = N_{\text{дырок}} \simeq \frac{3}{2} \ln 2 \cdot N \cdot \frac{k_B T}{\epsilon_F}, \quad k_B T \ll \epsilon_F.$$

И для ферми-газа можно ввести функцию распределения, дающую возможность вывести (а не привести) последние формулы. Для фермионов трудно придумать классическую аналогию. Наверное, следует подчеркнуть

¹¹ Частицы в основном состоянии при рассмотрении элементарных возбуждений воспринимаются как фон. Отсюда терминология: элементарное возбуждение — появление (рождение!) частицы (с $p > p_F$) и дырки (с $p < p_F$). В бозе-газе элементарное возбуждение можно также трактовать как рождение частицы с $p \neq 0$.

другое: при низких температурах ($T \ll T_{\text{кв}}$), когда электронов и дырок мало и большинство из них имеет малую энергию, они ведут «поверхностный образ жизни» (правда, в пространстве импульсов, где они располагаются на сфере Ферми и в ее непосредственной окрестности).

При температурах, высоких по сравнению с температурой $T_{\text{кв}}$, ферми- и бозе-газы неотличимы. Их свойства прекрасно описываются формулами классической статистики.

Столь подробный рассказ о квантовых газах в статье о физике твердого тела нам кажется необходимым. Газ — пример для подражания. Мы увидим, что понимание свойств твердых тел делается особенно полным, когда удается обнаружить возможность описать эти свойства в газовых терминах.

5. КВАЗИЧАСТИЦЫ

Разрекламированная выше познанность (или, точнее, фактическая познаваемость) свойств макроскопических систем, а среди них и твердых тел означает возможность расчета этих свойств, основываясь на знании законов движения атомных частиц. Как провести такой расчет?

Представим себе неосуществимый, но в виде мысленного эксперимента возможный вычислительный эксперимент. В ЭВМ необходимой мощности и быстродействия вкладываются данные об электронах и ядрах твердого тела, а также внешние условия, программируется движение частиц по законам квантовой механики и... ожидается ответ, который через некоторое время выдаст ЭВМ в виде кривых, доступных сравнению с экспериментом. Пусть экспериментальные и теоретические кривые совпадут, это будет означать, что вложили мы в ЭВМ правильные данные и правильно составили программу. Но поняли ли мы, как движутся атомные и субатомные частицы в твердом теле? Чем обусловлен тот или иной экспериментальный факт? В том, что они движутся по законам квантовой механики, по-видимому, серьезно никто не сомневается, а что же мы узнали еще? Расчет подменил объяснение.

Последний абзац ни в коей мере не есть критика реальных расчетов на ЭВМ конкретных свойств твердых тел. Реальные расчеты используют модели, и сравнение

модельного расчета с экспериментом позволяет оценить ее (модели) адекватность.

Рассуждение о численных расчетах приведено, чтобы показать необходимость выработки специального языка для объяснения. В случае газов (см. выше) для объяснения их макроскопических свойств привлекались частицы газа: все макроскопические величины (температура, давление...) получили объяснение (расшифровку) в терминах, относящихся к отдельным частицам — структурным единицам и вещества, и энергии газа. В предыдущем разделе мы приводили конкретные примеры равновесных (термодинамических) величин. Кинетические характеристики газа тоже выражаются в терминах, относящихся к движению отдельных частиц. Так, вязкость и теплопроводность газа пропорциональны длине свободного пробега частиц и т. п. Примеры, естественно, можно множить практически до бесконечности.

В твердом теле структурные частицы вещества (атомы, молекулы, ионы и электроны — в зависимости от типа твердого тела) не являются структурными единицами энергии твердого тела. Это несколько загадочное утверждение означает, что энергия твердого тела не есть сумма энергий его частиц, так как частицы в твердом теле взаимодействуют друг с другом.

Когда между собой взаимодействует несколько частиц (две, три), причем взаимодействие таково, что не нарушает внутренней структуры взаимодействующих частиц, то частицы могут считаться элементарными, а результат взаимодействия предсказывается путем математического анализа. Хотя и на его пути могут возникнуть серьезные трудности, понимание (объяснение) характера движения взаимодействующих частиц не требует введения новых понятий, создания нового языка.

Движение макроскопических коллективов взаимодействующих частиц столь сложно, что его исследование породило и порождает новые представления и понятия. Одно из важнейших понятий, возникших в результате применения квантовой механики к макроскопическому коллективу (ансамблю) взаимодействующих частиц, есть *квазичастица*.

Мы не начнем с определения понятия квазичастицы, а рассмотрим несколько примеров, которые позволяют нам понять суть дела. Однако прежде, чем приводить примеры, необходимо краткое отступление. Рас-

смотрение движения электрона в периодическом поле ионной решетки по законам квантовой механики объяснило природу электрических свойств твердых тел, т. е. ответило на вопрос, почему одни тела диэлектрики — изоляторы, а другие металлы — проводники. В этой классификации нашлось место и полупроводникам, и полуметаллам. Для дальнейшего достаточно упрощенного представления; диэлектрик — кристалл из молекул (атомов) или ионов разного знака, а металл — ионная решетка, погруженная в электронный газ. Почему иногда электроны отрываются от своих атомов, а иногда нет? Именно на этот вопрос и ответила квантовая механика. Итак, будем считать известной причину существования тел разной электрической природы: диэлектриков (изоляторов), металлов (проводников), а также полупроводников и полуметаллов.

Начнем с диэлектрика. Временно «забудем» о том, что молекулы (атомы) или ионы, из которых он состоит, могут колебаться вокруг своих положений равновесия. К колебаниям мы вернемся, но пока подчеркнем, что наша «забывчивость» может быть оправдана предельным переходом: примем временно, что масса атома или иона M «равна бесконечности», ведь по сравнению с массой электрона m она действительно очень велика ($M \approx 1840 Am$, A — атомный вес атома или иона).

В диэлектрике, состоящем из неподвижных атомов, энергия может повышаться только за счет движения электронов, и наша ближайшая задача — рассмотреть элементарные возбуждения в электронной системе диэлектрика. Каждый атом диэлектрика обладает своей системой энергетических уровней (состояний). Ясно, что простейшее возбуждение диэлектрика означает возбуждение одного атома. Но какого? Полная тождественность всех ячеек кристалла делает этот вопрос бессмысленным. Более того, рассмотрение показывает, что стационарным состоянием кристалла (состоянием с определенной энергией) является не состояние с одним определенным возбужденным атомом, а состояние, при котором по кристаллу бежит волна возбуждений — в полной аналогии с тем, что в свободном пространстве стационарное состояние частицы есть волна, длина которой $\lambda = 2\pi\hbar/p$, а частота $\omega = \epsilon/\hbar$; p и ϵ — импульс и энергия частицы.

Как и всякая волна, волна возбуждения кристалла

характеризуется своей длиной λ и частотой ω , которым, естественно, используя корпускулярно-волновой дуализм, сопоставить импульс¹² p и энергию ϵ : $p = 2\pi\hbar/\lambda$, $\epsilon = \hbar\omega$. Таким образом, возбужденное состояние диэлектрика оказалось удобно представлять как появление (рождение) в кристалле чего-то похожего на частицу с определенной энергией ϵ и импульсом p . Это «что-то» получило название экситона (Я. И. Френкель). При нашем изложении для экситона «длина волны» и «частота» суть первичные понятия. Но удобнее оценить энергию и импульс экситона: по порядку величины энергия экситона равна энергии возбуждения атома, а отличие энергии экситона от энергии возбужденного изолированного атома есть энергия перемещения возбуждения по кристаллу, естественно, зависящая от величины импульса, а также от энергии связи атомов (молекул) друг с другом. Чем атомные частицы сильнее взаимодействуют, тем больше может быть энергия перемещения. За счет перемещения возбуждения по кристаллу дискретный атомный (молекулярный) уровень расширяется в полосу разрешенных значений — зону.

Как правило, возбуждение диэлектрика не ограничивается рождением одного экситона. Когда число экситонов значительно меньше числа атомов в кристалле (наиболее важный случай), то, естественно, среднее расстояние между экситонами значительно больше среднего расстояния между атомами, и взаимодействие между экситонами значительно меньше взаимодействия между атомами¹³. Поэтому приближенно

энергия возбужденного состояния электронов диэлектрика равна сумме энергий экситонов.

¹² Мы пока, чтобы не усложнять изложения, нарочно не отличаем квазиимпульс от импульса (замечание для знакомых с элементами квантовой физики твердого тела).

¹³ Тут допускается неизбежная, по-видимому, скороговорка. Может возникнуть недоумение: «О каком расстоянии между экситонами может идти речь, если экситон — волна?». С другой стороны, не вызывало же сомнений, что среднее расстояние между частицами газа $\sim n^{-1/3}$. А ведь квантовое состояние частицы газа — плоская волна. Конечно, и при описании газа экситонов, и при описании обычных газов, говоря о среднем расстоянии между частицами, надо использовать понятие волнового пакета. Но для оценки разреженности системы частиц (экситонов) естественно и правильно использование понятия плотности n , равной полному числу частиц, деленному на объем, в котором они заключены.

Экситон — первый пример квазичастицы (заметим, и исторически первый).

А теперь «вспомним», что атомы твердого тела могут колебаться. Движение атомов напоминает движение шариков, скрепленных пружинками. Очевидно, что отдельный атом не будет колебаться независимо от других, колебание любого атома вызовет движение соседних — по телу побегут волны... А дальше опять «работает» корпускулярно-волновой дуализм

волна → квазичастица.

Так как волны колебаний суть звуковые волны, то эти квазичастицы получили название *фононов* (П. Дебай). Название «фонон» предложено И. Е. Таммом.

