

Физика и кристаллография.

Г. В. Вульф.

1919 и 1920 годы были юбилейными годами для физики кристаллов. 250 лет тому назад, в 1669 году, датский ученый, член Флорентийской Академии опытных наук—Akademia del Cimento—Николай Стенон (Nikolaus Steno) издал книгу, озаглавленную *De solido intra solidum naturaliter contento*, т.-е. «О твердом теле, естественным образом заключающемся в другом твердом теле». Год спустя появилась книга другого датского ученого Эразма Бартолинского (Erasmus Bartholinus) под заглавием *Experimenta crystalli Instandici disdiaelaslici, quibus mira et insolita refractio detegitur*, т.-е. «Опыты с исландским колким кристаллом, в коих раскрывается удивительное и необычайное лучепреломление». Относительно второго сочинения не может быть никакого сомнения, что оно положило начало нашему знанию о двойном лучепреломлении в кристаллах. Это, действительно, было первое физическое явление, из всех характерных для кристаллов, обратившее на себя внимание. Наблюдение Эразма Бартолинского послужило материалом для классических работ Х. Хюйгенса и легло в основание всей кристаллооптики. Поэтому, казалось бы, что следовало считать Эразма Бартолинского основателем кристаллофизики, тем более, что относительно работы Стенона, несомненно, последует возражение, что она, хотя и легла в основание новой науки, но наука эта была не физика кристаллов, а кристаллография. Возражение это имеет за собой известное основание и опирается на общепринятый взгляд на значение открытия Стенона—так называемого закона постоянства углов кристаллов. Однако же в этом взгляде заключается недоразумение, так как при ближайшем рассмотрении оказывается, что этот именно закон должен считаться основным и исходным законом всей физики кристаллов, и поэтому основателем этого отдела физики надо считать именно Николая Стенона, Эразм же Бартолинский открыл лишь одно из многих явлений, характерных для кристаллов. Мы, однако же, нисколько не думаем умалять значение открытия своего лучепреломления, ставшего ныне одним из самых изученных явлений и одним из самых важных свойств кристаллов, служащих для их определения в минералогии и петрографии. Таким обра-

зом, нисколько не умаляя заслуг Эразма Бартолинского, мы посвятим наш очерк закону, открытому Стеноном, постараемся раскрыть его содержание, указать его важнейшее следствие и покажем, что закон этот есть, действительно, основной закон кристаллофизики.

I. Понятие о среде. Как известно, физика занимается изучением явлений природы, разнообразие которых бесконечно.

Рассмотрим два общеизвестных физических явления—распространение звука и распространение магнитных сил. Возьмем будильник, заставим его звонить и, поставив его на тарелку воздушного насоса, накроем колпаком и станем выкачивать воздух. По мере выкачивания воздуха звук звонка станет слабеть и, наконец, совершенно перестанет быть слышен, хотя молоточек звонка с прежней силой будет ударяться о звонок будильника. Если под колокол насоса поместить магнитную стрелку, то она начнет вертеться на своей подставке при поднесении магнита к стеклянному колоколу насоса, и это действие магнита на стрелку не прекращается и после выкачивания воздуха. Наоборот, стрелка становится еще более подвижной, не встречая со стороны воздуха препятствия к своему вращению.

Какое следствие извлекаем мы из нашего опыта? Повидимому, то, что звуковые явления не могут происходить в безвоздушном пространстве, в *пустоте*, магнитные же могут. Свет тоже может распространяться в пустоте, так как мы видим и будильник и магнитную стрелку сквозь окружающую их пустоту. Если бы мы поставили под колокол воздушного насоса электроскоп, то его листочки расходились бы от поднесенного к колпаку наэлектризованного тела, что указывает на то, что и электрические силы могут распространяться в *пустоте*.

Однако с таким выводом мысль современного физика не мирится. Мы считаем, что всякое явление может происходить лишь в *среде*, что в *пустоте* никакое явление не возможно и что в природе нет сил, действующих на расстоянии, без посредства промежуточных частей пространства, занятых какой-либо средой.

Мы считаем М. Фарадея одним из гениальнейших физиков именно за то, что, отвергнув возможность действия магнитных и электрических сил на расстоянии, он первый составил ясное представление о способе передачи этих сил от точки к точке в среде, окружающей наэлектризованные тела и магниты.

