

в своем незаконченном виде — может принести некоторую пользу тем, кто интересуется свойствами твердых тел.

Я начал исследование кристаллов в 1903 г., вначале вместе с В. Рентгеном, а затем с М. В. Кирпичевой. Оба они скончались в 1923 г. С тех пор моей сотрудницей в деле исследования упругих свойств была М. А. Левитская, а в изучении электрических свойств — К. Д. Синельников. Ряд существенных электрических исследований был выполнен П. И. Лукирским, А. Ф. Вальтером, А. К. Вальтером, И. В. Курчатовым, П. П. Кобеко, Д. А. Рожанским, А. Н. Арсеньевой, Н. С. Усатой, Б. М. Гохбергом, Е. В. Пехновицером, С. А. Щукаревым, О. Н. Трапезниковой, С. М. Вендровичем, В. Н. Кондратьевым и А. И. Рабиновичем. Исследованиями упругих свойств занимались П. С. Эренфест, М. В. Классен, Б. Я. Пинес, И. В. Обреимов и Л. В. Шубников. Ряд теоретических вопросов был исследован Я. И. Френкелем, Г. А. Гринбергом и В. Р. Буркианом.

Сообщаемые здесь результаты — результат сотрудничества нас всех, и вряд ли возможно указать точно границы труда каждого в отдельности. Этот материал уже частично был опубликован. В конце отдельных глав дан список как наших опубликованных работ по этому вопросу, так и трудов, упомянутых в настоящих лекциях и связанных с рассматриваемыми вопросами.

ТВЕРДОЕ ТЕЛО КАК ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА *

Представление о внутреннем строении окружающих нас тел испытало резкие изменения. Уже первые наблюдения над способностью тел сокращаться при сжатии и

* Статья написана на основе речи, произнесенной на торжественном годовом собрании Академии наук СССР 2 февраля 1931 г. и опубликована в кн. Отчет о деятельности Академии наук СССР за 1930 г. Л., 1931, с. 1—15.

Данная статья в наибольшей степени, чем другие, включенные в сборник, нуждается в корректирующих примечаниях. Однако неточности, обусловленные уровнем имевшихся ко времени ее написания знаний (не был открыт нейтрон и поэтому не было нейтрон-протонной модели строения ядра и т. д.), легко могут быть установлены читателем. Поэтому было решено не отягощать статью соответствующими построчными примечаниями.

расширяться при нагревании заставили подозревать, что при всей видимой сплошности и взаимной непроницаемости тела построены из мельчайших неделимых частиц — атомов, сближение или удаление которых друг от друга и вызывает видимое изменение размеров тела. Естественно, что атомная картина получила развитие прежде всего в применении к газам, которые особенно легко и сильно меняют свой объем. Кинетическая теория газов в точной количественной форме была уже развита в XVIII в. Бернулли и Ломоносовым. С тех пор газы всегда служили областью наиболее успешного применения атомных представлений. На газах эти представления оформились в теорию, которая постепенно стремилась охватить и жидкое и твердое состояния.

Наоборот, представление о сплошном заполнении пространства лучше всего применимо к наиболее плотному твердому состоянию. И действительно, на протяжении всего XIX в. все теории, стремившиеся объяснить свойства твердых тел, исходили из картины сплошности. Таковы теория упругости, теория оптических и электрических явлений. Для общности, зная, что твердое тело может переходить в газ и получаться конденсацией газа, они не отрицали присутствия атомов и в твердых телах, однако там они остались бесполезной гипотезой еще 150 лет после создания кинетической теории газов. Дюбуа-Реймон, близорукий философ-натуралист XIX в., объявил решение вопроса о сплошности или атомности навсегда недоступным человеческому уму. Энергетическая школа Оствальда считала возможным устранить самый вопрос об атоме, пользуясь одними формальными закономерностями. Непонимание значения атомных представлений, доведшее до самоубийства гениального творца атомной статистической физики Больцмана, в значительной степени обязано тому, что свойства газов перестали привлекать интерес ученых, увлеченных новыми перспективами термодинамики и электродинамики.