Энергия колебательного движения кристалла
равна сумме энергий фононов.

Равенство, конечно, приближенное. Фононы взаимодействуют друг с другом, но это взаимодействие неизмеримо меньше, чем взаимодействие друг с другом атомов кристалла.

Динамической характеристикой частицы в свободном пространстве служит ее масса m , определяя связь между энергией частицы ϵ и ее импульсом p ($\epsilon = p^2/2m$), а также скорости v с импульсом $v = p/m$. Связь между энергией и импульсом квазичастицы (ее именуют законом дисперсии) значительно сложнее, причем каждый тип квазичастиц обладает своим специфическим законом дисперсии. Однако у законов дисперсии квазичастиц всех типов есть общая черта:

энергия квазичастицы периодически зависит
от импульса,

причем период определяется геометрией кристалла и от типа квазичастицы не зависит.

Причина периодической зависимости очень глубока. Возможность характеризовать стационарное состояние частицы в пустоте импульсом, или, другими словами, существование закона сохранения импульса — следствие однородности пространства. Квазичастицы существуют не в однородном, а в периодическом пространстве

кристаллической решетки. Строго говоря, квазичастица не имеет определенного значения импульса, однако благодаря периодичности кристалла ее стационарное состояние можно характеризовать вектором, очень похожим на импульс. Его называют квазиимпульсом. До сих пор мы попросту опускали приставку «квази».

То обстоятельство, что элементарное возбужденное состояние кристалла напоминает частицу, — весьма нетривиальный факт. Ведь, казалось бы, нет никаких оснований для того, чтобы какое-либо состояние твердого тела — системы из бесконечно большого числа частиц — вообще возможно было описать в терминах, пригодных для описания одной частицы. Несомненно, существует определенная причина, позволяющая вводить одночастичное описание. Причина эта — периодичность кристаллической решетки, а высокопарно — пространства, в котором «живут» квазичастицы. При изучении аморфных тел одночастичное описание их состояния непригодно. И хотя в последние годы достигнуты большие успехи в понимании квантовых состояний аморфных тел, до сих пор не выработались простые наглядные представления, дающие возможность рассказать о структуре их энергетического спектра популярно, «на пальцах».

Типов возбуждений в кристаллах много. Поэтому много и типов квазичастиц.

Квазичастицы, как и обычные частицы, бывают и бозонами и фермионами. Статистика квазичастиц (фермионы или бозоны?) не зависит от свойств атомов, из которых тело состоит. Фонон — всегда бозон: и в кристалле кислорода, где он описывает колебание молекулы, подчиняющейся статистике Бозе—Эйнштейна, и в экзотическом кристалле, состоящем из атомов легкого изотопа гелия, He^3 — типичных представителей частиц, подчиняющихся статистике Ферми—Дирака. Статистика квазичастиц зависит (в конечном итоге) от характера возбуждения и выясняется при последовательном квантовомеханическом его описании.

Существование квазичастиц-фермионов связано с движением по кристаллу отдельных частиц-фермионов. Наиболее изучено движение электронов в металлах и полупроводниках (см. ниже).

Квазичастиц-бозонов много. По происхождению их можно (весьма условно, правда) разделить на два рода,

Первый — квантованные классические колебания. Второй — связанное состояние двух фермионов. Примерами квантованных классических колебаний служат фононы (см. выше) и магноны — кванты колебаний магнитных моментов в ферро- и антиферромагнетиках. Примером связанного состояния фермионов может служить экситон. Возбужденное состояние атома (или молекулы) можно рассматривать как связанное состояние электрона (находящегося на возбужденном уровне) и дырки (свободного состояния). Перемещение возбуждения от атома к атому — совместное движение связанных электрона и дырки — и есть экситон.

Свойства коллективов квазичастиц-бозонов напоминают свойства бозе-частиц ниже температуры бозе-эйнштейновской конденсации. Число квазичастиц не сохраняется — оно зависит от степени возбуждения твердого тела, как и число движущихся частиц в бозе-газе при низкой температуре. При абсолютном нуле температуры квазичастиц-бозонов нет вовсе.

Основное состояние кристалла — вакуум
относительно квазичастиц.

Как мы только что говорили, квазичастицы-фермионы описывают движение отдельных электронов. Прежде всего это электроны и «дырки» (см. выше) в ферми-газе металла. Анизотропия и периодичность пространства квазиимпульсов приводит к замене ферми-сферы сложной поверхностью, характерной для каждого металла; детали ферми-поверхностей — предмет исследования последних десятилетий. Но приставку «квази» электроны и дырки получили не только потому, что их закон дисперсии «ощущает» периодичность пространства, в котором они существуют (своей среды обитания). Взаимодействие между электронами не мало. Можно ли говорить вообще о какой-либо поверхности Ферми, об одночастичных возбуждениях — обо всем, что было использовано в теории ферми-газа? Оказывается, можно, если от частиц «перейти» к квазичастицам, т. е. к элементарным возбуждениям электронной жидкости. Движение каждого отдельного электрона не независимо от движения остальных электронов. Это проявляется в том, что энергия электрона — квазичастицы (при дан-

ном значении квазипульса) перестает быть индивидуальной (личной) характеристикой электрона, а зависит от состояния всех электронов. Если степень возбуждения электронной системы мала, то удастся описать свойства металла, не вводя слишком много новых понятий (Л. Д. Ландау; В. П. Силин). Более того, многие свойства металла могут быть описаны так, будто применима и справедлива модель газа, будто взаимодействия между электронами нет вовсе. (Это очень интересный пример саморасширения модели: модель оказывается справедливой в более широкой области параметров, чем та, для описания которой она создана.)

Полупроводник по своей электронной энергетической структуре отличается от диэлектрика не качественно, а количественно¹⁴: атомы полупроводника легко ионизируются. При этом возникают «свободный» электрон и дырка в электронной оболочке атома. Свободно перемещается по кристаллу не только электрон: из-за взаимодействия между близкими атомами дырка тоже перемещается по кристаллу — ведет «независимое существование». Электрон и «дырка» — примеры квазичастиц-фермионов. И в полупроводниках фермиевские возбуждения рождаются парами.

Введение квазичастиц делает слабо возбужденные состояния кристаллов наглядными, превращая твердое тело во вместилище (сосуд) для газов квазичастиц. Это не просто красивый образ. Тепловые, высокочастотные, гальванические, гальвано- и термомагнитные и другие свойства твердых тел удается представить в терминах газов квазичастиц, сопоставить макроскопическим свойствам твердых тел движение слабо взаимодействующих друг с другом квазичастиц. Иными словами, объяснение макроскопических свойств кристаллов производится путем исследования движения квазичастиц, макротермины расшифровываются и оказываются усредненными

¹⁴ Здесь использовано формальное определение полупроводника как диэлектрика с малой запрещенной зоной. Фактически, используемые в технике полупроводники содержат некоторое количество дефектов и примесей, которые кардинально меняют их электронные свойства. Так, например, легированные полупроводники вблизи абсолютного нуля температуры ведут себя как металлы с малым числом электронов проводимости.

характеристиками движения отдельных квазичастиц (среднее со-свойствами газов частиц).

Познавательный смысл введения квазичастиц и объяснение с их помощью свойств твердых тел выясняются, если обратить внимание на следующее обстоятельство. Квазичастица не описывает движения отдельной частицы — структурной единицы твердого тела. Напротив, как правило, квазичастица есть форма описания движения всех частиц твердого тела — такого движения, которое неразложимо на более простые.

Когда квазичастица (подобно фонону) — результат квантования классического волнового движения атомов, то, ограничиваясь классическим описанием, конечно, можно вычислить амплитуду колебания каждого атома твердого тела с собственной частотой ω , а потом — приходящуюся на это движение часть энергии. При этом легко убедиться, что энергия колебания атома будет того же порядка, что и его энергия взаимодействия с соседями. Этот абзац должен разъяснить утверждение о том, что движение, порождающее квазичастицу, «неразложимо на более простые движения».

При квантовомеханическом описании элементарного возбуждения неразложимость проявляется еще более четко. Соотношение неопределенности запрещает более подробное описание состояния тела, чем то, которое используется при введении квазичастицы. Нельзя ответить на вопрос: «Что делает такой-то атом, когда в кристалле существует один фонон?»

Хотя в появлении (рождении) квазичастицы, как мы только что настойчиво подчеркивали, принимают участие все атомы кристалла, сама квазичастица — микроскопический объект в том смысле, что энергия и импульс квазичастицы — атомных масштабов. Так, средняя энергия фонона при низких температурах порядка $k_B T$, а экситона — порядка энергии возбуждения отдельного атома. Как правило, число квазичастиц, имеющих в твердом теле, огромно даже при низких температурах, хотя при $T=0$ К квазичастиц нет вовсе. Так, например, при 1 К в 1 см³ практически любого твердого тела около 10^{16} фононов!

Мы привели всего три примера типов квазичастиц. Конечно, они не исчерпывают всех типов. Типов квазичастиц очень много. В магнетиках, как упоминалось, существуют магноны — специфические квазичастицы, опи-

сывающие элементарное возбуждение спиновой системы; в ионных кристаллах — поляроны — электроны, движение которых сопровождается перемещением локальной поляризации ионной решетки, в полупроводниках — особые экситоны (Ванье—Мотта) — атомоподобное образование из электрона и «дырки»; в сверхпроводниках — куперовские пары (о них будет сказано ниже) и т. д., и т. д.

6. МОДЕЛЬ ИЛИ РЕАЛЬНОСТЬ?

В словах «модель», «моделирование» есть привкус подмены, подделки. Что-то настоящее, сложное подменяется упрощенным, ненастоящим. Описывая движение атомных частиц с помощью квазичастиц, создаем ли мы удобную, наглядную, но упрощенную модель атомных движений или атомные частицы так и движутся, как мы себе представляем? Другими словами: реальны ли фононы, магноны и т. д. или это только прием для расчета?