Отвергнув действие на расстоянии, мы отвергаем и существование пустого пространства и считаем, что, выкачав из-под колокола воздушного насоса воздух, очевидно необходимый для распространения звука, мы все же не выкачали еще *чего-то* необходимого для распространения света, электрических и магнитных сил. Это что-то не похоже на обыкновенное вещество, вроде воздуха или водяного пара, оно не материально в обыкновенном смысле этого слова или, как говорят, оно не *весомо*. Мы называем это нечто *эфиром*.

Мы назовем средою то, что, заполняя пространство, делает в нем возможными физические явления. Если бы нам удалось выкачать и эфир, то мы получили бы одно геометрическое пространство, в котором, по нашему мнению, не могло бы происходить никаких явлений.

Мы видим, что понятие о среде не совпадает с понятием о веществе: эфир—среда, но не вещество в обыкновенном смысле слова. В силу данного определения, мы переносим на среду известные свойства пространства. Так, среду мы можем представить себе безграничною, как, напр., мировое пространство.

Если среда ограничена со всех сторон поверхностями, отделяющими ее от окружающего пространства, то такой участок среды мы называем физическим телом или просто *телом*.

2. Кристаллы и кристаллография. Тела бывают газообразные, жидкие и твердые. В нашем очерке мы займемся лишь твердыми телами и притом *кристаллизованными*.

Рассматривая ряд кристаллизованных тел, напр., кристаллы кварца, каменной соли, известкового (исландского) шпата, полевого шпата, мы сейчас же увидим, что все это тела, ограниченные плоскими поверхностями, гранями, возникшими на них сами собою, при самом образовании этих тел. Эта многогранная форма существенно характерна для кристаллов и должна иметь свои особенные законы. У нас является естественная потребность разобраться в этих законах, уяснить себе природу этой удивительной геометрически правильной формы. Необходимо должна была возникнуть наука о кристаллах, и, действительно, такая наука существует и называется *кристаллографией*.

3. Явления, наблюдаемые в кристаллах. Кристаллы интересны не только со стороны своей правильной формы. Они интересны также и своими физическими свойствами. В *кристаллической среде* могут происходить явления, вовсе не зависящие от формы кристалла.

Вышлифуем или выколем из кристалла исландского шпата пластинку и накроем ею светлую дырочку в куске картона: дырочка покажется нам раздвоенною. Каждый луч света, входящий внутрь кристалла исландского шпата, подвергается такому раздвоению или, как говорят, двойному лучепреломлению. Лишь луч, проходящий по одному, направлению в кристалле по оптической оси кристалла, не обнаруживает раздвоения.

Это явление и было открыто в 1669 году Эразмом Бартолинским на кристаллах того же исландского шпата и послужило материалом Х. Хюйгенсу для его классического исследования в 1672 году.

Двойное лучепреломление служит источником многих, иногда весьма красивых явлений, наблюдаемых в кристаллах.

Пропустим пучок света через толстую пластинку исландского шпата, препарированную так, чтобы можно было воспользоваться

лишь одним из обоих проходящих в ней лучей. Такая пластинка называется николевой призмой и имеет уже вид столбика, а не пластинки. Сделаем пучок лучей сходящимся помощью системы сильных собирательных стекол и направим его вершину в пластинку из исландского шпата, вырезанную из кристалла перпендикулярно оптической оси. Затем пропустим лучи через другую систему сильных чечевиц и другую николеву призму и, наконец, получим на экране помощью чечевицы изображение того места пространства, в котором вторая система чечевиц может давать изображение от очень удаленных предметов. Мы получим красивую систему радужных кругов, пересеченную через центр темным или светлым крестом, смотря по относительному положению обоих николевых призм. Центр фигуры отвечает оптической оси кристалла, т.е. направлению, по которому нет двойного лучепреломления.

Есть кристаллы с двумя оптическими осями, как, напр., арагонит. Если взять пластинку из такого двуосного кристалла, то на экране получим два очка, окруженных системой радужных кривых, замыкающихся сперва вокруг каждого из очков, а потом охватывающих оба очка вместе.

На этих двух примерах—интерференционной фигуре в исландском шпате и в арагоните с особой ясностью выступает различие понятия о среде от понятия о веществе. Исландский шпат и арагонит представляют из себя одно и то же вещество—углекальцевую соль. Однако же явления в исландском шпате и в арагоните различны, очевидно потому, что в них вещество углекальцевой соли образует две среды с различными свойствами. Это различие мы склонны приписывать различному расположению частиц вещества в обоих кристаллах.

