

У. БРЕГГ

~~Читальня Эмблянтов
№ 114~~

О ПРИРОДЕ ВЕЩЕЙ

Перевод с английского
П. С. ТАРТАКОВСКОГО и
Б. Н. ФИНКЕЛЬШТЕЙНА

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ

БИБЛИОТЕКА
Моск. экан.
ВЯ-ТЭ
Бесплатно



ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
Москва 1932 Ленинград

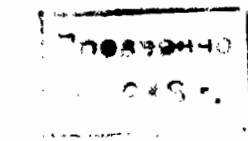
41336
25893

9463

CONCERNING
THE NATURE OF THINGS

Six Lectures delivered
at the Royal Institution

by
SIR WILLIAM BRAGG



London
G. Bell and sons LTD
1925

80222
787605

Читатель! Сообщите отзыв об этой книге (ваши замечания о ее недостатках и желательных изменениях в следующем издании) по адресу: Москва, Мясницкая, д. 20, Государственному технико-теоретическому издательству (в секцию организационно-массовой работы).

Редакционную работу по этой книге провел Ф. Ф. Волькенштейн. Издание оформ. А. И. Архангельский. Корректуру держала Н. А. Демина. Наблюдал за выпуском Н. А. Саваров. Рукопись сдана в производство 25 мая 1932 г., листы подписаны к печати 5 декабря, книга вышла в свет в декабре тираж 3000, печатных знаков в листе 28000, листов в книге 94, заказ № 5519. ГТИ 451, уполномоченный Главлита Б-21346.

Фабрика книги «Красный пролетарий». Москва, Краснопролетарская, 16.

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

В моих рождественских лекциях, читанных в Королевском обществе в 1923—1924 гг., я поставил себе целью изложить последние открытия в области физики. Многие факты, установленные в последнее время, могут послужить прекрасным материалом для «лекций, рассчитанных на юную аудиторию». Они интересны и практически ценны.

Я не закрываю глаз на два особых затруднения, которые могут здесь встретиться. Первое, затруднение это — трудность понимания того бесконечно малого масштаба, которым исследуются действие и свойства атомов; но в конце концов это затруднение обусловлено необычностью масштаба, а к этому можно скоро привыкнуть. Второе затруднение связано с представлением пространственных образов. Некоторые думают, что недостаток такого воображения — вещь непреодолимая и что он обусловлен отсутствием особого рода способности, которой обладают лишь немногие. Я глубоко убежден в том, что такое мнение неверно: нам было бы одинаково трудно представить себе явления природы в двумерном пространстве, как и в трехмерном, если бы у нас не было возможности с такой легкостью выражать наши двумерные образы при помощи карандаша и бумаги. Если держать в руках модель, то на то, чтобы схватить идею, нужно не больше времени, чем на то, чтобы ее прочитать, и еще меньше времени, чем на то, чтобы приготовить ее описание. Быть может, некоторые из моих читателей настолько заинтересуются, что пожелают построить модели тех немногих кристаллов, которые упоминаются в этой книге, и пойдут еще дальше.

Я несколько дополнил лекции, которые послужили материалом для этой книги. Цель этих дополнений — придать книге возможно большую полноту: они не совсем пригодны для изложения на лекции, но скорее найдут себе место в книге, ибо читатель может по своему желанию вовсе пропустить их, или перечитать их несколько раз, или разобрать их с моделью в руках.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие автора	3
Лекция первая	
Об атомах, из которых построено вещество	5
Атомистическая гипотеза. Размеры атомов. Молекулы, Движение атомов, силы сцепления. Радиоактивность Столкновения частиц с атомами. Вильсоновские фотографии. Строение атома.	
Лекция вторая	
О природе газов.	31
Соединение атомов в молекулы. Инертные атомы. Тепловое движение газовых молекул. Смесь газов. Распространение звука. Диффузия и теплопроводность. Атмосферное давление. Еще о строении атомов.	
Лекция третья	
О природе жидкостей.	53
Отличие жидкостей от газов. Испарение. Силы сцепления. Несжимаемость жидкостей. Круглая форма капель Смачивание. Поверхностная пленка. Мыльный пузырь. Растекание масла по поверхности воды. Еще о смачивании. Пузыри внутри жидкости. Капиллярность.	
Лекция четвертая.	
О природе кристаллов. Алмаз	74
Отличие твердого тела от жидкого и газообразного. Кристалл. Анализ кристалла при помощи рентгеновых лучей. Отражение рентгеновых лучей от кристаллических решеток. Структура кристалла алмаза. Строение некоторых органических молекул.	
Лекция пятая.	
О природе кристаллов: лед и снег.	102
Формы снежинок. Образование светящегося круга вокруг солнца. Ледяные цветы. Анализ строения кристаллов льда с помощью рентгеновых лучей. Плавление льда под давлением. О строении некоторых углеродных молекул. Кристаллы каменной соли.	
Лекция шестая	
О природе кристаллов: металлы.	128
Кристаллическая структура металлов. Растяжение и разрыв металлических образцов. Свободные электроны и электропроводность металлов. Теплопроводность. Сплавы и их свойства. Твердость стали.	