С электронами, ядрами, протонами и нейтронами, казалось бы, такого вопроса не возникает. Их можно наблюдать непосредственно: один электрон, один протон, один нейтрон — отдельно, вне атома, вне ядра. Но так ли уж убедительно доказательство реальности путем извлечения, основанное на принципе: если я могу нечто извлечь из... значит, оно... существует? При β -распаде из ядра вылетает электрон или позитрон, но точно известно, что электронов и позитронов в ядре нет — они рождаются в процессе радиоактивного распада ядра. Еще более непривычная ситуация с кварками (мы уже это отмечали). Все большее количество фактов укладывается в предположение, что протоны и нейтроны состоят из кварков (рассеяние энергичных электронов на нуклонах происходит так, будто нуклоны состоят из невзаимодействующих частиц). Но, по-видимому, кварки могут существовать только внутри — их извлечь нельзя. Реальны ли кварки?

Фононы, магноны, «дырки» извлечь из твердого тела нельзя, электрон металла или полупроводника превращается в обычную частицу, покинув проводник. И все же квазичастицы совершенно реальны. Нейтрон, рассеиваясь на кристалле, изменяет свой импульс на

величину импульса фонона, а энергию — на величину энергии фонона. Рассеяние нейтронов — один из важнейших методов изучения закона дисперсии фононов (и других квазичастиц). К сожалению, не слишком много способов «непосредственного общения» с отдельной квазичастицей, но ведь и отдельные атомы или электроны мало доступны для исследования. В последние десятилетия возник специальный раздел физики — спектроскопия твердых тел. Квазичастицы (электроны и дырки полупроводников и металлов, фононы, магноны) известны сейчас не хуже, чем атомы, из которых состоят твердые тела — вместительница квазичастиц.

Сомневаться в реальности квазичастиц нет оснований. Вопрос, вынесенный в заголовок, следует перефразировать: «Какова реальность модели?»

Введение квазичастиц всегда связано с приближением, т. е. с пренебрежением чем-то, что (по мнению специалистов) может быть опущено без потери точности. Важным, но, к сожалению, не всегда строго соблюдаемым принципом служит наличие физического малого параметра, допускающего предельный переход, который, с одной стороны, качественно упрощает картину, а с другой — не является логичным (т. е. противоречащим общим законам физики¹⁵). Остановимся на некоторых примерах.

Число степеней свободы в твердых телах огромно. Одновременное рассмотрение сразу их всех чрезвычайно затруднительно и в плане того, о чем говорилось выше, бессмысленно, так как привело бы к столь сложной картине, что результат рассмотрения не мог бы служить основой объяснения. Анализ показывает, что степени свободы естественно делятся на группы, так что каждая группа слабо зависит от остальных, причем слабость зависимости (слабость взаимодействия) оправдана существованием малого параметра. С подобной ситуацией мы уже встречались, рассматривая примеры квазичастиц; экситоны описывают электронные степени свободы, фононы — колебания центров тяжести атомов;

¹⁵ К последнему требованию следует относиться с большой осторожностью, так как после предельного перехода мы часто имеем дело с воображаемым объектом, которого нет в природе (см. ниже). В какой мере к нему применимы общие законы природы? В выборе приближения огромную роль играют интуиция и опыт.

в этом случае малый параметр — отношение масс электрона и атома: m/M . Это приближение имеет специальное название, его называют адиабатическим: быстрые электроны легко подстраиваются (приспосабливаются) к медленному движению атомов. Адиабатическое приближение проанализировано очень тщательно, к нему найдены и вычислены поправки, дающие возможность учитывать взаимодействие между электронными возбуждениями и фононами, но не ликвидирующие факт существования квазичастиц разного типа.

Квазичастица есть физическая реальность только тогда, когда время жизни возбужденного состояния кристалла τ велико: не должно нарушаться соотношение неопределенности для энергии $\epsilon \gg \hbar/\tau$. Из определения квазичастицы ясно, что время ее жизни не бесконечно. С ростом числа квазичастиц (т. е. с ростом температуры тела) квазичастицы чаще сталкиваются друг с другом, что уменьшает их время жизни τ . Поэтому квазичастицы особенно удобны для описания низкотемпературных свойств твердых тел. Но ведь и обычный, состоящий из частиц газ с ростом плотности все менее напоминает идеальный газ — все большую роль играет взаимодействие между частицами, которым можно почти полностью пренебречь, когда плотность газа мала.

Еще раз вернемся к электронной системе металла. Мы уже говорили, что введение заряженных квазичастиц (электронов и дырок) позволяет, не пренебрегая взаимодействием между частицами, построить микроскопическую теорию металла (теорию заряженной ферми-жидкости¹⁶). Это — очень важный пример, так как здесь за основу описания принимается не система невзаимодействующих частиц, как в реальных газах, или квазичастиц, как в кристаллах. Теория базируется на близости слабовозбужденных состояний к основному, которое похоже на основное состояние ферми-газа: все электроны занимают состояния с энергией, меньшей фермиевской. Условие близости к основному состоянию формулируется просто: температура T мала по сравнению с фермиевской температурой ϵ_F/k_B . Так как для металлов фермиевская температура $\sim 10^5$ К, то теория

¹⁶ Главное сходство между ферми-газом и ферми-жидкостью в том, что в обоих случаях одночастичные состояния — состояния с определенным импульсом (в кристалле — квазиимпульсом),

годится практически при всех температурах, при которых существует металл¹⁷.

7. ТВЕРДО ЛИ ТВЕРДОЕ ТЕЛО?

Хотя все ясно представляют себе, что такое твердое тело, дать строгую дефиницию совсем не просто. Иногда твердые тела напоминают жидкости — текут, а жидкости, наоборот, хрупки, как стекло. Разнообразие механических свойств в различных условиях, заставляющее быть осторожным при определении (что есть смола — мягкое твердое тело или твердая жидкость?), не есть причина, обусловившая название этого раздела. Дело совсем в другом. В твердом теле, как мы уже отмечали, много разных степеней свободы, разных по своей природе — ионных, электронных, спиновых. Одни описывают движение ионов, другие — электронов, а третьи — спинов. И мы уже отмечали, что часто одни степени свободы можно рассматривать независимо от других — во всяком случае в некотором приближении. Так вот, хотя понятие агрегатного состояния относится к веществу в целом (оно либо твердое, либо жидкое, либо газообразное), одни степени свободы в твердом теле ведут себя как газы, другие — как жидкости, а третьи — как твердые тела, кристаллы.

Мы проиллюстрируем это несколькими примерами разной общности.

Электроны — металла — ферми-жидкость со всеми присущими жидкости свойствами. Прохождение тока по проводнику напоминает протекание жидкости по трубке. Правда, настоящая жидкость тормозится только о стенки сосуда, а электроны — о любые нерегулярности кристаллической решетки. Так как электроны заряжены, то многими своими свойствами, например высокочастотными, электронная жидкость напоминает плазму.

Фононы, описывающие колебательные степени свобо-

¹⁷ Теория ферми-жидкости была сначала построена для объяснения свойств жидкого легкого изотопа He³, в применении к которому она справедлива при $T < 1$ К. Правда, при самых низких температурах ($T \lesssim 10^{-3}$ К) теория отказывает: He³ переходит в сверхтекучее состояние. Свойства многих металлов (Pb, Sn и др.) при температуре, близкой 0 К, тоже не могут быть описаны стандартной теорией ферми-жидкости, так как эти металлы переходят в сверхпроводящее состояние.

ды атомов (или ионов), — бозе-газ, причем даже вблизи температуры плавления, когда число фононов во много сотен раз превышает число атомов тела¹⁸, взаимодействие между фононами не столь велико, чтобы отказать фононам в «звании» газа (его неидеальности для этого недостаточно; длина свободного пробега фононов все же больше среднего расстояния между ними).

А вот спиновая подсистема твердого тела имеет разные «агрегатные состояния» при разных температурах. Речь идет о спинах (магнитных моментах) парамагнетика. При высоких температурах спины неупорядочены¹⁹, а их энергия взаимодействия друг с другом (в расчете на одну частицу) мала по сравнению с $k_B T$ — как в газе. Так как атомы, которым принадлежат спины, «закреплены» в определенных ячейках кристалла, то говорят о решетчатом газе, но именно... о газе. При низкой температуре все спины в «поисках» наименьшего энергетического состояния упорядочиваются — занимают определенное положение в пространстве. Это — кристалл. Заметим, что не всегда структура спинового кри-

¹⁸ Число фононов в твердом теле

$$N_{\text{ф}} \sim \begin{cases} N(T/\Theta)^3 & \text{при } T \ll \Theta, \\ N(T/\Theta) & \text{при } T \gg \Theta, \end{cases}$$

где N — число атомов (ячеек) кристалла, а Θ — температура Дебая. При высоких температурах число фононов в кристалле, действительно, значительно больше числа атомов в нем. В этом нет ничего особенно удивительного: среднее состояние каждого осциллятора при высокой температуре соответствует большому квантовому числу n . Действительно,

$$\begin{aligned} \text{при } k_B T \gg \hbar\omega_{\text{макс}} = k_B \Theta; \quad \bar{\epsilon} = (n + \frac{1}{2})\hbar\omega \sim n\hbar\omega = \\ = \frac{\hbar\omega}{\exp(\frac{\hbar\omega}{k_B T}) - 1} \quad k_B T; \quad n \approx k_B T / \hbar\omega \gg 1, \end{aligned}$$

¹⁹ Неупорядоченность спинов в парамагнитном состоянии означает, что движение каждого спина не зависит от его взаимодействия с соседями. Благодаря этому среднее значение магнитного момента атома в каждом из узлов кристаллической решетки в парамагнитном состоянии равно нулю. Неупорядоченность спинов по кристаллу может быть и иной. В каждом узле кристаллической решетки среднее значение магнитного момента отлично от нуля, но ориентация магнитных моментов по кристаллу (в различных узлах) случайна. Поэтому средний магнитный момент по всему кристаллу равен нулю. Такое спиновое состояние действительно осуществляется, а тела с описанной спиновой структурой называются спиновыми стеклами. Исследование свойств спиновых стекол — модное направление физики магнитных явлений.

