

## ТВЕРДОЕ ТЕЛО \*)

Дж. Займан

Два прошедших десятилетия можно с полным правом назвать эрой физики твердого тела. Конечно, физика твердого тела непрерывно росла по абсолютному значению, ничем не отличаясь в этом смысле от других наук и остальной физики; вместе с тем этот раздел существенно потеснил другие разделы физики по относительному значению. Я думаю, что сейчас на долю физики твердого тела приходится около 40% всей физики. А ведь в конце второй мировой войны речь шла всего-навсего о 15%. Наряду с выдающимися американскими и английскими деятелями науки, стоящими во главе Национальной Академии наук и Кавендишской лаборатории, даже ученики Резерфорда были вынуждены признать, что физика твердого тела существует!

И прошу извинить мою нескромную попытку подвести итоги столь обширному полю человеческой деятельности. История идей чрезвычайно сложна и почти всегда ошибочна. «Никаких имен, никакой пересортировки багажа» — это все-таки здоровый принцип, который вполне подходит к разделу науки, в котором до сих пор еще не доминирует система «звезд». Физика твердого тела слишком разбросана по объектам исследования, используемой технике и разнообразным научным подходам, чтобы она могла возглавляться немногими, пусть громкими именами или тайть в себе соблазн получения многочисленных Нобелевских премий. С вашего разрешения я буду писать об устремлениях и моде, попытках и достижениях, пусть даже все это можно обнаружить лишь в умах сотен тысяч научных работников и словах и математических символах сотен тысяч научных статей.

## НАСЛЕДСТВО В ЗОЛОТЕ

Как это ни удивительно, наша эра вовсе не была периодом бурной революции идей. Большинство основных идей современной теории твердого тела было уже выдвинуто к 1945 г. Основы динамики решетки (т. е. представление о фононах), зонная структура, динамика электронов в кристаллах (например, дырок в заполненных валентных зонах) и спиновых волн — все это было известно уже в 30-х годах и возникло сразу же за созданием квантовой механики. Уже стало привычным использовать всюду, где это возможно, теорию групп; эффекты, связанные с наличием многих частиц и кулоновским взаимодействием между ними также были уже осознаны; была уже построена модель Изинга для явлений типа порядок — беспорядок; уже был произведен анализ совершенства кристаллов путем рассмотрения относительно хорошо определенных и устойчивых образований, которые были названы дислокациями; эти вопросы были достаточно ясны тем, кто работал в этой области.

Создало ли наше поколение какие-то новые представления, равные по своей силе только что перечисленным? Мне известны только две по-настоящему крупные и революционные идеи, которые были выдвинуты и сформировались в наше время. Первая из них — это идея квазичастиц. «Настоящие» частицы, входящие в состав любого твердого тела, — атомные ядра и электроны — всегда взаимодействуют между собой настолько

\*) John M. Ziman, Solid State, Phys. Today 21 (5), 53 (1968). Перевод В. А. Угарова.

сильно, что можно думать, что каждая из них утрачивает свою индивидуальность в общей массе. Иногда дело обстоит именно так, например при колебаниях решетки или в плазме; однако твердые тела зачастую ведут себя так, как если бы они состояли из совокупности почти независимых образований, динамические и электрические свойства которых близки к динамическим и электрическим свойствам обычных частиц. Примерно так представляли себе ситуацию первые исследователи, когда они весьма успешно считали, что металлы заполнены свободными электронами. Теория многих тел, опирающаяся в значительной мере на методы квантовой теории поля, показала, как можно строго ввести, оправдать и сделать количественным инструментом эту плодотворную выдумку, совершенно не соответствующую реальной картине.