1906 г. — год смерти Больцмана — был началом победы его идей, победы, еще недавно казавшейся окончательной. В самом деле, теория броунова молекулярного теплового движения, созданная Эйнштейном, в опытах Перрена непосредственно свидетельствовала о тепловом движении атомов и определяла их размеры. Вильсон наглядно обнаружил путь отдельного атома гелия, пропуская альфа-лучи радиоактивных тел через пересыщенный водяной

пар, а Рамзай показал, что, собрав эти альфа-лучи, мы получаем известный газ гелий. Камерлинг-Оннес перевел гелий в жидкое состояние, а Кеезом — в твердое. Этот твердый гелий состоит из тех частичек, каждую из которых мы в отдельности могли обнаружить в опыте Вильсона или же видеть вспышку экрана от удара каждой отдельной частицы.

Победа атомных представлений перешла даже за пределы материи, для которой эти представления были созданы. Квантовая теория Планка и атомы света Эйнштейна перенесли атомные представления в волновую теорию света, в свойства эфира и энергии. Не осталось области физики, где бы не было атомов или квантов. Классическое изречение теории сплошности: «Природа не знает скачков» заменено его антитезой: «Все в природе прерывно».

В резком противоречии с этим переворотом в представлениях оставались прежние логические и математические методы, целиком приспособленные к идее сплошности. Это несоответствие надолго задержало развитие квантовых представлений.

Но если атомы победили, то эта победа стоила им их главного признака — цельности, неделимости. Победив, атом рассыпался на более мелкие единицы: положительное ядро и отрицательные электроны. Атом — это целая система, микрокосмос, в котором десятки электронов вращаются вокруг центрального ядра, подобно тому как планеты вращаются вокруг Солнца. Применяв к движению электронов в атоме квантовые законы, Бор создал модель атома, которая в течение 10 лет служила путеводной нитью для всей физики. Вскоре и компактное ядро — это солнце атома — рассыпалось на свои элементы: положительные протоны и те же отрицательные электроны. Все разнообразие тел живой природы и еще большее разнообразие объектов лаборатории и техники свелось к этим двум основным элементам, к двум электрическим зарядам. Таким образом, природа оказалась насквозь электрифицированной. В природе нет ничего, кроме электричества протонов и электронов. Все явления природы — проявление свойств этих электрических зарядов.

Что же такое протон и электрон? Подобно тому как раньше представляли себе атом в виде упругого сплошного шарика размером в стомиллионную долю сантиметра, так теперь электрон считают шариком, еще в десять тысяч раз меньшим, а протон — даже в десять миллионов

раз меньшим, чем прежний атом. Эта картина была крайним пределом атомных идей. Атомная картина представляет самое плотное тело как совокупность частиц, отделенных друг от друга пустотой. Если бы мы захотели представить атом Бора, то надо было бы вообразить пустоту, в которой движутся пылинки, отдаленные друг от друга на расстояния, в десятки тысяч раз превышающие их собственные размеры. Это картина, к которой мы привыкли в звездном мире. Твердое тело не больше заполнено веществом, чем мир — звездами. Если изобразить атом в масштабе большого зала, то все содержание его представит в виде нескольких пылинок размером в десятую долю миллиметра; все остальное — пустота. Некоторые авторы пытались лишить эти пылинки даже их скромных размеров, вводя понятие о точечном электроны как центре сил, не имеющем протяжения. Если вспомнить, что и электромагнитное излучение, распространяющееся в теле, было разбито на отдельно локализованные небольшие кванты, то мы поистине приходим к картине твердого тела как пустыни, в которой блуждают одинокие заряды и кванты. В первом приближении тело — это пустота; при ближайшем рассмотрении там можно заметить и саму материю — электрические заряды.