сталла совпадает со структурой кристалла, в который уложены атомы твердого тела. Бывают случаи, когда ячейки этих кристаллов даже несоизмеримы.

При отличной от абсолютного нуля температуре спины (магнитные моменты) не полностью упорядочены — среди них есть «недисциплинированные», т. е. отклонившиеся от правильного положения. Эти нарушения порядка не локализуются, а в виде волн распространяются по кристаллу. Их так и называют спиновыми волнами, а соответствующие им квазичастицы — магнонами (мы уже их упоминали). Магнонов при низких температурах немного, они редко сталкиваются друг с другом. Типичный газ. Обычно между газовой и кристаллической фазами располагается жидкая. И спины вблизи температуры Кюри (для ферромагнетиков) или температуры Нееля (для антиферромагнетиков) ведут себя подобно жидкости: их энергия взаимодействия (в расчете на одну частицу) порядка $k_B T$. Конечно, это не обычная жидкость, а решеточная.

Газы частиц (как в случае спинов) или квазичастиц (фононов, магнонов...), характеризующих внутренние степени свободы частиц твердого тела, занимают особое место. Так как частицы (квазичастицы) в газе слабо взаимодействуют друг с другом, то именно в случае газа средние характеристики (теплоемкость, давление, теплопроводность и т. п.) можно выразить через усредненные характеристики движения отдельных частиц или квазичастиц²⁰. Основные достижения квантовой физики твердого тела связаны с тем, что свойства твердых тел удается описать в газовых терминах, в результате чего характеристики твердого тела оказываются выраженными в виде усредненных величин, описывающих свойства отдельных квазичастиц или частиц (их скорости, длины пробега и т. п.).

Итак, структура теории такова: система сильно взаимодействующих частиц «сводится» к системе слабо взаимодействующих квазичастиц — к газу квазичастиц. Точнее, выделяется подсистема степеней свободы (частицы), которая ведет себя, как газ. Как ни парадоксально, теория твердого тела основывается на теории квантовых газов.

В этой схеме даже с познавательной точки зрения есть нетривиальное звено: элементарной сущностью, ос-

²⁰ Последнее утверждение относится и к ферми-жидкости.

новой объяснения свойств твердого тела служит квази-частица. Но квазичастица есть квант движения, в котором принимают участие, как правило, все атомы твердого тела. Может быть, возник порочный круг? Конечно, нет. Свойства, т. е. сложные движения, объясняются с помощью простых движений. Или, точнее, более простых...

Конечно, теория твердого тела не сводится полностью к теории газов квазичастиц. Мы уже упоминали о спиновой решеточной жидкости вблизи температуры перехода, когда не применимо газовое приближение ни в терминах частиц, ни в терминах квазичастиц. Система спинов вблизи точки перехода — пример истинно конденсированной системы. Для описания таких систем разработан совершенно другой язык, общий для физических объектов совершенно различной природы, но объединенных общностью свойств.

Во всех системах, о которых идет речь, скачком изменяется симметрия тела за счет появления нового свойства — намагниченности или магнитного порядка в ферро- и антиферромагнетиках, сверхпроводящего тока в сверхпроводнике, сверхструктуры в упорядочивающихся сплавах и т. п. Скачкообразные изменения свойств твердых тел — столь интересная тема, что, по нашему мнению, заслуживает более подробного, чем это сделано в тексте, рассмотрения.

В начале нашего рассказа об агрегатных состояниях конденсированных тел необходимо подчеркнуть, что химический состав тела не предопределяет его свойств. Олово может существовать в виде серого или белого олова, отличающихся по своим свойствам. А графит и алмаз столь непохожи друг на друга, что трудно себе представить, что и тот, и другой состоят из атомов углерода. Одна из задач атомной теории конденсированных тел — расчет диаграмм состояний различных веществ, т. е. выяснения того, какие состояния осуществляются в каких условиях и каким образом происходит переход из одного состояния в другое.

Хотя различных тел «бесконечно» много, а состояний еще больше, все переходы из одного состояния в другое (их называют фазовыми переходами) допускают простую систематизацию: по своему характеру они могут быть отнесены либо к фазовым переходам 1-го рода, либо к фазовым переходам 2-го рода. Наименование

переходов связано с поведением производных термодинамического потенциала: при фазовом переходе 1-го рода скачкообразно изменяются первые производные (удельный объем, энтропия...), а при переходе 2-го рода — вторые производные²¹ (теплоемкость, коэффициент теплового расширения...).

Однако различие фазовых переходов 1-го и 2-го рода не исчерпывается характером поведения производных термодинамического потенциала. Фазовые переходы 1-го рода для нашего рассказа менее существенны. Приближения к точке перехода обе фазы (по своим внутренним свойствам) не «чувствуют»: просто атомы, из которых состоит тело, могут быть «сложены» по-разному; ниже точки перехода энергетически более выгодна одна фаза, выше точки перехода — другая. Внутренние состояния каждой из фаз как вдали, так и вблизи от точки перехода описываются в терминах частиц или квазичастиц (это зависит от условий и от того, о каких степенях свободы идет речь, см. выше). Хотя фазовый переход 1-го рода может произойти в тот «момент», когда энергии (точнее, свободные энергии или термодинамические потенциалы в зависимости от условий эксперимента) двух фаз равны, как правило, переход затягивается — при фазовом переходе 1-го рода обычно наблюдаются переохлаждения и перегревы (гистерезис).

Иначе дело обстоит при фазовом переходе 2-го рода. При фазовом переходе 2-го рода действительно происходит *переход, превращение*. Нечто, чего не было в одной фазе (более симметричной), в ней зарождается в точке перехода, зарождается, приводя к исчезновению, или, как принято говорить, нарушению симметрии.

Симметрия тела, его геометрия играют огромную роль в исследовании свойств конденсированных систем (мы еще будем об этом говорить в одном из следующих разделов). Выделилась особая дисциплина — кристаллография, занятая исследованием (главным образом) геометрических свойств твердых тел. Остановившись бегло на симметрии, в рассказе о фазовых переходах,

²¹ Более строго надо было бы сказать, что при фазовом переходе 2-го рода первые производные термодинамического потенциала не имеют скачков. Вторые же производные не только имеют скачки, но и ведут себя весьма сложно — в точке перехода они могут обратиться в бесконечность (см. ниже).

мы хотим подчеркнуть важность выхода за пределы привычных представлений, необходимость понимания возможности нетривиального результата. Сейчас, по-видимому, станет ясно, в чем дело.

Вернемся опять к фазовому переходу «парамагнетик — ферромагнетик» (типичный пример фазового перехода 2-го рода). Принципиальное понимание природы этого перехода наступило тогда, когда было понято (В. Гейзенберг, Я. И. Френкель), что за ферромагнетизм ответственные обменные силы (см. выше). Хотя обменные силы — квантовое следствие электростатического взаимодействия зарядов, благодаря неразличимости электронов и принципу Паули, они (силы) зависят от взаимного направления спинов взаимодействующих частиц, но не зависят от того, куда направлен суммарный спин взаимодействующих частиц. Строго: спиновый гамильтониан атомных частиц с обменным взаимодействием изотропен относительно общего поворота всех спинов. Этим свойством обладает высокотемпературная парамагнитная фаза. Суммарный спин (магнитный момент) равен нулю. Изотропия (симметрия) не нарушена. Казалось бы, обменные (изотропные по суммарному спину) силы не могут нарушить изотропию. Но это не так. В результате перехода в ферромагнитное состояние спины «выстраиваются» (к этому их «принуждает» именно обменное взаимодействие), возникает суммарный магнитный момент тела и изотропия (симметрия) нарушается, подтверждая общий принцип, гласящий: решение может обладать меньшей симметрией, чем постановка задачи (ее гамильтониан, уравнение Шредингера).

Примеров нарушения симметрии можно привести множество. Например, разбиение ферромагнитной пластины на домены из-за магнитного взаимодействия, появление сверхтекучего тока ниже λ -точки в гелии и др. Интересно отметить, что нарушение симметрии, подробно изученное в квантовой теории конденсированного состояния вещества, оказалось важным явлением в физике элементарных частиц. Так происходит обмен идеями между далекими областями физики — характерное явление в научном познании единого и разнообразного мира.

Сейчас мы «подошли» к фазовому переходу 2-го рода со стороны высоких температур (из парамагнитной фазы в ферромагнитную). А теперь поступим наобо-

рот: рассмотрим переход из ферромагнитного состояния в парамагнитное. При абсолютном нуле температуры все спины строго упорядочены, магнитный момент имеет свое максимально возможное значение. С повышением температуры строгая упорядоченность нарушается (см. выше), и магнитный момент ферромагнетика уменьшается, стремясь к нулю при стремлении температуры к точке перехода (к точке Кюри T_c). Вблизи точки Кюри (при $T \lesssim T_c$) обменные силы почти не могут преодолеть дестабилизирующую роль теплового движения. Это проявляется в том, что существенно повышается роль флуктуаций: из-за того что магнитный момент стремится к нулю при $T \rightarrow T_c$, его флуктуации оказываются относительно очень большими, а их неучет приводит к грубым ошибкам.