Описанные явления и бесчисленное множество других, наблюдаемых в кристаллах, делают кристаллы весьма интересными для физика. Этот интерес увеличивается еще и тем, что в кристаллах можно наблюдать такие явления, которые в других твердых телах происходить не могут. К таким явлениям относится способность кристаллов электризоваться от изменения температуры, т. н. пирозлектричество.

Для физика кристалл представляется особою средою, в которой возможны особые явления. Для того, чтобы изучать эти явления, физик делает из кристаллов *препараты*, напр., пластинки, николевы призмы и т. п. Для этого приходится кристалл прежде всего лишать его внешней формы, не щадя ее красоты.

Повидимому, *форма* кристалла не интересна для физика или может быть интересна лишь постольку, поскольку она может оказать помощь при изучении происходящих в кристалле явлений. В связи с этим, казалось бы, для физика не может быть интересна и наука о форме кристаллов, какою представляется на первый взгляд кристаллография.

Известный своими работами в области физики кристаллов В. Фойгт так выражается в своем учебнике кристаллофизики: «для того, чтобы войти в обетованную землю кристалла физики, вовсе не нужно проходить всей пустыни кристаллографии, вовсе не нужно знакомиться со всем богатством форм кристаллов, как бы эти формы ни были привлекательны сами по себе».

Посмотрим же, так ли, действительно, не нужна физику кристаллография, как это кажется на первый взгляд и как это утверждают такие видные авторитеты, как В. Фойгт. Мы увидим из дальнейшего изложения, что такое утверждение основано на одном коренном недоразумении, ведущем свое начало с самого основания кристаллографии, т.-е. с самого открытия в 1669 году Стеноном его закона постоянства углов. Мы увидим, что, будучи правильно истолкован, этот закон определяет кристалл не как физическое тело, имеющее известную *форму*, а как *среду*. Прежде, однако же, чем показать это, я скажу несколько слов о другом недоразумении, к сожалению, тоже очень распространенном и состоящем в том, что кристалл весьма часто называют и считают *неделимым* в смысле индивидуальности.

4. В каком смысле кристалл можно назвать неделимым? Очень часто приходится читать и слышать, что кристалл есть неделимое (индивидуум) неорганического мира и, как таковое, он характеризуется формой, отличающей его от неделимых других пород, как, напр., собака по своей форме отличается от лошади или от кошки, роза от лилии и т. п. Увлечшись этой аналогией, многие исследователи склонны видеть сходство кристалла с неделимым органического мира еще во многих других отношениях. Напр., способность кристалла восстанавливать утраченную при разломе внешнюю форму, когда кристалл вновь помещается в свой маточный раствор—явление так называемой регенерации кристаллов,—сравнивают со способностью многих организмов восстанавливать свои случайно утраченные органы.

В одном из годовичных собраний Моск. Физического общества имени П. Н. Лебедева А. Б. Млодзеевский познакомил собравшуюся аудиторию с рядом в высшей степени интересных и поучительных случаев, когда неорганическая природа замечательным образом воспроизводит такие сложные формы организмов, как грибы, водоросли и т. п., подражая этим организмам не только по виду, но и по способности расти, питаться и размножаться. Он показал, напр., на экране, как капля хлороформа «съедает» стеклянный волосок, смазанный шеллаком, и, «переварив» шеллак, выбрасывает «непереваренный» волосок и много других интересных явлений подобного рода. Однако же, несмотря на все сходство этих явлений с явлениями живой природы, все же это лишь аналогия, а не действительное тождество; что же касается кристаллов, то весьма простой и общеизвестный опыт показывает, что на кристалл нельзя распространить даже такой аналогии. Кристалл обладает способностью колотиться по *спай-*

ности ровными плоскостями, часто параллельными внешним граням. Напр., каменная соль, кристаллизующаяся, как говорят (хотя и не точно) в кубах, колетса по спайности по плоскостям, параллельным граням куба. Полученные осколки по своим физическим свойствам ничем не отличаются от первоначального кристалла. Тут даже нет аналогии с делением низших организмов, ибо в таких организмах всегда есть орган—ядро, которое делится раньше, чем весь организм распадется на части, и каждая часть должна получить свое ядро, чтобы стать самостоятельным организмом.

Опыт с раскалыванием кристалла по спайности показывает как раз обратное, а именно, что кристалл есть нечто противоположное неделимому. Кристалл также нельзя назвать неделимым, как и каплю жидкости или пузырек газа, и все аналогии между кристаллом и организмами, построенные на этом названии, надо считать чистейшим недоразумением. Надежду перекинуть мост между неорганическим миром и живой природой помощью кристаллов нужно признать заведомой утопией.