Волновая механика с новой стороны подошла к, казалось, уже решенному спору между сплошностью и прерывностью. Оказалось, что движение всякого тела, и электрона в частности, представляет собою волновое явление, охватывающее все безграничное пространство. Каждый электрон как бы заполняет собою все пространство. Правда, главная часть его сосредоточена вблизи его центра и быстро ослабевает по всем направлениям, так что уже на сравнительно небольших расстояниях электрон едва проявляется, но все же нигде нельзя указать границы, где бы электрон прекращался полностью. Электрон, который раньше был резко очерченным шариком, теперь расплылся, быстро убывает, но нигде не кончается. Отдельные электроны проникают друг в друга. Таким образом, пустого пространства, собственно говоря, нигде нет. Материя, исходя из многочисленных центров — протонов и электронов, расплывается, заполняя все пространство. Эта картина получила и иное, более соответствующее квантовым воззрениям толкование. Расплывается не самый электрон, а его локализация. Обнаружить его положение в некоторый математический момент времени мы

не можем. Наши сведения о положении электрона, основанные на его взаимодействии с другими электронами, носят статистический характер. Мы можем сказать, что он чаще всего бывает вблизи центра и все реже и реже встречается по мере удаления от него. Расплывчатая картина электрона, быть может, — только картина вероятности его нахождения в разных точках. Но все законы новой квантовой механики построены так, что только это статистически среднее распределение мы и можем обнаружить. Потому ли, что самый электрон размыт, или потому, что нашему наблюдению доступно только это среднее размытое распределение электрона в разных местах пространства, это на данной стадии наших знаний не так уж важно. Большого об электроне мы пока все равно не знаем.

Новая сплошная картина материи не есть отрицание предыдущей атомной, она есть ее дальнейшее развитие и в то же время синтез с теорией сплошности. И в новой картине сохраняются атомы и молекулы, электроны и протоны, их число и заряды. Даже прежние их размеры не потеряли своего смысла, получив статистическое толкование. Сохранились и важнейшие черты новой физики: полная электрификация вещества, изучение недоступных нашим органам чувств элементарных процессов как основы непосредственно наблюдаемых их проявлений. Интересно, что только в этот период синтеза начали строиться новые формы мышления и применяться те математические методы, которые вытекают из идеи прерывности. И сейчас еще наибольшей трудностью оказывается влить новое вино в новые меха. Старые еще так привычны, что только немногие физики говорят и мыслят на языке новых квантовых представлений. Большинство новые понятия пытается выражать при помощи старых представлений и принуждено постоянно пользоваться словарем для перевода с нового языка на старый. Раньше мы говорили о вращении маленьких шаровидных электронов вокруг ядра по определенным орбитам, теперь — о стоячих волнах, о колебаниях размытых распределений электронов. Несмотря на видимое различие этих понятий, между ними существует некоторое соответствие, позволяющее часто пользоваться одним языком вместо другого. Но старым языком можно пользоваться только до тех пор, пока он утверждает то же, что и новый. Там, где они в своих утверждениях расходятся, истина оказывается на стороне

новой квантовой механики. Чем скорее мы ее освоим, тем лучше.

Мы рассмотрели отдельные элементы материи — атомы, молекулы, протоны и электроны. Какими силами они связываются в одно физическое тело, в особенности твердое тело? Можно различать пять типов сил взаимодействия между атомами.

1. Электростатические силы. Каждый атом представляет собою систему электрических зарядов. В нейтральном состоянии число электронов равно числу зарядов ядра. Одни атомы легко отдают свои электроны, образуя положительные ионы, другие присоединяют лишние электроны, превращаясь в отрицательные ионы. Простейший тип взаимодействия и представляет собою притяжение противоположно заряженных ионов.