Флуктуация любой макроскопической величины не что иное, как волна — распространяющееся по телу колебание этой величины. Флуктуации магнитного момента — его колебания. Анализ показывает, что особенно существенны длинноволновые колебания: при возрастании длины волны их энергия стремится к нулю, а значит, при конечной температуре $T \sim T_c$ их бесконечно много. Но если колебаний (волн) много, то нельзя пренебречь их взаимодействием, его необходимо учитывать. Именно поэтому состояние атомных спинов вблизи температуры перехода было названо спиновой жидкостью. Следует отметить, что спиновая жидкость вблизи точки Кюри обладает весьма своеобразными свойствами. Из-за роста роли флуктуаций при $T \sim T_c$ многие физические параметры, характеризующие эту жидкость, стремятся к бесконечности.

Трудности, возникающие при исследовании систем в подобных экстремальных условиях, в какой-то мере компенсируются возможностью общего подхода. Хотя об этом мы уже упоминали, логика рассказа разрешает вернуться к факту существования «языка, общего для физических объектов совершенно различной природы» (стр. 44), и пояснить причину его существования. Так как основную роль играют длинноволновые флуктуации, то ясен их классический (макроскопический) характер, а отсюда легко понять, что не столь важно, что (конкретно) флуктуирует, а важно, какими геометрическими свойствами обладает флуктуирующий параметр (скаляр он, вектор или тензор) и в пространстве какой размер-

ности он существует. Таким (геометрическим) путем систематизируются все фазовые переходы 2-го рода; при этом оказывается, что очень далекие по своей природе переходы 2-го рода обладают близкими свойствами. Так, переход гелия в сверхтекучее состояние описывается теми же формулами, что переход в упорядоченное состояние ферромагнетика, намагниченность которого располагается в избранной плоскости (ферромагнетик типа «легкая плоскость»), а упорядочение сплавов напоминает сегнетоэлектрический переход или ферромагнитный переход в магнетике с «легкой» осью. Появляется (и используется) заманчивая идея — моделировать один фазовый переход другим, более доступным для экспериментального или теоретического анализа.

В плане нашего рассказа важный тезис, который автор хотел бы, чтобы читатель усвоил из заключительной части настоящего раздела, звучит так: отнюдь не всегда движения в твердом теле сводятся к движению слабо взаимодействующих друг с другом частиц или квазичастиц. К вопросу о несводимости мы еще вернемся.

8. МИКРО... И МАКРО...

Квазичастица, конечно, микроскопический объект. Энергия, импульс отдельной квазичастицы суть величины атомного масштаба. В большинстве случаев макроскопически наблюдаемое явление создается движением огромного (макроскопического) числа квазичастиц. Это обстоятельство не было бы смысла подчеркивать, если бы в движении, квант которого мы называем квазичастицей, не принимали бы участия — в большинстве случаев — все атомы твердого тела...

Уже это сопоставление делает понятия «микро...» и «макро...» не столь очевидными, как это представляется на первый взгляд, согласно которому микро... всегда меньше макро... — конечно, если их вообще можно сравнивать. Вот простой пример. Длина свободного пробега электрона, несомненно, микропараметр. В обычных условиях длина свободного пробега электрона металла $l \sim 10^{-6}$ см. Одна миллионная сантиметра действительно малая величина, например по сравнению с толщиной проволоки, по которой течет ток. Или по сравнению с расстоянием, на которое проникает электромагнитная волна в металл (это расстояние называют глубиной

скин-слоя). Но в чистых специально приготовленных образцах металлов длина свободного пробега, возрастая с понижением температуры, может оказаться равной одному или нескольким миллиметрам. В этих условиях все привычные соотношения перестают выполняться: длина свободного пробега — микропараметр — оказывается больше толщины проволоки или глубины скин-слоя: микро... больше макро...!

Приведенный пример весьма прост и нагляден²². Однако надо иметь в виду, что нарушение привычных соотношений не ограничивается демонстрацией необычности ситуации: свойства металла при низких температурах качественно отличаются от их свойств при высоких температурах. В частности, проводимость тонких проволок и отражательная способность металла иногда вообще перестают зависеть от длины пробега электронов l .

Главная мысль, которую мы формулировали выше, подкрепляли примерами и комментировали, по существу, очень проста: объяснение макро... осуществляется с помощью микро... Нетривиальность этого утверждения в том, что микро... это не просто молекулы, атомы, ионы, электроны, а достаточно сложные, но неразложимые на более элементарные движения, квазичастицы.

И вот теперь мы хотим попытаться рассказать о таких макроскопических движениях в твердых телах, которые не суть суммы элементарных движений микроскопического масштаба.

Сначала об основном состоянии твердого тела, о состоянии с наинизшей из возможных энергий. Это — недостижимое состояние, так как оно должно осуществиться при абсолютном нуле температуры. И хотя научились подбираться к абсолютному нулю на «расстояние» порядка тысячной градуса и меньше, строго говоря, получить абсолютный нуль нельзя. Но исследовать состояние твердого тела в основном состоянии, конечно, можно. Хотя бы потому, что на его фоне «живут» квазичастицы, фон влияет на их «условия жизни». Основное состояние можно изменять путем внешних воздействий (давлением, магнитным полем), а результат воздействий — исследовать.

²² Такая ситуация встречается не только в физике твердого тела. В разреженном газе длина свободного пробега молекул может значительно превышать размеры сосуда, а в космическом газе — достигать космических размеров.

Итак, основное состояние. В том смысле, о котором мы говорили, твердое тело (как в основном состоянии, так и в возбужденном) состоит из атомов (или молекул) или из ионов и электронов. Основное состояние имеет вполне определенную структуру, например, периодическую. Но понятия «периодическая структура» и «состав»²³ находятся в непривычном соотношении. Привычно думать, что если атомы уложены в периодическую кристаллическую решетку, то каждый атом, каждый электрон занимают в ней определенные места. Но квантовая механика запрещает такую детализацию утверждений. Микрочастицы принципиально неразличимы. А утверждение «такой-то атом находится в такой-то ячейке кристалла» противоречит неразличимости частиц... И еще... «Состав» мы связывали с аддитивностью составных частей. Энергия основного состояния (та ее часть, которая не связана с энергией покоя частиц, но играет важную роль в физических свойствах тел, определяя, например, температуру плавления или сжимаемость) не есть сумма энергий микрочастиц тела. Она определяется энергией взаимодействия частиц.

Принцип неразличимости выступает не только как философский принцип. Как всякий физический принцип он, описывая реальные свойства частиц, приводит к наблюдаемым эффектам. Прежде всего из-за неразличимости частиц энергия их взаимодействия не сводится к классической. Часть энергии взаимодействия (ее называют обменной энергией) вовсе не имеет классического аналога. Обменная энергия — непосредственное следствие неразличимости частиц.

В конце 60-х — начале 70-х годов в физических журналах появился новый термин — «квантовый кристалл». Сейчас этот новый объект и его свойства прочно вошли в научную литературу. Интересно было бы проследить на примерах из разных областей физики, в каких случаях придают объекту или свойству эпитет «квантовый». В физике твердого тела это часто происходит тогда, когда неожиданно выясняется, что квантовый характер движения проявляется там, где привыкли использовать классические представления. В каждом кристалле есть дефекты: чужеродные атомы, вакансии (пустые, неза-

²³ Отметим: термин «состав», «состоит» — из химии, а «периодическая структура» — из физики.

полненные узлы кристаллической решетки), дислокации (обрывы атомных плоскостей), наконец, границы кристаллитов и сама поверхность кристалла. Перемещение дефектов, как правило, происходит по законам классической физики: атомные частицы благодаря термической активации преодолевают потенциальные барьеры, отделяющие одно положение равновесия от соседнего, и тем самым осуществляют диффузию, рекристаллизацию, снятие напряжений и другие явления, важные для конструкционно-механических свойств кристаллов. Однако иногда, когда атомные частицы легки, а потенциальные барьеры относительно невелики, движение происходит совершенно иным способом: частицы из одного положения равновесия в другое проходят туннельным образом, причем неразличимость частиц кристалла приводит к полной делокализации дефектов (примесей и вакансий), тем самым превращая их в своеобразные квазичастицы — примесоны и вакансионы. Это превращение проявляется, в частности, в том, что коэффициент диффузии не стремится к нулю при стремлении к нулю температуры — происходит квантовая диффузия.

Наконец, еще один пример. Он носит весьма специальный характер. Столкновения друг с другом электронов металла служат причиной сопротивления металлов. Число электронов с уменьшением температуры не уменьшается, не уменьшается и число столкновений, а длина свободного пробега, обязанная этим столкновениям, все же стремится к бесконечности при $T \rightarrow 0$. Одновременно стремится к нулю электрон-электронная часть сопротивления. Причина — неразличимость частиц. При $T = 0$ факт столкновения электронов ничего не означает: и до, и после столкновения в каждом состоянии (в согласии с принципом Паули) находится по одному электрону — в результате столкновения ничего не изменилось (!).

Основное состояние твердого тела — вакуум относительно квазичастиц. Квазичастиц в основном состоянии нет. Однако возбужденное состояние твердого тела тоже не всегда есть состояние с квазичастицами. Другими словами, в твердых телах существуют движения, которые нельзя описать на языке квазичастиц.

Речь пойдет о сверхпроводимости.

Ряд металлов при $T = 0$ К и вблизи абсолютного нуля проводят ток без сопротивления. Эти металлы называются сверхпроводниками. Их много — моноатомных

и тем более сплавов и соединений. Если из сверхпроводника сделать кольцо, возбудить в нем ток, то ток в сверхпроводящем кольце не затухнет до тех пор, пока мы не разрушим сверхпроводимость, повысив температуру металла или включив достаточно сильное магнитное поле.