Можно получить капли жидкости, взвешенные в другой жидкости, одинакового с ней удельного веса. Как известно, капли принимают тогда вполне определенную форму шара. Будучи раздроблены, они «регенерируют», т.е. их части, вначале неправильные, становятся опять шарообразными. При этом капли «размножаются»—«неделимых» становится больше. Две капли при соприкосновении сливаются в одну, тоже принимающую форму шара, что можно сравнить с т. н. копуляцией низших организмов. Несмотря на все это, мы не станем серьезно утверждать, что такая капля жидкости вполне определенной формы есть неделимое, индивидуум. Если мы и решимся применить к капле это название, то лишь в очень узком смысле, в каком можно применить его ко всякому физическому телу определенной формы и определенных размеров. К этому вопросу мы еще вернемся в дальнейшем изложении.

Как дробление капли показывает, что капля жидкости есть лишь часть жидкой среды, так и опыт со спайностью обнаруживает, что и на кристалл надо смотреть, как на *твердую среду*, размеры которой случайны и свойства которой от этих размеров не зависят.

5. Закон постоянства углов кристаллов. Первые наблюдатели, разбиравшиеся в форме кристаллов одного и того же вещества, встретились с значительными трудностями. Казалось, что нет двух похожих друг на друга кристаллов. В глаза больше бросается различие, а не сходство, а между тем должно же в чем-нибудь заключаться сходство между кристаллами одного и того же вещества. Сходство это впервые и было установлено Н. Стеноном в 1669 году в его диссертации, заглавие которой приведено в самом начале нашей статьи. В начале его книги, после заглавной страницы помещена таблица рисунков с объяснительным к ней текстом, большего формата, чем

книга, а потому и сложенная в несколько раз. Эта таблица, как говорится в объяснительном тексте, составлена после спешного написания его книги. На таблице первые тридцать фигур изображают различной формы продольные и поперечные сечения кристаллов горного хрусталя—«кристалла», как называли его С т е н о н и его современники. Эти сечения представляют большое разнообразие. Относительно двух наиболее неправильных продольных сечений С т е н о н говорит в объяснении, что он мог бы привести множество подобных примеров, когда и длина и число сторон сечения весьма меняются, «но без изменения углов» «5 et 6 figura ex illarum genere sunt, quas innumeras afferre potui ad evincendum in plano axis laterum et numerum et longitudinem varie mutari non mutatis angulis». То же самое он говорит и по поводу вида поперечного сечения. Это разнообразие в величине сторон сечений С т е н о н объясняет разным количеством вещества, отлагающегося параллельными слоями на различных гранях кристалла, что указывает на то, что он близко подошел к понятию о скоростях роста граней кристалла. Таким образом по С т е н о н у кристаллы одного и того же вещества характеризуются одинаковыми величинами соответственных углов.

Закон, открытый С т е н о н о м, лег в основание всей кристаллографии, как ее первый закон — *закон постоянства углов*.

Было бы глубоким заблуждением утверждать, что закон С т е н о н а касается *формы* кристалла или определяет эту форму. Однако же с этим заблуждением приходится весьма часто считаться, и оно является главной причиной неправильного взгляда на кристаллографию и даже неправильного ее изложения во многих учебниках.

Дело в том, что, будучи понят правильно, закон С т е н о н а утверждает, что кристалл определяется не *формой* граней, а лишь *направлениями*, по которым на кристалле встречаем грани. Если определим направление грани перпендикуляром, *нормалью*, проведенной к грани из какой-либо точки внутри кристалла, то кристалл определяется по закону С т е н о н а совокупностью таких нормалей, заключающих между собою углы, характеристичные для кристаллов данного вещества. *Длина этих нормалей вполне неопределенна*: вполне безразлично, на каком расстоянии от выбранной внутри кристалла точки мы встретим грань, идя по данной нормали.