Однако и в том случае, если числа положительных и отрицательных зарядов в атоме или молекуле равны друг другу, мы можем иметь электростатические силы, когда расположение зарядов несимметрично. Только атомы нейтральных газов — гелия, неона, аргона и др. обладают совершенно симметричным строением, не создающим электрического поля вне атома; все же другие окружены полем, имеющим в одних участках одно, в других — другое направление. Например, может случиться, что совокупность всех отрицательных зарядов сдвинута несколько в сторону по отношению к положительным. Тогда мы имеем как бы систему из двух раздвинутых зарядов, называемую диполем. Такие диполи притягиваются друг к другу или отталкиваются в зависимости от относительного расположения. Силы взаимодействия убывают с увеличением расстояния между диполями еще быстрее, чем в случае двух зарядов, — как четвертая степень расстояния, тогда как силы между двумя зарядами убывают как квадрат расстояния.

Далее, можно представить себе систему, состоящую из двух противоположных диполей, несколько сдвинутых относительно друг друга, — это квадруполь. Между ними также возможно притяжение или отталкивание, убывающее с расстоянием как шестая его степень.

Можно идти и дальше по этому пути, рассматривая систему двух сдвинутых противоположных квадруполей или октуполь и т. д. Еще недавно казалось, что молекулярные силы в твердом теле можно будет целиком свести к такого рода электростатическим взаимодействиям. Ока-

залось, однако, что их недостаточно: приходится учитывать и силы динамического происхождения.

2. **Индукционные силы.** Если мы спросим себя, почему не только разноименные ионы, но и заведомо нейтральные атомы и молекулы взаимно притягиваются, несмотря на то что каждая из рассмотренных систем (диполи, квадруполь или октуполь) в зависимости от расположения одинаково часто могла бы испытывать как притяжение, так и отталкивание, то это можно будет объяснить только взаимным влиянием атомов друг на друга. Когда два нейтральных атома сближаются, то электрическое поле одного атома всегда смещает заряды в другом так, что одноименные заряды отталкиваются, а разноименные — приближаются, и поэтому влияние притяжения последних преобладает над отталкиванием первых. Если бы даже атом был симметричен, то, попадая в поле другого несимметричного атома, он теряет свою симметрию, превращаясь в диполь, и притом в такой диполь, который втягивается в создавшее его поле. Это — то же самое явление индукции, которым мы объясняем притяжение легких незаряженных предметов всяким электрическим зарядом, например притяжение кусочков бумаги наэлектризованным гребнем.

3. Еще большее значение имеют силы, вызванные взаимной ориентацией атомов при их сближении. Если, например, каждый из атомов обладает дипольным моментом, то такие атомы не только притягиваются или отталкиваются, но и взаимно поворачиваются, притом так, что на каких бы больших расстояниях они ни были расположены, сближаясь и поворачиваясь, они всегда притягиваются. Это — тот тип притяжения, который легко наблюдать между намагниченными иглками. В зависимости от того, повернуты ли две иглки друг к другу своими разноименными или одноименными полюсами, они будут притягиваться или отталкиваться, но если двум иглкам дать возможность вращаться, они всегда повернутся так, чтобы потом притянулись.

4. Многие атомы обладают дипольным моментом и оказывают магнитные действия. Однако по своей величине магнитные взаимодействия между атомами очень малы и существенной роли не играют.

5. Зато исключительное значение получают динамические молекулярные силы, смысл и значение которых лишь в самое последнее время выяснил квантовой меха-

никовой. При изучении взаимодействия двух атомов новая механика в отличие от старой не может рассматривать каждый атом и его энергию в отдельности. Оба они образуют одну нераздельную систему, в которой и каждый электрон приходится рассматривать одновременно связанным с обоими атомами и учитывать возможность перехода электрона из той части, которая раньше была одним атомом, в другую. Эти электроны участвуют в высокочастотных колебаниях, и взаимодействие между ними особенно усиливается в случае резонанса. Характерной чертой новой квантовой механики является также отождествление частоты колебаний с энергией электрона. Поэтому резонируют электроны, обладающие одинаковой энергией. Наконец, третьей чертой, внесенной новой механикой, является утверждение, что в одной системе не может быть двух одинаковых электронов. Поэтому если в двух атомах имеются электроны, одинаковые и по своей энергии и по направлению спинов своей магнитной оси, то в общей системе из этих двух атомов эти электроны уже не могут сохранить прежних значений характеризующих их переменных; их энергии или направления спинов должны стать разными. Из-за этого при сближении двух атомов один или несколько электронов переходят на более высокие уровни энергии, затрачивая работу; следовательно, между ними должно существовать отталкивание. В других случаях, наоборот, переход в одну общую систему при сближении атомов сопровождается уменьшением энергии и, стало быть, приводит к силам притяжения.