Незатухающий, недиссипативный характер движения электронов сверхпроводника показывает, что сверхпроводимость — совершенно особое явление, не имеющее аналога в классической физике. Сверхпроводящий ток — несомненно, макроскопический ток. Он регистрируется макроскопическими приборами, сверхпроводящий магнит (сверхпроводящий соленоид, по которому течет ток) может притянуть тяжелые предметы. Но в отличие от любого другого макроскопического движения его не надо поддерживать. В этом смысле аналогом движению электронов в сверхпроводнике может служить «вечное» движение электронов в атоме, а не движение макроскопических тел или макроскопических коллективов частиц — газов. Энергия сверхпроводника с током больше чем энергия сверхпроводника, в котором электроны (в среднем) покоятся, но незатухающий характер движения электронов в сверхпроводнике сближает токовое состояние сверхпроводника с основным. Действительно, это — основное состояние при заданном значении тока.

Мы не имеем возможности сколько-нибудь подробно остановиться на микроскопической теории сверхпроводимости. Изложим только схему объяснения феномена сверхпроводимости: электроны проводимости (квазичастицы-фермионы) на сравнительно больших расстояниях притягиваются друг к другу; передатчиками притяжения служат фононы (квазичастицы-бозоны); в результате притяжения электроны образуют квазимолекулы — пары; пары — бозоны; бозе-газ пар при температуре ниже некоторой критической образует конденсат; чтобы вырвать электрон из конденсата, надо разорвать пару, движение конденсата пар как целого и есть сверхпроводящий ток.

Мы понимаем, что объяснить теорию сверхпроводимости, используя эту схему, нельзя. Изложили мы ее только для того, чтобы подчеркнуть, что она строится в микротерминах: электроны проводимости, фононы, пары... Но структура объяснения сверхпроводимости существенно отличается от структуры объяснения явлений,

рассмотренных ранее. Сверхпроводимость существенно кооперативное явление, явление, не допускающее объяснения в газовых терминах.

Вернемся на мгновение к схеме. Просмотрев ее, можно решить, что элементарной сущностью сверхпроводимости служит пара. Но надо иметь в виду, что пары образуются только тогда, когда взаимодействующих электронов макроскопически много, а температура достаточно низка. Два изолированных электрона, притягивающихся с той же силой, что и электроны в металле, пару не образовали бы. Если опять вспомнить о неразличимости электронов, то естественно возникает такой зрительный образ: электроны разбились на пары, «взялись за руки», но все участники этой странной игры беспрерывно меняются местами.

И еще один удар по привычным представлениям о микро... и макро... Хотя среднее расстояние между электронами в металле порядка нескольких ангстремов ($\sim 10^{-8}$ см), характерный размер пары от 10^{-5} до 10^{-4} см. Более тысячи атомных расстояний отделяет электрон от его соседа по паре, между ними движутся многие миллионы спаренных электронов — все это и составляет конденсат. Может быть, представление о парах — просто удобный способ выразаться, дающий возможность, используя привычные представления (пары — молекулы), описать неопишемое? В каком-то смысле так оно и есть. Но все же реальность пар несомненна. Есть непосредственное экспериментальное доказательство того, что элементарный заряд движущихся микроскопических частиц, составляющих сверхпроводящий ток, равен $2e$, где e — заряд электрона²⁴, а размер пары не только допускает измерение. Делокализация электронов в паре на сравнительно больших расстояниях служит основой сверхчувствительных приборов, в которых основным элементом служит перегородка (барьер), пронизываемый только благодаря тому, что электроны на расстояниях порядка размеров пары взаимодействуют друг с другом.

Мы заговорили о сверхпроводимости, чтобы привести пример макроскопического движения, не сводимого к

²⁴ Заряд пары определяется из экспериментов по квантованию потока магнитного поля в цилиндре, окруженном сверхпроводником. Квант потока равен $2\pi\hbar/cq$, где c — скорость света, а q — заряд пары. Измерение показало: $q = 2e(1)$.

сумме движений квазичастиц. Примером такого движения служит сверхпроводящий ток. Конденсат пар движется как нечто целое. В частности, это проявляется в том, что описать движение можно только в макротерминах. Ну а пары? Не играют ли они роль квазичастиц? Нет! Пары движутся только все вместе, как нечто целое — их движение скоррелировано. Неупорядоченное (тепловое) движение осуществляют электроны, «вырвавшиеся» из пары. При $T=0$ свободных электронов (вне пар) нет вовсе, с ростом температуры их все больше, а пар в конденсате все меньше. Наконец, при определенной для каждого сверхпроводника температуре T_c (ее называют критической) все пары разорваны — металл переходит в обычное нормальное состояние.

Статическое сопротивление при $T < T_c$ равно нулю, как и при $T=0$. Проводимость осуществляется конденсатом пар. Вырвавшиеся из пар электроны обнаружить можно — по высокочастотным свойствам металла, а также по его теплоемкости.

Еще раз (даже опасаясь быть обвиненными в излишней настойчивости) повторю: в плане нашего рассказа сверхпроводимость понадобилась, чтобы продемонстрировать, что есть ситуации, когда при предельно микроскопическом описании свойств твердого тела не удается принять за основу совокупность слабо взаимодействующих микрообъектов (частиц или квазичастиц). Основой описания служит величина совершенно другой природы. В данном случае это — волновая функция конденсата. Она по своей сути макроскопична. Ее происхождение на сравнительно простых моделях можно проследить (в этом и заключается построение микроскопической теории), но она *несводима* в том смысле, что каждой отдельной частице или квазичастице тела нельзя приписать величину, суммирование (или усреднение) которых дает волновую функцию конденсата, описывающую коллективное скоррелированное движение электронов сверхпроводника.

Наконец, следует подчеркнуть квантовый характер сверхпроводящего движения. Сочетание слов «макроскопический» и «квантовый» тоже достаточно необычно, ведь привычная схема:

микро... → квантовый,
макро... → классический.

Мы уже отмечали этот факт.

Конечно, и эта схема условна. Без квантовой механики нельзя понять структуру атомов и молекул, а значит, и строение любых макроскопических тел. Слова «квантовый характер сверхпроводящего движения» означают нечто другое. Обычно квантовость «располагается» на более глубоком уровне, чем тот, который фиксирует макроскопическое свойство тела. Тогда мы не подчеркиваем квантового характера явления. Например, вязкость, теплопроводность и другие кинетические свойства многих газов целиком определяются тем, что атомы представляют собой «бесконечно» жесткие шарики фиксированного радиуса (приближение непроницаемых шаров). Почему атомы таковы, объясняет квантовая механика атома, а свойства газов описываются классическими столкновениями неразрушаемых и непроницаемых шариков. О таких газах никогда не говорят, что они квантовые...

А вот магнетизму мы приписываем эпитет «квантовый», чтобы подчеркнуть: без учета квантовых свойств (при $\hbar \rightarrow 0$) магнитный момент любой системы в любом агрегатном состоянии равен нулю.

Когда сверхпроводимость называют квантовым свойством, то утверждают, что, во-первых, по законам классической физики незатухающий ток не может существовать, а во-вторых, что уникальные свойства сверхпроводников обеспечивает структура энергетического спектра, понять которую без квантового подхода невозможно.

9. ФЕНОМЕНОЛОГИЯ И МИКРОСКОПИКА

В статьях по физике твердого тела часто можно встретить выражения: «согласно феноменологической теории...» или «феноменологическое рассмотрение показывает...» Иногда подобные словосочетания подчеркивают неизбежность вывода: «Иначе не может быть, так как это следует из феноменологии». Иногда, наоборот, ссылка на феноменологию как бы носит несколько извинительный характер: мол, автор ни на что особенно не претендует, он только формулирует те выводы, которые суть следствия из феноменологии. Подобные оттенки различных словоупотреблений особенно заметны, когда они принадлежат не автору феноменологического рассмотрения, а его оппоненту или тому, кто вслед за феноме-

нологической теорией построил микроскопическую. Переход от феноменологии к микроскопике — всегда достижение, хотя часто микроскопическое рассмотрение значительно менее общо, чем феноменологическое, а справедливость использованной модели (при микроскопическом рассмотрении) нередко обосновывается только тем, что не противоречит феноменологии.

Уже из последней фразы должно быть ясно, что автор брошюры высоко ценит феноменологический подход. Это действительно так, но раздел этот, конечно, введен не для того, чтобы объявить читателям о пристрастии автора. На стр. 19 приведена схема объяснения экспериментальных фактов, используемая в физике конденсированного состояния вещества. В ней есть этап — феноменологическое описание явления. Задача настоящего раздела — подробнее остановиться на этом этапе и показать на примерах, сколь много для объяснения дает феноменологическое описание.

Чтобы наши слова не казались схоластическими, начнем с очень простого примера. Исследование прохождения тока через проводники установило линейное соотношение между приложенной к проводнику разностью потенциалов и током, проходящим через проводник, — закон Ома. Запись этого факта в форме, исключая роль размеров проводника, приводит к формулировке закона Ома в дифференциальной форме

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} \quad \text{или} \quad \mathbf{E} = \rho \mathbf{j}, \quad (1)$$

где \mathbf{j} — плотность тока, \mathbf{E} — напряженность электрического поля, σ — удельная проводимость, а $\rho = 1/\sigma$ — удельное сопротивление. Буквы \mathbf{E} и \mathbf{j} напечатаны полужирным шрифтом, потому что и плотность тока, и напряженность электрического поля — векторы. Если известно сопротивление, то выписанные соотношения позволяют определить напряженность электрического поля по заданной плотности тока или, наоборот, \mathbf{j} по \mathbf{E} . Заметим, что согласно (1) оба вектора (\mathbf{E} и \mathbf{j}) параллельны друг другу — ток течет по полю. Последний вывод не учитывает возможной анизотропии проводников. Если проводник — монокристалл, то в общем случае напряженность электрического поля и плотность тока не параллельны друг другу, хотя линейная связь между этими величинами сохраняется. Соотношение (1) требует обобщения:

$$\mathbf{j} = \overset{\wedge}{\sigma} \overset{\wedge}{\mathbf{E}} \quad \text{или} \quad \overset{\wedge}{\mathbf{E}} = \overset{\wedge}{\rho} \mathbf{j}, \quad (2)$$

«Шляпка» над буквами σ и ρ означает, что удельная проводимость и удельное сопротивление — тензор второго ранга.