Введение *псевдопотенциала* имеет не столь глубокий смысл, однако оно оказалось чрезвычайно полезным. Задача состояла в том, чтобы отделить электроны от электрического поля решетки: достоинства метода обуславливают и его недостатки. Когда было обнаружено, что алгебра, используемая при подсчете электронной зонной структуры, может быть несколько видоизменена, так что получаемые результаты не слишком сильно зависят от точного расположения ионов в решетке, мы получили в свое распоряжение новый набор «инструментов» для подсчета электрических и динамических свойств металлов и полупроводников. Эти расчеты могут быть проделаны сравнительно просто. Представление о псевдопотенциале едва ли может быть оправдано строгим математическим анализом, но это обстоятельство вовсе не говорит за то, что следует отказаться от понятия, позволяющего получать столь хорошие результаты.

Разумеется, происходит непрерывное техническое усовершенствование старых идей. Математические понятия, скрытые в малопонятных теоретических статьях, превращаются в физическую реальность, повседневно обсуждаемую в физических лабораториях; мы жонглируем *фононами* и *носителями*, *магнонами* и *экситонами*, *дислокациями*, *ступеньками* и *дефектами упаковки* и сумели создать технику, позволяющую изолировать, выделить и визуально наблюдать эти объекты. Не исключено, что у нас уже сформировались еще и другие теоретические представления, которые также войдут в состав нашей физической «интуиции». Трудно предвидеть, уйдут ли такие простые идеи, как квантование потока для сверхтекучих жидкостей, или такие интеллектуальные создания, как *идея нарушения симметрии*, от своей колыбели в широкое обращение. Мы вовсе не уверены в том, что тяжелой артиллерии, появившейся в виде *функций Грина* и *диаграммной техники*, которые смогли дать аналитическое оправдание многим наивным точкам зрения, суждено заменить нашего испытанного друга — уравнение Шрёдингера и стать естественным языком исследования природы. Такие тенденции возникают зачастую сами собой. Цитируем Марселя Пруста: «Квартеты Бетховена сами... четверть века создавали, воспеывали и численно увеличивали аудиторию для квартетов Бетховена, подчеркивая тем самым, как и все великие произведения искусства, преимущества если не артистического духа, то по крайней мере интеллигентного общества, в котором сегодня преобладает то самое, чего не хватало тогда, когда эти сочинения впервые исполнялись; речь идет о людях, способных получать наслаждение от этой музыки».

Наша эра наглядно продемонстрировала, что в пределах теории твердого тела имеется *необъятное поле действия для всех тех*, кто испытывает наслаждение в построении филигранного, но трудоемкого формализма; некоторые из тех, кто сегодня веселится за праздничным столом, далеко не всегда оплачивают своим хозяевам достойным вкладом в реаль-

ную науку. У меня сложилось впечатление, что вплоть до последнего времени теоретики, работающие в области твердого тела, были настолько редкими птицами, что их приходилось силой вынуждать к общению с экспериментаторами. Когда эти птицы собираются в большие стаи, они начинают писать свои работы исключительно друг для друга и, таким образом, становятся столь же чуждыми предмету своей науки, как представители чистой математики или вавилонская клинопись.

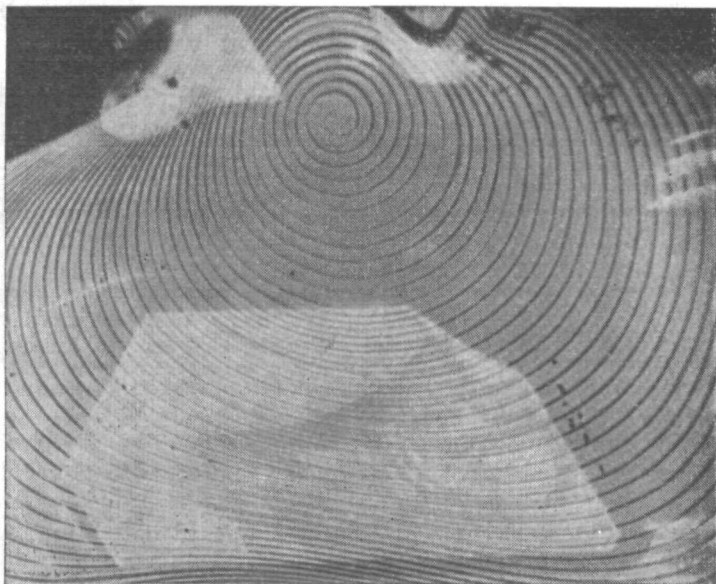


Рис. 1. Винтовая дислокация и растущая спираль в прозрачном карбиде кремния (карборунде).