Подобные квантовые силы играют основную роль как при образовании молекул, так и при всякого рода взаимодействиях между ними. Наряду с ними существуют и остальные четыре типа сил, но из них только силы между ионами и лишь иногда силы между диполями по своей величине превышают квантовые. Поэтому все химические и молекулярные явления можно разбить на два больших класса: на системы из противоположно заряженных ионов, связанные преимущественно электростатическими силами, и на системы из нейтральных элементов, в которых преобладают динамические квантовые силы.

Рассмотрим сначала ионные, или полярные, системы. Электроны, входящие в состав атома, распределяются в замкнутые группы, окружающие ядро. Ближайшая к ядру группа включает в себе два электрона с наимень-

шей энергией. Следующие электроны, в силу того требования, что в атоме не может быть двух одинаковых электронов, уже не находят себе места в первой группе и образуют вторую замкнутую и симметричную группу, заключающую 8 электронов. Далее могут быть группы в 18 и 32 электрона.

Те элементы, число электронов которых как раз заполняет эти замкнутые группы, являются особенно устойчивыми, не вступают в химические реакции и в обмен электронами с другими атомами. Это — нейтральные газы: элементы № 2 (гелий), 10 (неон), 18 (аргон), 36 (криптон), 54 (ксенон), 86 (эманация).^{*} Все же остальные атомы имеют сверх этих законченных групп один, два или три лишних электрона или же им не хватает для образования вполне законченной группы соответственного числа электронов. Первые легко теряют лишние электроны и остаются заряженными положительно; вторые присоединяют недостающие им электроны извне, заряжаясь отрицательно. Таково происхождение положительных и отрицательных ионов. Противоположно заряженные ионы притягиваются друг к другу и соединяются попарно, образуя полярную молекулу. При достаточном охлаждении газ, состоящий из отдельных молекул, конденсируется в жидкость, где ионы различных молекул, притягиваясь друг к другу, отрываются от прежних связей. Однако сильное тепловое движение мешает им расположиться определенным образом, и такая ионная жидкость представляет собою хаотическую смесь положительных и отрицательных ионов, постоянно меняющихся местами.

Наконец, при дальнейшем охлаждении тепловое движение оказывается уже не в силах срывать ионы из положений с наименьшей энергией. Участвуя в хаотическом тепловом движении, они не удаляются заметно от этого своего положения равновесия. Вместо хаотической смеси мы получаем правильно расположенную систему ионов. В тех случаях, когда ионы совершенно симметричны, легко представить себе характер их расположения. Стремясь сблизиться под влиянием электростатических сил, ионы одного знака собираются вокруг ионов другого знака, взаимно окружая друг друга. Вокруг каждого положительного иона справа и слева, сверху и

^{*} Радон. (Прим. сост.).

снизу, спереди и сзади расположится по отрицательному иону. Если мы проследим расположение ионов по одному из этих направлений, то на одинаковых расстояниях мы обнаружим чередование противоположных ионов. Из таких цепочек, расположенных рядом друг с другом, состояются плоскости, наподобие шахматной доски заполненные ионами, а из этих плоскостей, наложенных друг над другом, — целое тело, твердый кристалл. Таков, например, кристалл каменной соли, построенный из положительных ионов натрия (атом натрия имеет 11 электронов, т. е. две замкнутые группы и один лишний электрон, который легко отдается, оставляя положительный ион натрия) и отрицательных ионов хлора (№ 17, которому не хватает одного электрона для образования третьей замкнутой группы).