Остановимся на минуту. Мы сформулировали важный феноменологический результат, обнаружив, что гальванические свойства проводников описываются тензором второго ранга σ_{ik} (или $\rho_{ik} = \sigma_{ik}^{-1}$; $i, k = x, y, z$). По существу, это — геометрический факт, являющийся следствием того, что измеряемые величины \mathbf{E} и \mathbf{j} — векторы.

Придадим выражению (2) несколько другой вид:

$$\sigma_{ik} = \left(\frac{\partial j_i}{\partial E_k} \right)_{E=0}, \quad (2')$$

из которого ясно, что хотя тензор удельных проводимостей определяет, как проводник пропускает через себя электрический ток, сам он есть характеристика проводника без тока — при $\mathbf{E} \equiv 0$ (а значит, и при $\mathbf{j} \equiv 0$). Отсюда проистекают многие следствия, некоторые из них мы перечислили, указывая их первопричину. Подчеркнем при этом, что феноменологическое описание не требует знания природы описываемого явления. Нам не придется ссылаться на то, что ток переносят электроны. На этапе феноменологического описания в этом нет необходимости.

1) Тензор σ_{ik} — симметричный тензор второго ранга, т. е. $\sigma_{ik} = \sigma_{ki}$. Это означает существование весьма нетривиального (на мой взгляд) свойства: ток вдоль оси x при поле, направленном вдоль оси y , равен току вдоль оси y при поле, направленном вдоль оси x . Откуда такое «странное» свойство? Ответ для незнакомых с соответствующей главой теоретической физики²⁵ покажется удивительным: *симметрия тензора проводимости — следствие инвариантности уравнений механики относительно обращения течения времени (относительно замены t на $-t$).*

2) Симметрия тензора σ_{ik} позволяет привести его к главным осям, т. е. выбрать в кристалле такие перпендикулярные друг другу направления осей координат (1, 2, 3), в которых тензор не содержит недиагональных элементов:

²⁵ Она носит название «неравновесная» термодинамика.

$$\hat{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

В зависимости от геометрических свойств кристалла главные значения тензора $\hat{\sigma}$ либо равны друг другу, либо нет. Так, в гексагональном кристалле $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$ (оси 1 и 2 расположены в базисной плоскости, а ось 3 совпадает с осью кристалла), а в кубическом кристалле $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$, причем направление осей 1, 2 и 3 произвольно. И опять неожиданный (на первый взгляд) вывод: по своим гальваническим свойствам кубический кристалл аналогичен изотропному телу (тензор σ_{ik} «выродился» в скаляр: $\sigma_{ik} = \sigma \delta_{ik}$). Естественно, этот вывод относится к любому свойству, описываемому симметричным тензором второго ранга. Так, свет в кубическом кристалле распространяется так же, как в изотропном теле: тензор диэлектрических проницаемостей — симметричный тензор второго ранга. Но не нужно думать, что по всем свойствам кубический кристалл аналогичен изотропному телу. Например, упругие свойства кристаллов описываются тензором четвертого ранга, и упругие свойства кубических кристаллов не совпадают с упругими свойствами изотропных тел.

3) Второй пункт имеет чисто геометрическое (симметричное) происхождение. А вот вывод о том, что *главные значения тензора σ_{ik} положительны* (т. е. $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 > 0$, см. (3)), — следствие закона возрастания энтропии. Для интереса сформулируем последнее утверждение так: если бы существовали тела с отрицательной проводимостью, то можно было бы построить вечный двигатель второго рода. Последнее следствие (о положительности проводимости) требует важного уточнения. Закон возрастания энтропии справедлив для замкнутых (изолированных) систем и может не выполняться для открытых систем. Поэтому и проводимость в таких специально приготовленных, поддерживаемых в неравновесном состоянии проводниках может быть отрицательной, что позволяет их использовать для трансформации одного вида энергии в другие. Многие приборы работают на этом принципе.

Как мы видим, феноменологические утверждения о свойствах проводников весьма содержательны, хотя не дают никакой возможности разобраться в природе явле-

ния, оценить величину компонент проводимости, их температурную зависимость и пр.

Если исходить из предположения, гипотезы, утверждения, соображения (используемое слово не меняет дела) о том, что в проводниках ток есть упорядоченное движение электронов, то феноменологическим следствием этого предположения... будет формула $\bar{j} = en\bar{v}$, где n — число электронов в единице объема, а \bar{v} — средняя скорость электрона. Отсюда

$$\bar{v} = (\sigma/e^2n) eE \quad (4)$$

(мы пренебрегли анизотропией). Так как eE есть сила, действующая на электрон со стороны приложенного к проводнику электрического поля, то становится ясным: средняя скорость электрона пропорциональна действующей на него силе (коэффициент пропорциональности $u = \sigma/e^2n$ называют подвижностью). Объяснить явление электропроводности, т. е. вывести закон Ома, означает объяснить причину того, почему электроны не ускоряются действующей на них внешней силой, т. е. найти компенсирующую силу. Мы не собираемся излагать теорию электропроводности металлов и полупроводников (ее можно найти и в стандартных учебниках разной сложности, и в популярных изданиях²⁶), а хотим подчеркнуть связь между феноменологическим подходом и микроскопическим рассмотрением: феноменология поставила задачу микроскопике, или, говоря более определенно, уточнила задачу. В данном случае задача формулируется так: вычислить удельную электропроводность или, если согласиться с предположением, что за проводимость ответственны электроны, то определить их подвижность.

Мы видели, что феноменологическое рассмотрение основывается на фундаментальных принципах. Среди фундаментальных принципов важное место занимает принцип причинности в его конкретной физической постановке: свойства тела в момент времени t могут зависеть только от воздействия на него в предшествующие моменты времени — существует запаздывание, но нет опережения. Этот принцип, дополненный строгими математическими выкладками, позволяет сделать ряд удивительных (по своей определенности) выводов, касаю-

²⁶ См., например: Каганов М. И. Электроны, фотоны, магнеты. М., Наука, 1979.

щихся величин, носящих название обобщенных восприимчивостей. Диэлектрическая проницаемость κ — пример обобщенной восприимчивости. На ее свойствах, выведенных только из принципа причинности, мы и остановимся. Диэлектрическая проницаемость — комплексная функция частоты

$$\kappa(\omega) = \kappa'(\omega) + i\kappa''(\omega), \quad (5)$$

ее мнимая часть списывает электрические потери (переход энергии в тепло) при прохождении через тело электромагнитной волны. Так вот, во-первых, между действительной $\kappa'(\omega)$ и мнимой $\kappa''(\omega)$ частями $\kappa(\omega)$ существует интегральная связь — одна выражается через другую (так называемые соотношения Крамерса—Кронига); во-вторых, $\kappa'(\omega)$ — четная функция частоты ($\kappa'(-\omega) = \kappa'(\omega)$), а $\kappa''(\omega)$ — нечетная функция ($\kappa''(-\omega) = -\kappa''(\omega)$); отсюда, в частности, следует, что $\kappa''(0) = 0$; в-третьих, мнимая часть $\kappa''(\omega) > 0$ (это свойство, как и положительность электропроводности σ , следствие закона возрастания энтропии); в-четвертых, статическая диэлектрическая проницаемость $\kappa(0) > 1$, т. е. в природе нет диэлектрических аналогов диамагнетиков; электрическое поле всегда поляризует любое тело так, что введенный средний дипольный момент параллелен электрическому полю; в-пятых, в случае предельно высоких частот характер зависимости диэлектрической проницаемости от частоты не зависит от природы тела: $\kappa \rightarrow 1 \infty \omega^{-2}$.

Мы перечислили не все свойства, следующие из феноменологического рассмотрения, к ним можно было бы добавить, например, характер поведения $\kappa'(\omega)$ и $\kappa''(\omega)$ при очень низких частотах. Но, по-видимому, и так ясно, что феноменологическое рассмотрение может приводить к весьма разнообразным выводам, часто поражающим своей определенностью.

Следует, наверное, подчеркнуть *надежность* феноменологических выводов. Столкновение с их кажущимися нарушениями должно приводить не к сомнениям в основных законах природы, на основе которых выводы получены, а к необходимости строгого анализа выполнения всех условий, которые предполагались выполненными²⁷.

²⁷ Типичным признаком лженаучной деятельности служит громкое объявление об обнаружении явления, опровергающего основные законы природы.

Иногда этот анализ составляет основное содержание работы и приводит к неожиданным и важным открытиям.