По мере роста кристалла атомы образуют спираль с постоянным вертикальным шагом, равным слою из шести молекул.

С другой стороны, часто вычислительные операции, сколь бы быстро они ни производились, все равно не могут решить многие проблемы. Изюминка предмета — это удачная аппроксимация. Можно пересчитать по пальцам те удивительные случаи, когда мы знаем в подробностях геометрические характеристики сил, полей и волновых функций, причем настолько точно, чтобы утомительный расчет отплатил нам надежными числовыми значениями. Но, как говорится, что можно ждать от топора, как не топорную работу.

#### НЕ ГРЕЦИЯ, А РИМ

Хотя эта эпоха и не была революцией в идеях, она была, несомненно, периодом необыкновенного технического прогресса. Достигли совершенства очень многие, совершенно новые методы эксперимента и наблюдения, предложенные после войны. Все это необозримо увеличило наши знания о твердом теле.

Так, например, производство жидкого гелия в заметных количествах преобразовало физику низких температур из весьма специальной техники, используемой в немногочисленных лабораториях с целью изучения «свойств вещества» в экстремальных условиях, в обычное лабораторное

оборудование, применяемое для изучения явлений в наиболее простых физических условиях, когда тепловые колебания приглушены.

Аналогично этому освобождение от внешних влияний было достигнуто применением *чистых* и *совершенных* кристаллов. Новая техника, используемая для выращивания кристаллов, в частности зонная очистка и вытягивание из расплава, первоначально предназначалась для германиевых и кремниевых полупроводниковых деталей; тем не менее эта техника внесла глубокие изменения в подход физиков, работающих в области твердого тела, к объектам своих исследований. Дело заключается в том, что физики получили возможность наблюдать явления, которые в других условиях были бы полностью смазаны рассеянием фононов и электронов на статических примесях и дефектах.

Как и во всех других отраслях науки, *электронная микроскопия* революционизировала изучение дефектов в кристаллах. Вплоть до середины 50-х годов дислокации были почти ненаблюдаемыми гипотетическими образованиями, выдуманными в креслах теоретиков для объяснения очень сложного явления пластичности; когда удалось увидеть их возникновение, перемещение, расталкивание, нагромождение и т. д., это преобразовало данную эмпирическую ветвь физической металлургии в науку, опирающуюся на основные принципы.

Развитие микроволновых радаров во время мировой войны также имело чрезвычайные последствия для физики твердого тела. Сильное магнитное поле в резонансной полости является идеальным средством для возбуждения спинового и орбитального движения электронов и ядер в твердых телах, со всеми измеримыми следствиями такой сложности, что для их объяснения требуются целые тома. Сначала эта техника применялась главным образом к относительно изолированным ядрам или атомам в кристаллах, разведенных большим количеством кристаллизационной воды, но теперь мы уже научились наблюдать резонанс элементарных возбуждений типа квазичастиц в твердых телах — электронов, «дырок» и магнонов.

Наконец, я должен упомянуть неупругую *дифракцию нейтронов* как технику, которая медленно, но верно перекладывает по-новому наши сведения о динамике атомов в твердых телах. Обладая значительным потоком тепловых нейтронов, прецизионной аппаратурой и достаточным временем экспозиции, можно постепенно распутать спектр решетки, моду за модой, и заглянуть также в очень сложную магнитную структуру твердого тела и спиновые волны. То, что было мечтой пятьдесят лет назад — пайти силы взаимодействия между атомами, анализируя колебания решетки, — сейчас уже можно реализовать практически.