Однако такое представление о кристалле, как о системе геометрически правильно расположенных зарядов, есть только схема, которая могла бы быть близкой к реальной картине лишь при полном отсутствии теплового движения. При обычных температурах тепловое движение, если и не достаточно для того, чтобы разрушить структуру кристалла, в отдельных местах все же удаляет то один, то другой ион из положения равновесия. Таким образом, и в твердом кристалле всегда имеется определенная часть ионов, не закрепленных и хаотически перемещающихся в кристалле. Другими словами, и в кристалле возможна диффузия и обмен местами индивидуальных ионов.

Так как сорванные со своего места ионы обладают зарядами, то под влиянием электрических сил они будут преимущественно перемещаться в ту сторону, куда направлена действующая на них сила. В электрическом поле создается односторонне направленный поток зарядов, т. е. электрический ток. Такова природа электропроводности кристаллов рассматриваемого ионного типа.

Изучая явления электропроводности, мне действительно удалось найти многочисленные подтверждения этой картины. Так, например, в некоторых кристаллах можно быстрым охлаждением создать нечто вроде закалки. Значительное число незакрепленных ионов, имевшихся в кристалле при высокой температуре, не успевают осесть на соответствующих свободных местах и остается диссоциированным. Несмотря на охлаждение, кристалл сохраняет повышенную электропроводность. Если

в помощь тепловому движению прибавить лучистую энергию (лучи радия), то диссоциация, а с ней и электропроводность временно повышаются, чтобы после прекращения радиации постепенно вернуться в нормальное состояние.

Явления, наблюдаемые при помещении кристалла в электрическое поле, казались настолько сложными и непохожими на электропроводность хороших проводников — металлов и жидких электролитов, что их и не решались называть электропроводностью, а объединяли под заголовком диэлектрических аномалий. Оказалось, однако, что не только качественно, но и количественно всю совокупность наблюдаемых явлений можно было объяснить исходя из указанной картины частично диссоциированного ионного кристалла. Все же усложнения объяснились скоплением ионов одного знака внутри кристалла при пропускании сквозь него тока. Эти объемные заряды своим добавочным полем искажают влияние внешней электродвижущей силы, но могут быть заранее подсчитаны и учтены.

Во многих кристаллах непосредственным химическим анализом удалось показать, что электрический ток сопровождается переносом вещества к электродам в количествах, точно отвечающих закону Фарадея: каждый ион переносит определенное целое число зарядов. Можно было, далее, проследить перемещение каждого из двух противоположных ионов, составляющих полярный кристалл, и определить степень диссоциации каждого из них при разных температурах. Так, например, оказалось, что в кристалле каменной соли при комнатных температурах имеется весьма слабая диссоциация ионов натрия, которая быстро возрастает с повышением температуры; теплота диссоциации составляет 10 000 кал/г·атом. Ионы хлора диссоциированы гораздо слабее, чем натрий при комнатной температуре; теплота их диссоциации составляет 30 000 кал. С повышением температуры диссоциация хлора растет значительно быстрее, чем натрия, и уже при 670 °С хлор и натрий одинаково диссоциированы, а при более высоких температурах хлор играет преобладающую роль в электропроводности соли.

Под влиянием очень коротких ультрафиолетовых волн, рентгеновых или радиоактивных лучей часть ионов натрия получает обратно утраченные электроны и превращается в атомы натрия, собирающиеся затем внутри кри-

стала в крупинки. Соль при этом окрашивается в желтый или бурый цвет. Если кристалл соли в этом состоянии осветить видимым светом, то он снова срывает с натрия электроны, и тогда в течение всего времени освещения мы имеем в кристалле постоянно освобождающиеся электроны, так же как и ионы, способные переносить ток. В этих условиях в каменной соли может существовать электронная проводимость. Подобно тому, как закон Фарадея является прямым доказательством ионного характера тока, так и электронный ток может быть обнаружен по отклонению, которое он испытывает в магнитном поле (явление Холла). Это явление действительно удалось наблюдать П. И. Лукирскому. Такая же электронная проводимость отмечена в сере, алмазе, цинковой обманке и ряде других кристаллов.