Определяя лишь направление, по которому на кристалле мы можем встретить какую-либо грань, закон С т е н о н а определяет кристалл, как *среду неопределенного* протяжения и притом *среду анизотропную*, т.-е. такую, свойства которой зависят от направления. Идя по одному направлению изнутри кристалла, мы встретим грань, идя по другому, мы встретим другую грань, на другом расстоянии, или встретим ребро или вершину. Способность ограничиваться плоскими гранями ставится законом С т е н о н а в параллель с любым другим векторным свойством кристалла, например, со скоростью распространения света, изменяю-

щей свою величину с направлением в кристалле. Мы видим, как из-за геометрии выступает физика, и это уже на заре всего учения о кристаллах. К сожалению, эта физика, явственно выступающая в работе Стенона, осталась и остается поныне в значительной мере не оцененной и даже незамеченной, и кристаллография не получила своевременно тех физических оснований, которые отвечают ее истинному содержанию и были заложены при самом ее возникновении.

Последнее время закон Стенона привел к очень характерному способу изображения кристаллов, сближающему методы кристаллографии с методами астрономии. Астроном тоже имеет дело с направлениями, по которым мы видим небесные светила. Эти направления являются в виде прямых линий, выходящих из глаза наблюдателя и идущих к светилам. Астроном пересекает эти прямые поверхностью шара, имеющего центр в глазу наблюдателя и изображает светила точками пересечения прямых с шаром. Направления прямых он определяет помощью *теодолита*—инструмента с двумя взаимноперпендикулярными деленными кругами. В соответствии с данными, полученными при измерении теодолитом, положения точек на шаре определяются двумя числами, *сферическими координатами*. При изучении кристаллов теперь поступают совершенно так же, определяя относительное направление нормалей к граням помощью *теодолитного гониометра* и нанося результаты определения в виде точек на поверхность шара.

6. Закон целых чисел. Если основной закон кристаллографии переносит все внимание на кристалл, как на среду, то и другие законы этой науки должны естественным образом также характеризовать кристалл, как среду. В этом отношении весьма поучителен *закон целых чисел*, определяющий всю совокупность граней кристалла, сколько бы этих граней ни наблюдалось на кристалле, и позволяющий предсказывать направления, по которым можно надеяться встретить новые грани.

Здесь не место вдаваться в подробности, но дело касается вопроса столь важного и существенного для целей этой статьи, что я посвящаю несколько строк его выяснению.

В поисках закона, связывающего грани кристалла в одно целое, мы упростим нашу задачу, если сведем ее на плоскость. Если, скажем мы, существует закон, связывающий в одно целое грани кристалла, то должен существовать и закон, связывающий в одно целое и систему ребер кристалла, как систему прямых, по которым пересекаются грани кристалла. Если это так, то достаточно рассмотреть одну из граней кристалла, ограниченную достаточным числом ребер, и найти закон расположения этих ребер. Этим и будет задача сведена на плоскость.

Возьмем грань кристалла и определим относительное направление ограничивающих ее ребер, проведя из какой-либо точки на плоскости прямые, параллельные этим ребрам. В полученном пучке пря-

мы возьмем две прямые за *оси* и третью за *единичное* ребро. На единичном ребре возьмем точку на произвольном удалении от *начала*, т.-е. от точки пересечения всех прямых, и проведем через нее две прямые, параллельные осям. Между проведенными прямыми и осями образуется параллелограмм. Повторим этот параллелограмм сколько угодно раз, проведя два ряда прямых, параллельных осям. Мы получим т. н. плоскую *параллелограмматическую* сетку или просто *сетку*. Построив такую сетку, мы легко заметим, что все ребра, входящие в наш пучок, представляются *рядами* сетки, т.-е. прямыми, проходящими через вершины параллелограммов, которые в данном случае называются *узлами* сетки. Таким образом вся система ребер, ограничивающая какую-либо грань кристалла, определяется одной плоской сеткой. Обобщая это построение на пространство трех измерений, мы получим вместо плоской сетки *пространственную решетку*, связывающую в одну систему все ребра кристалла, являющиеся рядами такой решетки. Грани кристалла являются плоскими сетками в такой решетке, и весь кристалл можно вырезать из решетки, проводя плоские разрезы по сеткам решетки. Оказывается, что чем гуще будет сетка, выражающая грань кристалла, тем эта грань является больше развитой на кристалле и встречается на нем чаще, чем другие грани, отвечающие менее густым сеткам.

Оказывается, что и этот закон ничего не говорит о форме кристалла, а лишь о направлениях, связываемых в одно целое пространственной решеткой. Значит, и решетка характеризует кристалл, как *среду*.

Более того, решетка характеризует кристалл, как однородную анизотропную среду. Однородность среды выражается в однообразном и правильном повторении узлов решетки в пространстве, анизотропия—в неодинаковом расстоянии узлов по рядам решетки разного направления. Так же, как и среда, решетка представляет образ бесконечного протяжения, не имеющий определенных границ.