Усовершенствование обычной лабораторной техники также открыло новые горизонты. Упомянем для примера точность и чувствительность, достижимые сейчас в инфракрасной спектроскопии, калориметрии или дифракции рентгеновских лучей. Эти методы вместе с тем превратили ортодоксальную физику твердого тела в чрезвычайно дорогое предприятие. За исключением нейтронной дифракции, мы еще не стали Большой наукой со шкалой гигаВольт — мегатонна — гигадоллар, однако требуется божественное озарение, чтобы получить результат, который можно было бы опубликовать, с аппаратурой, стоимость которой была бы меньше 10 тыс. долларов. К сожалению, два недавно обнаруженных явления, достижимых сравнительно дешево, — аннигиляция позитронов и эффект Мёсбауэра, — как это выяснилось, трудно использовать для количественного изучения самих твердых тел. Однако область явлений, которую нужно исследовать и понять, безгранична: заморозьте воду в стакане; можете ли вы понять все то, что происходит перед вашими глазами?

## ЭВЕРЕСТ ВЗЯТ

Чему же мы научились со всей нашей новой экспериментальной и теоретической техникой? Наиболее важное достижение эпохи — это, бесспорно, объяснение явления *сверхпроводимости*. Около пятидесяти лет велись интенсивные исследования этого загадочного состояния вещества. К концу 30-х годов очень многие макроскопические свойства сверхпроводников, такие, например, как вытеснение магнитного потока, зависимость критической температуры от приложенного магнитного поля, природа промежуточного состояния, были уже хорошо известны. Сразу после войны достижения криогенной техники и микроволновой спектроскопии помогли выявить дополнительные тонкие свойства, однако ничего не дали для развития теории явления. Важнейшим шагом было признание электрон-фононного взаимодействия в качестве фундаментального

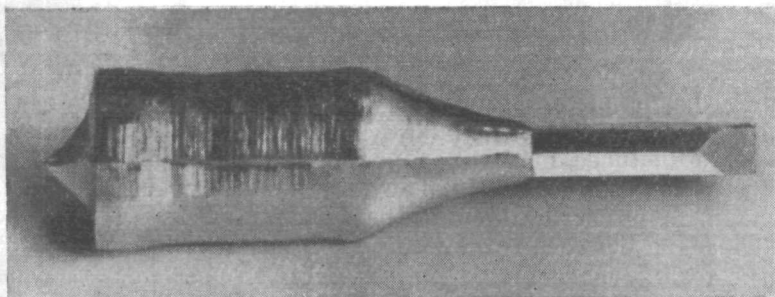


Рис. 2. Германиевый двойниковый слиток, на котором виден край плоскости (221).

механизма, ответственного за явление. Но последнюю тысячу метров пришлось преодолевать в кислородных масках: только методы полевой теории облегчили построение новых квантовых состояний системы, состоящей из многих частиц — взаимодействующих электронов и фононов. Удалось доказать, что эти состояния соответствуют устойчивому конденсированному состоянию вещества (сверхтекучему), причем возбуждение квазичастиц требует конечной энергии относительно энергии этого состояния.

Вслед за успехом этой блестящей теории сверхпроводимость за последнее десятилетие стала любимым детищем физики твердого тела. Было открыто много новых явлений; среди них квантование магнитного потока, когерентное туннелирование, сверхпроводники II рода. Вся периодическая система элементов была перерыта в поисках новых сверхпроводников. Теория сверхпроводимости была развита до такой степени, что мне кажется иногда, что мы знаем куда больше о сверхпроводящем состоянии многих материалов, чем о свойствах этих же материалов в так называемом «нормальном» состоянии. По вполне разумному соглашению *сверхтекучесть в жидком гелии* при очень низких температурах рассматривается как раздел физики твердого тела, и это явление получило качественное объяснение, хотя количественные расчеты экспериментально определяемых параметров в таких системах ни в коей мере не являются простыми.