Большинство естественных кристаллов включает в себе примеси, оказывающие громадное влияние на электропроводность. Примеси, во-первых, являются центрами усиленной диссоциации кристалла, а, во-вторых, не обладая определенным местом в кристаллической решетке, преимущественно (в сравнении с ионами самого кристалла) переносят ток. Примеси иногда в тысячи и десятки тысяч раз увеличивают нормальную проводимость кристалла. Долгое время они представляли собой одно из главных осложнений в изучении электрических свойств кристаллов. Нам удалось, однако, показать, что, очистив кристалл путем многократной тщательной кристаллизации, можно получить вещество со строго определенными и вполне закономерными свойствами.

Помимо химических примесей, условия роста кристалла часто создают в нем неоднородности, которые оказывают влияние на все его свойства. Правильная система ионов, подобно описанной выше, поддерживается только на небольших участках (порядка тысячных или даже миллионных долей миллиметра). Весь кристалл состоит как бы из мелких правильно построенных осколков, не вполне точно сложенных, представляя собой что-то вроде плохой мозаики. Травление и окраска часто обнаруживают мозаичную структуру в кристаллах, по внешнему виду совершенно однородных. В последние годы появился целый поток статей учеников проф. Смекаля, пытавшихся этой мозаичной структурой кристалла объяснить большинство его свойств, в частности его электропроводность. Проверая утверждения и выводы этой теории, нам уда-

лось, однако, установить полную ошибочность подобного объяснения электрических свойств кристаллов.

Кристаллы, элементами структуры которых являются не ионы, а нейтральные группы, и при тепловом движении не отделяют ионов. Большею частью ток в них вызывается полярными примесями или отщеплением электронов. В то время как теория строения и электрических свойств полярных кристаллов хорошо изучена, для нейтральных или гомеополярных кристаллов нет еще ни теории, ни сколь-нибудь полного опытного материала, позволяющего понять механизм электропроводности.

Группировка атомов внутри кристалла может вызываться не только внешними причинами — примесями или изменением условий роста. Силы взаимодействия часто связывают большие группы атомов (иногда до миллиона) в одно целое, которое подвергается влиянию теплового движения, электрических и магнитных сил. Явление это мы называем молекулярным полем в кристалле. Впервые оно было обнаружено на явлении ферромагнетизма железа, кобальта и никеля. Способность магнитных атомов этих тел устанавливаться под действием магнитных сил в сравнительно слабых полях, несмотря на стремление теплового движения разбросать их по всем направлениям, можно было объяснить только допущением, что атомы этих кристаллов объединены в большие комплексы, способные противостоять тепловому движению.

Необычайная чувствительность современных радиоприемников позволяет непосредственно наблюдать, как при намагничивании железа один за другим поворачиваются эти сложные магнитные комплексы.

Здесь молекулярное поле обнаруживается благодаря тому, что атомы железа магнитны. Если же они являются электрическими, а не магнитными диполями, то они должны обнаружить в электрическом поле явления, аналогичные тем, которые наблюдаются в железе в магнитном поле. Действительно, И. В. Курчатов подтвердил существование этой аналогии на примере кристаллов сегнетовой соли. Как ферромагнитные тела в миллион раз более магнитны, чем другие вещества, так и в сегнетовой соли диэлектрическая постоянная достигает 25 000 против 2—10 в других кристаллах. И в этом случае обнаружено явление насыщения и ряд тепловых эффектов, совершенно аналогичных тем, которые характеризуют поведение железа в магнитном поле.

При некоторой температуре, обычно лежащей ниже температуры плавления кристалла, тепловое движение разрушает молекулярное поле, разбивает комплексы и кристалл лишается своих исключительных свойств. У ферромагнитных тел эта температура носит название точки Кюри; для железа она равна 780°C , для никеля она составляет 356°C . У сегнетовой соли подобная температура достигает 24°C . Замечательно, что исчезновение комплексов в кристалле мало сказывается на его структуре, но оно сопровождается поглощением энергии.