7. Симметрия кристаллической среды. Решетка характеризует кристалл еще с одной в высшей степени важной и существенной стороны. Дело в том, что *решетка есть симметрический образ*. Под симметрическим образом мы понимаем образ, состоящий из одинаковых, периодически повторяющихся частей. В решетке такими частями являются узлы, расположенные на равных промежутках вдоль рядов решетки. Так как каждый кристалл выражается пространственной решеткой, как бы его заполняющей, то, стало-быть, каждый кристалл есть по своей природе *симметричная* среда.

В кристалле симметрично расположенные направления должны быть *физически* равнозначны, т.-е. какое-нибудь физическое свойство вещества кристалла, выражающееся вектором, должно иметь одну и ту же величину по всем этим направлениям. Самые грани кристалла должны считаться одинаковыми и симметричными друг другу, если

они физически равнозначны. Для определения равнозначности граней прибегают к испытанию их на их отношение к внешним воздействиям, напр., на отношение к растворителям, получая т. н. *фигуры вытравления*. Если на две грани кристалла растворитель действует одинаково, образуя на них одинаковые фигуры вытравления, то такие две грани должны быть одинаковы и симметрично расположены на кристалле. Говорят, что они составляют одну *кристаллографическую форму*, при чем опять-таки для этой формы характерно лишь относительное положение входящих в нее граней.

Определив точно понятие симметрии, что было сделано не сразу, а постепенно, совокупными усилиями многих исследователей, среди которых мы встречаем имена Хесселя, Бравэ, Миннигероде, Гадолина, Кюри, Федорова и других, мы можем вывести все возможные случаи симметрии кристаллической среды. Таких случаев оказывается *тридцать два*.

Если бы кристаллография была учением о форме кристаллов, то наглядное изображение этого результата состояло бы из таблицы с изображением различных многогранников, отвечающих каждому случаю симметрии. Такие наглядные таблицы действительно существуют, но на них изображаются вовсе не многогранники, а шары, разделенные на симметричные части. Число участков, на которые распадается шар, соответствует числу *равных* или *равнозначных* направлений, характеризующему кристаллическую среду данной симметрии. При этом равными или равнозначными направлениями считаются такие, по которым величина какого-либо векторного свойства кристалла должна иметь одинаковое значение. Кристалл существенно характеризуется числом и относительным расположением таких равнозначных направлений, а не чем-либо иным. Если точками на шаре отметить равнозначные друг другу направления кристалла и провести в этих точках плоскости, касательные к шару, то эти плоскости взаимным своим пересечением образуют многогранник, так называемую простую *форму* кристалла, но этот многогранник по своей форме никогда не выявляется на кристалле. Если, напр., полученная простая форма будет куб, то это значит, что в кристаллах данной симметрии существуют шесть равных попарно взаимнопротивоположных направлений, расположенных по трем взаимноперпендикулярным прямым. Подобная система равных направлений существует, напр., в каменной соли, и соответственно этому кристаллы этого вещества одеваются шестью гранями, параллельными плоскостям куба. Говорят, поэтому, что каменная соль кристаллизуется в кубах, однакоже кристаллы этого вещества *никогда* не имеют формы кубов в геометрическом смысле этого термина.

Подобная таблица с шарами вместо многогранников, представляющая венец всего учения о кристаллах, убедительнейшим образом говорит, что предмет этого учения заключается не в *форме* кристал-

лов, а в *геометрических свойствах и в частности в симметрии кристаллической среды*. Это и составляет настоящее содержание кристаллографии. Все остальное может быть отнесено к той пустыне, о которой говорит В. Фойгт; пески этой пустыни заносили в течение двух с половиной веков настоящий смысл закона Стоуна, лежащего в основании всего этого в высшей степени ясного и простого учения.

8. Зависимость явлений от симметрии среды. Как же после всего сказанного можно утверждать, что для физика не нужна кристаллография? Ведь всякое явление происходит в зависимости от симметрии среды.