Совершенно неожиданным оказалось открытие сверхпроводящих материалов, сохраняющих нулевое электрическое сопротивление в магнитных полях порядка  $100 \text{ кэ}$  или даже выше. Использование этих материалов в сверхмощных магнитах, пузырьковых камерах, термоядерных устройствах и других дорогостоящих сооружениях еще только начи-

нается. Все те, кто сохранил веру в могущество и потенциальную возможность использования результатов любой науки, сколь бы «чистой» она ни казалась, были чрезвычайно ободрены этим успехом. Началась охота за материалами, которые остаются сверхпроводящими, например, и при комнатных температурах. Мне хочется пожелать охотникам счастливой охоты, если только они не будут преждевременно кричать «ату»! Как-никак дикие гуси в этой округе все-таки заколдованы.

#### НА ПУТЯХ «УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЫШЕЛОВКИ» \*)

Сверхпроводимость была загадочным явлением, наблюдать которое можно было лишь в особых экстремальных условиях; свойства *полупроводников* в принципе были вполне понятны, о полупроводниках было известно много, и в результате... они были изучены в значительно меньшей степени! Так продолжалось до знаменитых работ, отмеченных Нобелевской премией и осветивших роль неосновных носителей тока, свойства  $p-n$ -переходов, транзисторное действие и другие интересные эффекты (до этого времени полупроводникам уделялось значительно меньше внимания, чем они того заслуживали). Этот героический эпизод произошел в самом начале нашей эпохи и послужил одной из главных причин фантастического развития нашей дисциплины — развития, выражаемого прежде всего в ассигнуемых средствах и числе используемых людей.

Где-где, а в этом журнале нет нужды много говорить об удивительной виртуозности деятелей нового вида экспериментального искусства — электроники твердого тела; они могут «ужать» счетную машину размером с верблюда до такой степени, чтобы она прошла через игольное ушко; крошечным кристаллом полупроводника, феррита, ферроэлектрика или сверхпроводника они способны измерять, порождать и регулировать: тепло, свет, звук и электричество; их приборы абсолютно надежны, чрезвычайно удобны в употреблении и могут усовершенствоваться до бесконечности. Поистине это эра физики твердого тела, и никто не знает, когда ей настанет конец.

Вместе с тем успехи практических приложений или наряду с изучением фундаментальных физических явлений, важных для этих приложений. Чтобы создать идеальную среду, в которой носители, фононы, магноны, фотоны и все другие образования взаимодействовали желаемым для нас образом, необходимо знать многие детали электронной зонной структуры, спектра решетки, подвижности, плотности дислокаций, уровней примесей, центров ловушек и т. п. для интересующих нас материалов. Нет никаких сомнений в том, что постоянные усилия, направленные, на получение сведений, необходимых для практических приложений, приведут к открытию многих новых физических явлений, позволят прояснить многие смутные идеи, вызовут развитие новой экспериментальной техники и создадут стандарты научной точности, которых вплоть до последнего времени так недостает в этой области. Даже в том случае, если большинство явлений, используемых в полупроводниковых устройствах, имеет искусственное объяснение и не может дать что-либо существенное для микротeorии твердого тела, тот факт, что качество дорогостоящей продукции может зависеть от точного измерения основных параметров, дает нам надежду, что эти измерения будут производиться с достаточной тщательностью. Можно только радоваться, когда видишь, что чисто академическая деятельность может быть столь тесно связана с миром реальных вещей, с вещами, которые приносят нам непосредственную пользу.

\*) Ссылка на известную английскую поговорку: «Тот, кому удастся усовершенствовать мышеловку, будет призван в Вашингтон». (Прим. перев.)

## ЧЕРТИМ КАРТЫ

Низкотемпературная микроволновая спектроскопия, идеальные кристаллы и псевдопотенциалы оказались подручными средствами для достижения еще одного выдающегося результата — исследования ферми-поверхности металлов. Как я уже подчеркивал, идея представления свойств электронов в металле, опираясь на форму поверхности постоянной энергии, охватывающей заполненные состояния в пространстве импульсов, тоже восходит к началу 30-х годов. Однако все попытки рассчитать такие поверхности, исходя из основных физических принципов, наталкивались на удручающие неудачи. Неприятность заключалась в том, что такие расчеты нельзя было скорректировать обратным ходом, чтобы исправить ошибки и неправильные приближения; причина напей беспомощности скрывалась в том, что все величины, получаемые из расчета и допускающие сравнение с опытом, имели чисто скалярный или векторный характер, как это имеет место, например, для электрической проводимости или постоянной Холла. Я могу припомнить всего лишь одну серию довоенных экспериментов — измерение магнетосопротивления у некоторых монокристаллов металлического типа при гелиевых температурах, которая содержала небольшую дозу информации, непосредственно касающейся поверхности Ферми.