Существование комплексов и молекулярного поля в кристалле не есть результат магнитных или электрических моментов атомов. Комплексы создаются молекулярными силами и в первую очередь квантовыми обменными силами. Если элементы этих комплексов обладают магнитным моментом, то мы замечаем исключительные магнитные свойства; если они обладают электрическими диполями, то комплексы проявляются в необычных диэлектрических свойствах. Если же атомы элементов не имеют ни магнитного, ни электрического моментов, то и этих свойств не наблюдается; однако по ходу теплоемкости в точке Кюри можно заметить исчезновение комплексов по изменению энергии кристалла.

Не останавливаясь на других свойствах кристаллов, тепловых и оптических явлениях, которые точно так же объясняются изложенной картиной кристалла как правильно построенной системой электрических зарядов, собранных в атомы и комплексы, рассмотрим еще вопрос об абсолютной величине молекулярных сил. Ограничимся ионными кристаллами, где вопрос решается особенно просто; в качестве примера выберем каменную соль.

Рентгеновский анализ дает точное значение расстояния между ионами натрия и хлора, равное 2.81×10^{-8} см. Заряд этих ионов нам также точно известен: он равен 4.77×10^{-10} абс. ед. Два иона притягиваются, следовательно, с силой, равной произведению их зарядов, деленному на квадрат расстояния, т. е. с силой около $3 \cdot 10^{-4}$ дин. На 1 мм^2 приходится около 10^3 ионов, следовательно, сила, их притягивающая, равна $3 \cdot 10^{-4} \times 10^{13} = 3 \cdot 10^9$ дин, или 3000 кг. Этот подсчет очень неточен. Мы совсем не учитывали влияния на данный ион всех других ионов, кроме того, который расположен прямо против него. Мы не учли далее нарушения правильности решетки, вносимого тепловым движением. Если сделать эти поправки,

то окажется, что каждый слой ионов в решетке каменной соли притягивается соседним слоем с силой, примерно равной 200 кГ на 1 мм² поверхности слоя.

Если для проверки этого подсчета мы попытаемся разорвать кусок соли, то найдем, что он разрывается при напряжении 400 Г, а не 200 кГ на 1 мм², т. е. при напряжении, в 500 раз меньшем. Можно было бы предположить, что это расхождение вызвано не ошибочностью теории, а неправильностью опыта. При разрыве соли отрыв происходит не по всему сечению сразу, а, начиная от маленькой трещины на поверхности, постепенно распространяется через все сечение. Ясно, что в этом случае для разрыва нужно приложить силу, во много раз меньшую, так как она разрывает в каждый данный момент не всю площадь, а только очень маленький ее участок, для разрыва которого этой силы достаточно. Если это так, то можно было ожидать, что, устранив трещины на поверхности, мы затрудним разрыв. Действительно, когда мы попытались разорвать образец соли, помещенный в теплую воду, которая растворяла его поверхность, не давая образоваться трещинам, то оказалось, что для разрыва потребовалось не 400 Г, а 160 кГ на 1 мм², т. е. примерно столько, сколько и следовало ожидать. Другой опыт, давший такой же результат, был произведен с шариком из соли, охлажденным в жидком воздухе и затем внезапно внесенным в расплавленный свинец. Здесь на поверхности вообще не возникает растяжений, и поэтому имеющиеся трещины не могут распространиться вовнутрь. В центре же шара создается всестороннее растяжение до 70 кГ на 1 мм², которое, однако, кристалла не разрушает.

Каковы бы ни были технические перспективы доведения механической (и электрической) прочности и диэлектрической постоянной до их теоретического предела, самый факт столь значительного расширения пределов использования материалов достаточно интересен. Поскольку экспериментально обнаружен и твердо установлен факт возрастания механической прочности твердых тел, ясно, что раньше или позже он будет использован техникой, войдет в жизнь. Наш долг состоит в том, чтобы это произошло раньше, а не позже.