Сделаем такой простой опыт, наглядно показывающий эту зависимость. Возьмем пластинку гипса, покроем ее слоем воска и прикоснемся нагретой иглой. Воск оплавится вокруг иглы, и граница расплавленной части окажется эллиптической формы. Почему? Ответим на это таким опытом. Покроем парафином медную проволочную сетку с квадратными петлями так, чтобы парафин равномерно заполнил все петли сетки, затем, дав парафину остыть, нагреем сетку в одном месте на маленьком пламечке и стряхнем расплавленный парафин. Получится *круглое* поле, свободное от парафина. Скосим другой кусок такой же сетки, потянув его за противоположные углы. Мы получим сетку с ромбическими петлями, и если с такой сеткой продедем тот же опыт, то получится свободное от парафина поле *эллиптического* вида. В сетке все осталось прежнее, кроме симметрии, которая стала иная, в соответствии с чем получилась и иная скорость распространения теплоты по различным направлениям. Очевидно, и в гипсе дело зависит от симметрии среды.

Так как явления зависят от симметрии среды, то физику необходимо знать эту симметрию, чтобы учесть ход явления. В среде изотропной, в которой все направления одинаковы, нет нужды обращать внимания на свойства *среды*. Мы говорим о распространении света, звука в *пространстве*, или о скорости их в воздухе, воде и прочих *веществах*. Мы оставляем в стороне промежуточное понятие о среде. Разбирая же явления в кристаллах, мы должны считаться с понятием о среде и должны знать *геометрические свойства кристаллической среды*, т.-е. *кристаллографию*. Таким образом кристаллография является вводной главой в физику кристаллов.

9. Форма кристалла. Мы видели, что построенная на законе Стоуна кристаллография ничего не говорит о кристалле, как о физическом *теле*, имеющем определенную форму, хотя бы и отличную от формы других тел из того же вещества. А между тем эта внешняя форма есть нечто вполне реальное, и если различные кристаллы одного и того же вещества различаются по своей внешней форме, то это, очевидно, зависит от различия в условиях, при которых образовались эти кристаллы.

Выяснение условий, при которых кристалл получает ту или другую форму, было достигнуто сравнительно недавно, почти в наше время, трудами американского физика В. Гиббса и французского физика П. Кюри. Независимо друг от друга они обратили внимание, что, кроме внутренних сил, вызывающих многогранную форму кристалла, кристалл растет еще под влиянием сил, действующих на его поверхности, отделяющей его от внешней, питающей его среды. Эти силы производят работу роста кристалла, под влиянием которой изменяется величина и вид поверхности кристалла. Относительно этой-то энергии Гиббс и Кюри высказали принцип, носящий их имя и состоящий в том, что величина этой поверхностной энергии кристалла должна быть наименьшая при данном объеме кристалла. Этот принцип есть лишь частный случай более общего принципа экономии, постоянно наблюдающегося в явлениях природы.

Вернувшись к нашему опыту с каплей жидкости, взвешенной в другой жидкости, мы сейчас же увидим, что форма капли подчиняется тому же принципу, но только случай с каплей гораздо проще. На поверхности капли также действуют силы, изменяющие ее форму и придающие ей вид, при котором ее поверхность, а вместе с тем и энергия этой поверхности будет наименьшая при данном объеме капли. Для капли жидкости, частицы которой движутся друг около друга с одинаковой легкостью по всем направлениям, условие это будет выполнено, когда капля примет форму шара, так как из всех фигур, ограниченных криволинейными поверхностями, шар, при данном объеме, обладает наименьшею поверхностью. С кристаллами дело обстоит сложнее. Благодаря анизотропии кристаллов, каждая грань кристалла обладает своей особой величиной поверхностной энергии, отнесенной к единице площади грани. Эту величину называют капиллярной постоянной грани. Поэтому, чтобы вычислить общую величину поверхностной энергии кристалла, надо умножить капиллярную постоянную каждой грани на площадь соответственной грани и сложить все полученные произведения. Эта величина и должна иметь наименьшее значение при данном объеме кристалла. Дифференциальное вычисление дает способ, по которому из этого условия можно вычислить размеры и форму отдельных граней кристалла, а потому определить и форму всего кристалла.

Однакоже, способ этот, применение которого Кюри показал на двух простых примерах, сложен и не нагляден; мне же удалось найти чисто геометрическое построение, весьма наглядное и ведущее очень просто к цели. Это построение состоит в том, что на нормалях к граням, проведенных из одной точки, откладываются от этой точки отрезки, пропорциональные капиллярным постоянным соответственных граней, и через концы полученных отрезков проводятся перпендикулярные плоскости. Своим взаимным пересечением эти плоскости определяют вокруг взятой точки выпуклый многогранник, подобный форме кри-

сталла, удовлетворяющей принципу Гиббса-Кюри. Это построение является прямым дополнением построения Стенона, но уже в области учения о *форме* кристалла. Построение Стенона определяет кристалл, как однородную неограниченную среду и оставляет неопределенными длины нормалей к граням; данное же мною построение, характеризующее кристалл на основании принципа Кюри-Гиббса, как физическое тело, определяет расстояния, на которых должны быть отрезаны нормали Стенона, а тем самым и форму кристалла.