Но в конце 50-х годов неожиданно обнаружилось, что большое число различных явлений зависит очень чувствительным образом от многих геометрических параметров поверхности Ферми. Это означало, что эти явления могут быть использованы в качестве новой техники для построений этой поверхности. Так, например, оказалось, что аномальный скин-эффект «измеряет» среднюю кривизну, эффект де Гааза — ван Альфена — площадь поперечного сечения, магнетоакустический эффект, внешний диаметр и др. этого чисто гипотетического математического построения. Стало возможным после серии точных экспериментов построить полную диаграмму, определяющую характер всех остальных электрических свойств металла.

Построенная впервые во всех деталях поверхность Ферми оказалась весьма непохожей на то, чего мы ожидали; это заставило самых видных теоретиков крепко призадуматься над тем, что бы это означало. Им пришлось вспомнить некоторые свойства электронных состояний в кристалле, которые, как считалось, были абсолютно всем известны, но тем не менее почти полностью оказались забытыми. Представление о многосвязной поверхности Ферми было отнюдь не новым, но наше воображение оказалось не в состоянии оценить все возможности такого построения.

Данные стали поступать нарастающим потоком и заполнили бы все входные каналы, если бы не появилось представление о псевдопотенциале и не выяснилось бы в конце концов, что у большинства металлов поверхность Ферми не слишком отличается от поверхности Ферми свободного электронного газа. В наши дни картирование поверхности Ферми — более или менее обычная операция, а подходящие для этой цели кандидаты из числа металлов попадают все реже и реже; и это очень жаль, потому что непрерывно совершенствуется техника, с помощью которой вся процедура в целом может проводиться значительно более эффективно, чем раньше. Тем не менее почти вся эта техника позволяет построить поверхность Ферми только для чистых, идеальных кристаллов при низких температурах. Здесь есть неограниченное поле деятельности для дальнейшего углубления исследований электронной зонной структуры в сплавах, аморфных твердых телах и т. д., если применять оптические методы, рентгеновские лучи и фотоэмиссионные приспособления.

За это время мы, возможно, поняли простую истину: нужно быть очень осторожными и не очень надеяться на удачный исход «шаловливых» вычислений, не имеющих под собой надежной экспериментальной информации. В этой области физики твердого тела мы с достаточным основанием можем думать, что «в принципе» понимаем все наблюдаемые явления. И все же необходимы еще очень существенные шаги в технике, прежде чем можно будет положиться на количественные теоретические предсказания.

### МАССИРОВАННЫЙ УДАР

Исследование *кристаллических дефектов* находится все еще в значительно более примитивной стадии развития. Введение представления о дислокациях позволило объяснить невысокую прочность реальных кристаллов, а в самом начале тех двух десятилетий, которые мы сегодня отмечаем, было показано, что дислокации дают нам ключ для объяснения роста кристаллов. Но, не имея способа наблюдать дислокации в действии, мы можем лишь гадать о тех событиях, которые разыгрываются внутри кристалла, когда материал пластически деформируется, подвергается волочению, расплющивается на наковальне или, наконец, испытывает крип. Как возникают и размножаются дислокации? Как быстро они могут перемещаться? Как они взаимодействуют друг с другом, с примесями, с вакансиями, с атомами внедрения, с границами зерен и другими типами дефектов в кристаллах? Было предложено несколько великолепных гипотез, а также несколько сверхнадежных интерпретаций, опирающихся на чисто воображаемые конфигурации и взаимодействия.