ЛЕКЦИЯ ПЕРВАЯ

ОБ АТОМАХ, ИЗ КОТОРЫХ ПОСТРОЕНО ВЕЩЕСТВО

Атомистическая гипотеза. Размеры атомов. Молекулы, Движение атомов, силы сцепления. Радиоактивность. Столкновения α -частиц с атомами, Вильсоновские фотографии. Строение атома.

Около двух тысяч лет назад знаменитый римский поэт Лукреций написал трактат «De rerum natura» — «О природе вещей». Он утверждал что воздух, земля, вода и вообще все тела в природе состоят из бесконечного множества маленьких частиц, находящихся в быстром движении, размеры которых так малы, что их невозможно заметить каждую в отдельности. Лукреций пытался показать, что этих предположений достаточно для объяснения свойств материальных тел. Но не он был творцом этой идеи. Он только излагал взгляды той философской школы, к которой он сам принадлежал.

В то же время существовала и противоположная точка зрения, отрицавшая возможность доказать каким бы то ни было образом, что материя состоит из частиц. Ее приверженцы утверждали, что если разделить по каплям воду, находящуюся в стакане, и эти капли, далее, делить на более мелкие, то такое деление можно продолжать до бесконечности, причем в результате все будет получаться вода, ничем не отличающаяся от воды, бывшей в стакане. Наоборот, с точки зрения Лукреция, продолжая такое подразделение достаточно далеко, мы пришли бы к простейшим частицам, или атомам. Согласно первоначальному его смыслу слово атом обозначает неделимый.

Между изложенными двумя точками зрения существует громадная разница. Согласно второй точке зрения нет смысла изучать строение вещества, ибо это не может дать нам никаких новых сведений. С точки зрения же Лукреция наблюдаемые свойства тел зависят от природы тех атомов, из которых они состоят и, следовательно, очень интересно и важно попытаться исследовать, каковы

свойства этих атомов. Последняя точка зрения, повидимому, более близка к истине и этому обстоятельству должны быть рады все, кто любит исследование природы. Лукреций, впрочем, не мог иметь никакого понятия об атомных теориях в современном смысле этого слова. Он не знал о существовании столь большого числа различных атомов, а также и того, что атомы определенного вида совершенно тождественны.

Последняя мысль относительно нова: с совершенной определенностью она была высказана впервые Джоном Дальтоном в начале XIX в.

Эта новая идея, гласившая, что нам приходится иметь дело с ограниченным числом сортов атомов, а не с бесчисленным множеством их, дала возможность разрешить целый ряд проблем. Положение науки было бы безнадежным, если бы ей пришлось изучать отдельно все атомы, составляющие, например, кусок меди. Если же мы знаем, что в чистой меди есть только один сорт атомов и других атомов меди нет нигде в мире, мы можем надеяться на успех; объяснить свойства меди мы сумеем, изучив свойства ее атомов и законы их соединений. Ведь именно в соединениях атомов и сосредоточен весь интерес вопроса.

Число различных сортов атомов не особенно велико — их насчитывается около 90. Группируясь по несколько штук, они образуют молекулы химически простого тела, когда они односортны, и химически сложного тела, когда они разносортны. Молекулы, следовательно, являются простейшими частицами в химическом смысле: разделив их на атомы, мы разрушим самое химическое соединение и получим составляющие его простые тела. Подробнее об этом будет говориться ниже. Можно сравнить атомы с буквами азбуки, составляя которые различными способами, мы образуем множество слов. Совершенно так же различные комбинации сравнительно небольшого числа атомов образуют молекулы. Продолжая аналогию дальше, мы могли бы сказать, что соединение слов в целые фразы и отрывки, имеющие то или иное значение, подобно смешению различных видов молекул, образующих бесчисленное множество веществ различного вида и свойств.

Атомная теория Лукреция не носила в себе зародыша той основной мысли, которая была необходима для дальнейшего ее роста и прогресса. Поэтому она погибла, и самое слово атом стали употреблять в совершенно неопределенном и неправильном смысле, желая назвать что-то

очень маленькое: в этом смысле слово атом встречается иногда в пьесах Шекспира.

Будем представлять себе природу как строителя, который создает все окружающее нас из нескольких сортов атомов; совершенно так же архитектор строит дом из материалов разных сортов — кирпичей, балок, досок, кусков стекла и т. п.

Из девятости сортов атомов многие встречаются только изредка. Весьма замечательно, что все предметы на земле и во вселенной состоят, насколько нам известно, лишь из небольшого числа элементов.