Таким образом, в отыскании внешней формы кристалла мы встречаемся с задачей из области физики.

10. Кристаллы и рентгеновские лучи. Мы видели, что направления всевозможных граней и ребер кристалла, какие бы на нем ни образовались при различных условиях, геометрически определяются пространственной решеткой, состоящей из точек—узлов, правильно расположенных в пространстве. Эта правильность расположения узлов решетки давно наводила на мысль, что кристаллы должны состоять из элементарных частиц, располагающихся по этим узлам. Это было очень вероятное предположение, но ему недоставало до сих пор убедительного доказательства, и оно так и оставалось лишь гипотезой. Представлению о кристалле, как о пространственной решетке недоставало физического содержания.

Лишь десять лет тому назад было сделано открытие большой важности, наполнившее кристаллическую среду таким физически-определенным содержанием. Та пустыня, о которой говорит Фойгт и под видом которой представлялось физики учение о геометрических свойствах кристаллов, оказалась весьма густо заселенной и притом не как попало, а в строго определенном, поистине изумительном порядке.

Я говорю об открытии диффракции рентгеновских лучей в кристаллах М. Лауэ в 1912 году. Об этом открытии много писалось и говорилось в свое время, и я здесь лишь напомню суть дела.

Узкий пучек рентгеновских лучей, пропущенный через кристалл, разлагается кристаллом на целый ряд узких пучков малой яркости. Приняв этот ряд пучков на фотографическую пластинку, мы получаем на пластинке после проявления следы пучков в виде темных пятен. Расположение пятен имеет особую правильность, указывающую на то, что все явление происходит так, как будто бы первоначальный пучек отражался в кристалле частично на целом ряде плоскостей, расположенных по тому же закону, по какому в кристалле расположены сетчатые его решетки. Исследуя ближе действие на падающий пучек рентгеновских лучей атомов, расположенных по узлам пространственной решетки, мы действительно найдем, что каждый атом становится источником *вторичных* рентгеновских лучей, усиливающих друг друга по законам интерференции света по совершенно определенным направлениям и что эти направления как раз соответствуют направ-

лениям, по которым начальный пучек отразился бы от сетчатых плоскостей, если бы эти плоскости были сплошные и могли бы действительно отражать рентгеновские лучи. Таким образом оказалось, что это замечательное явление, указывающее на тождество рентгеновского света со светом видимым, дающим явления интерференции для рентгеновского света, может быть вызвано в вышеописанном виде только в кристаллах, благодаря тому, что в кристаллах атомы располагаются по узлам пространственной решетки. С другой стороны, оказалось, что самый вид явления, т.-е. расположение и яркость отдельных вторичных пучков, зависит от способа расположения атомов в кристалле, так что из этого вида явления можно заключить о строении данного кристалла. Таким образом вопросы, касающиеся природы рентгеновских лучей, теснейшим образом сплелись с вопросами о структуре кристаллов и о их пространственной решетке, которая получила при этом физическое значение. Оказалось, что выяснить природу рентгеновского света возможно лишь при условии ясного представления геометрических свойств кристалла. С другой стороны мы получили в рентгеновских лучах могучий метод определения внутреннего строения кристаллов. Во введении в замечательную книгу У. Х. Брагга и У. Л. Брагга «Рентгеновские лучи и строение кристаллов» У. Х. Брагг говорит:

«Для того, чтобы усвоить содержание и успех нового учения (о природе рентгеновских лучей) необходимо иметь сведения, как о рентгеновских лучах, так и о кристаллографии. Так как эти отрасли знания до сих пор не были связаны друг с другом, то следует ожидать, что многие, интересующиеся их новым развитием, встретят препятствие в удручающем невежестве в той или другой из них».

Выразим уверенность, что отныне это препятствие устранится. Учение о кристаллах должно, наконец, занять место, соответствующее его настоящему содержанию, в ряду отделов нашего знания, стать главою физики,—главою, усвоить которую необходимо всем, интересующимся не только физикой твердого вещества, но и физикой вообще, доказательство чему мы видим в учении о рентгеновских лучах.