Прямые наблюдения дислокаций с помощью электронного микроскопа и другими способами положили конец этой спекулятивной фазе развития. С другой стороны, эти наблюдения обнаружили чрезвычайную сложность явлений в действительности. Попытка объяснения кривой напряжение — деформация на основе теоретических расчетов могла бы вызвать только улыбку; даже попытка простейшего *описания* всех загадочных образований, наблюдаемых в электронном микроскопе, в тонкой плеске нержавеющей стали, лежит за пределами наших аналитических возможностей. В этой области, равно как и в близкой к ней области *радиационных нарушений*, можно ждать медленного прогресса, без отдельных эффективных открытий (хотя я не могу не отметить прелесть сфокусированных столкновений), но с терпеливым накоплением добротной информации, опирающейся на точные данные.

К счастью, за этими исследованиями стоят необъятные экономические запросы: один бог знает, сколько миллионов долларов не жалко заплатить, чтобы узнать, что на самом деле происходит с графитом в ядерном реакторе, или выяснить, почему столь катастрофически быстро проявляется усталость металла в чудовищно дорогом самолете. Мы можем даже оказаться у порога новой технологической революции. Ближайшие два десятилетия могут стать эпохой «науки о материалах», когда создание материалов — из волокон, сплавов, керамики — с требуемыми свойствами преобразует инженерную практику так, как физика твердого тела преобразовала неузнаваемым образом практику инженеров-электриков и специалистов по электронике.

### РАБОТА ВО ВСЕ НЕ ОКОЩЕНА

Я остановился только на немногих основных достижениях физики твердого тела. Я мог бы упомянуть еще многие вопросы: *магнетизм*, свойства *ионных кристаллов*, изучение *поверхностей* и *тонких пленок*,



предсказание и обнаружение *плазменных колебаний*, теорию *явлений порядок — беспорядок* и многие другие, получившие более чем выдающееся развитие за последние двадцать лет. Однако благодущие — наш типичный порок; поэтому позвольте мне лучше указать ряд проблем, которые не поддались нашему нажиму.

Например, основы теории *ферромагнетизма* в металлах не очень-то продвинулись вперед с военного времени. Я, конечно, хорошо знаю, что в этом направлении была проделана громадная работа, было выдвинуто много новых гипотез и предложен ряд новых формальных приемов. Однако до сих пор не найдена процедура для описания *d*-электронов в железе как для свободных, распределенных по зонной структуре, так и для локализованных с сильно взаимодействующими спинами.

Опять-таки попытки подсчета *энергии связи* для металлов едва ли вышли за первый столбец периодической системы. Дело вовсе не в том, чтобы выбрать правильную схему для энергии обмена и корреляции в свободном электронном газе; химия самих ионов играет в этом вопросе такую роль, о которой мы, быть может, и не подозреваем. Что касается термодинамических свойств *различных фаз сплавов*, то они находятся за пределами возможностей современной теории. Вот уже несколько тысячелетий люди смешивают медь и олово, получая бронзу. Но почему, почему это так здорово удается?

Плавление и обычное *жидкое состояние* — к этим вопросам мы не можем подойти сколько-нибудь количественно. У нас нет адекватного языка для описания «структуры» аморфных материалов, таких, как стекло или керамика; мы бойко щебечем о «локальном порядке» или же строим иерархию корреляционных функций для *N* частиц и надеемся на что-то лучшее. Даже те, кто занимается чистой математикой, могут найти «статистическую геометрию» довольно смешной.

Но даже более простые свойства почти идеальных кристаллов никогда не были рассчитаны из основных принципов: теплопроводность поваренной соли, электропроводность и термо-э.д.с. меди, температура сверхпроводящего перехода свинца, точка плавления ртути, коэффициент диффузии вакансий в натрии. В книгах, опубликованных до второй мировой войны, можно найти рецензы, по которым можно подсчитать большинство этих величин, но мы все еще не дождалась повара, который смог бы с толком использовать все нужные продукты. Но, может быть, интереснее двигаться и надеяться на что-то, чем оказаться на конечной станции, дальше которой уже некуда ехать!

Бристольский университет,  
Великобритания

---