Геометрические свойства физических величин, как мы убедились, рассматривая свойства анизотропных проводников, играют важную роль при выводе феноменологических свойств тел. Еще один, последний в этом разделе пример учета геометрических свойств физических величин. Сейчас речь пойдет о магнитном поле. Напряженность магнитного поля \mathbf{H} — псевдовектор, т. е. \mathbf{H} отличается от обычного вектора тем, что при инверсии (замене \mathbf{r} на $-\mathbf{r}$) не меняет знака, хотя при поворотах системы координат \mathbf{H} ведет себя, как обычный вектор. Кроме того, магнитное поле меняет знак при инверсии времени: при $t \rightarrow -t$ магнитное поле $\mathbf{H} \rightarrow -\mathbf{H}$ ²⁸. Геометрическая сущность вектора напряженности магнитного поля имеет следствием большое число различных свойств магнетиков (напряженность магнитного момента \mathbf{M} обладает теми же геометрическими свойствами, что и \mathbf{H}). Так, например, в природе нет и не может быть ферромагнетиков с «односторонними» осями анизотропии (т. е. такими, чтобы магнитным моментам атомов было энергетически выгодно ориентироваться только параллельно оси анизотропии, но не антипараллельно). А это обстоятельство (эквивалентность направлений вдоль оси анизотропии) приводит к возможности разбиения магнетика на домены...

Наверное, приведенных в этом параграфе примеров достаточно для того, чтобы почувствовать уважение к феноменологическому подходу. Надо, правда, иметь в виду старинный житейский принцип: ничто не хорошо слишком. Не надо преуважительно относиться и к феноменологическому подходу, понимая, что истинное объяснение природы явления лежит в построении микроскопической теории.

10. УРОКИ. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Мы возвращаемся к подзаголовку брошюры. Можно ли сформулировать, чему учит (в смысле теории познания) квантовая физика твердого тела? Конечно, прежде всего квантовая физика твердого тела объясняет, а

²⁸ Заметим, что сила Лоренца $\mathbf{F} = (e/c) [\mathbf{v}\mathbf{H}]$ — обычный вектор. То, что \mathbf{H} меняет знак при $t \rightarrow -t$, ясно видно из уравнений Максвелла.

иногда и предсказывает свойства твердых тел. В этом ее главное предназначение. И, являясь частью физики, она питает философию и гносеологию конкретным знанием. Это — общее утверждение, одинаково относящееся к любой естественнонаучной дисциплине.

В данной брошюре центральное место занимает 5-й раздел «Квазичастицы». Мы хотели показать, что при построении микроскопической теории нельзя пользоваться готовыми понятиями, а необходимо создавать новые. Одно из таких понятий — квазичастица. Введение квазичастиц позволяет объяснить многие динамические свойства твердых тел.

И еще. Квантовая физика твердого тела демонстрирует отсутствие панацеи: понятие, удобное в одной области параметров, оказывается бесполезным за пределами этой области.

Много недоуменных высказываний вызывает слово *сводимость*. Часто считают, что сводимость ликвидирует *специфичность* (?). Вся физика макроскопических явлений служит убедительным примером обратного. Сводя макроскопические движения к движению атомных и субатомных частиц, микроскопическая теория макроскопических явлений показывает, что сводимость объясняет специфичность. Мы на этом вопросе почти не останавливались, поэтому разрешим себе еще несколько замечаний. Самым убедительным примером объяснения специфичности может служить вывод закона возрастания энтропии на основании исследования конкретных микроскопических движений. Ведь возрастание энтропии — демонстрация специфичности макроскопических движений, их *необратимости*. В то же время микроскопические движения обратимы. Именно в процессе вывода закона возрастания энтропии объясняется различие в принципах описания макроскопических и микроскопических явлений и убедительно показывается, что вывод специфического закона возрастания энтропии — следствие этих принципов. Более того, вывод позволяет оценить возможность нарушения макроскопических законов (в частности, закона возрастания энтропии). Этот раздел статистической физики, которой подведомствен вывод макроскопических законов на основе микроскопического подхода, выясняет роль флуктуаций — отклонений различных величин от их средних значений. Исследование флуктуаций нужно не только с обосновательной точки

зрения, чтобы показать, что они малы²⁹, но и для того, чтобы объяснить природу наблюдаемых явлений. Например, голубой цвет неба, как оказалось (Дж. У. Рэлей), обязан рассеянию солнечного света на флуктуациях плотности атмосферы.

И последнее. В статье почти нет формул. Появление формул в тексте автор считает своей методической неудачей: не удалось найти адекватные слова, чтобы выразить соответствующую мысль (конечно, запись формулы словами не есть решение вопроса). Но физика, а особенно теоретическая физика — формульная наука. Эксперимент, обнаруживая явления, устанавливает вполне определенные соотношения между измеряемыми величинами, а теория выводит формулы, которые эти соотношения либо предсказывают, либо подтверждают. В этом и заключается объяснение явления. Может быть, вовсе не нужно слов? Многие специальные книги по теоретической физике их действительно почти не содержат. Причем «почти» связано с сокращением изложения: действия, которые можно было бы непосредственно проделать, опускаются и заменяются словами, объясняющими, что и в каком порядке надо проделать.

Мне кажется, слова нужны. У людей есть потребность в понимании общей картины мира. Наука ее создает. Но ее достижения, обогащая технологию и тем внушая уважение людям, как правило, непосредственно не доступны неспециалисту. Необходим «перевод» на общечеловеческий не специализированный, не формульный язык. Более того. Даже специалистам этот «перевод» необходим. Работа не входит в сознание специалистов (даже автора!), если она не может быть рассказана. Это особенно очевидно на специальных конференциях и семинарах. Конечно, тот язык, на котором говорят на конференциях и семинарах, мало доступен неспециалистам (к сожалению, часто он доступен только узкой группе специалистов!). Ссылка на конференции и семинары только подчеркивает потребность в слове.

Наша цивилизация гордится ролью науки и ее достижениями. Осознание уровня развития науки, включе-

²⁹ Хотя и об этом стоит задуматься. Так, относительную флуктуацию числа частиц в выделенном небольшом объеме газа определяет формула $\delta N/N \sim N^{-1/2}$. Если за выделенный объем принять 1 см^3 , а N положить равным 10^{19} , то $\delta N/N \propto (1/3) \cdot 10^{-9}(1)$.

ние в свое сознание хотя бы контуров той бесконечно подробной картины мира, которую наука создает, невозможно без понимания принципов научного объяснения, без попытки посмотреть на науку, сосредоточивая свое внимание не на технологических достижениях, несомненно высоких, а на логике науки и на принципах ее подхода к объяснению явлений природы и свойств материальных тел.

Москва—Дубна
1980—1985 гг.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Приглашение к разговору (3).
2. Известны ли нам законы природы? (5).
3. Часть и целое (14).
4. Индивидуум и коллектив (19).
5. Квазичастицы (29).
6. Модель или реальность? (38).
7. Твердо ли твердое тело? (41).
8. Микро... и макро... (48).
9. Феноменология и микроскопика (55).
10. Уроки. Заключительные замечания (61).

Моисей Исаакович Каганов

МИКРО... И МАКРО...

**(МЕТОДОЛОГИЯ КОНКРЕТНОГО ЗНАНИЯ,
ЧЕМУ УЧИТ КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ
КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ)**

Гл. отраслевой редактор *Л. А. Ерлыкин*

Редактор *К. А. Кутузова*

Мл. редактор *Н. А. Сергеева*

Обложка художника *Г. Ш. Басырова*

Худож. редактор *М. А. Гусева*

Техн. редактор *Л. А. Солнцева*

Корректор *Н. Д. Мелешкина*

ИБ № 8094

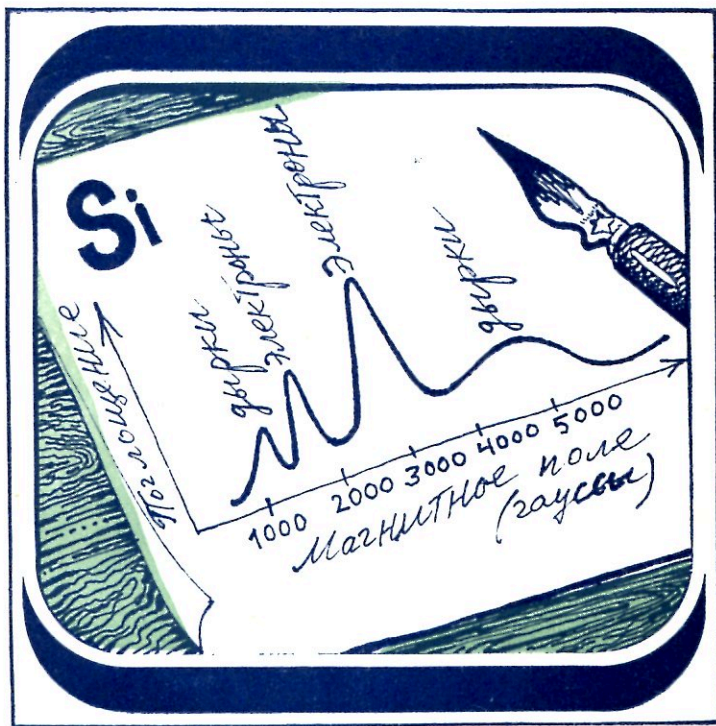
Сдано в набор 26.10.85. Подписано к печати 08.01.86. Т 03820. Формат бумаги 84×108¹/₁₆. Бумага тип. № 3. Гарнитура литературная. Печать высшая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,57. Уч.-изд. л. 3,50. Тираж 33 990 экз. Заказ 2338. Цена 11 коп. Издательство «Знание», 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 864002.
Типография Всесоюзного общества «Знание», Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

ДОРОГОЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Брошюры этой серии в розничную продажу не поступают, поэтому своевременно оформляйте подписку. Подписка на брошюры издательства „Знание“ ежеквартальная, принимается в любом отделении „Союзпечати“.

Напоминаем Вам, что сведения о подписке Вы можете найти в „Каталоге советских газет и журналов“ в разделе „Центральные журналы“, рубрика „Брошюры издательства „Знание““.

Цена подписки на год 1 р. 32 к.



СЕРИЯ

ФИЗИКА