Вселенная, столь богатая в своем разнообразии, — суша и все, что покоится и произрастает на ней, воды морей, воздух и облака, все живые существа на суше, в море и в воздухе, наши собственные тела и всякая часть их, солнце, луна, звезды — все состоит из атомов небольшого числа сортов. Да, поистине это так: ведь если архитектору дать кирпич и камень и железные балки, он построит бесчисленное множество различных сооружений, дворцов, хижин или мостов; почему бы природе не творить таким же образом?

Мы знаем, что, приступая к постройке, архитектор имеет план, на создание которого было положено много размышлений, расчетов и таланта; строитель отдает распоряжения рабочим, которые выполняют этот план, и таким способом воздвигается стройное здание. Мы видим строителя с планами в руках около воздвигаемого им сооружения. Но планы построек природы скрыты в самих атомах. Они таинственны и замечательны, так как только из них, из того, что в них заключается, создается бесконечное разнообразие мира.

Мы не задаем себе вопроса, как случилось, что атомы являются такими сокровищницами. Нас интересует только, каковы эти атомы: ответа на этот вопрос ищут с тех самых пор, как более ста лет назад значение его было ясно оценено наукой.

Имеют ли атомы размеры и форму и остальные отличительные свойства, какими обладают предметы, к которым мы привыкли? На этом вопросе нам следует остановиться.

Прежде всего следует отметить, что за последние двадцать пять лет мы нашли новые пути для изучения природы. Открытие радиоактивности и лучей Рентгена совершенно изменило положение науки. Теперь оказывается возможным понять многое из того, что было со-

нашею темнотой раньше — перед нашими глазами поднимается завеса над новым удивительным миром, который еще предстоит исследовать. И я не думаю, чтобы это было слишком трудно.

Новое знание, подобно всякому внезапному откровению, освещает перед нами путь, по которому мы шли, и делает понятным то, что ранее казалось трудным. Правда, новые пути науки ведут и к новым затруднениям, но в этом и заключается весь интерес и содержание всякого исследования.

Мы попытаемся наметить первые шаги в эту новую область и очертить те новые сведения, которые удалось уже получить.

Мы возвращаемся к вопросам, относящимся к атомам. Еще до начала нового периода науки на многие из этих вопросов были даны удивительно точные ответы. В своих работах о свойствах атомов и, в частности, об их размерах В. Томсон (лорд Кельвин¹) при помощи ряда остроумных косвенных приемов еще в начале 80-х годов прошлого столетия пришел к выводам, которые в настоящее время мы можем проверить непосредственно точными методами экспериментального (опытного) исследования. Оказалось, что Томсон был удивительно близок к истине.

Оценка действительных размеров отдельных атомов — задача очень трудная, но все четыре способа рассуждения, примененные им, привели приблизительно к одинаковым результатам. В. Томсон пришел к заключению, что атомы или молекулы должны иметь диаметры приблизительно в $1/10\ 000\ 000$ сантиметра, или, точнее, от $1/10\ 000\ 000$ до $1/100\ 000\ 000$ сантиметра. Наши новые методы приводят нас к выводу, что диаметр атома углерода в алмазе равен $1,54$ стомиллионных долей сантиметра, а атом металлического калия имеет диаметр в $4,50$ стомиллионных сантиметра. Мы видим, что выводы лорда Кельвина были удивительно близки к истине, в особенности, если принять во внимание косвенные и неточные методы, которые тогда были в его распоряжении.

На рис. 1 показаны относительные размеры некоторых атомов, увеличенные в пятьдесят миллионов раз (особенность в изображении висмута на рис. 1 будет объяснена

¹ В. Томсон — английский физик, пользующийся мировой известностью. Родился в тридцатых годах XIX столетия и умер глубоким стариком в начале XX столетия продолжая свою плодотворную научную работу до последних дней жизни.

ниже). Числа, поставленные на рисунке, выражают размеры атомов в стомиллионных долях сантиметра. Числа эти получены в результате исследований кристаллов этих веществ, где атомы сложены наиболее плотным образом. Таким образом эти цифры показывают одновременно и поперечники атомов, и расстояния между центрами соседних атомов.

Если бы аудитория Королевского института, в которой Томсон впервые сообщил свои исследования, была увеличена во столько же раз, во сколько увеличены действительные размеры атомов на рис. 1, ее высота была бы больше расстояния от Земли до Луны. Только такое сравнение может помочь нам осознать всю малость предметов, о которых мы говорим. Но в то же время следует твердо помнить, что атомами отнюдь не следует пренебрегать лишь потому, что они малы: ведь они являются действительными элементами мироздания.

Малость атомов позволяет нам понимать, почему так трудно изучать их, хотя мы и сознаем, как это важно. Ценность тех новых методов, о которых я намерен говорить, заключается именно в том, что они позволяют нам иметь дело с атомами, несмотря на их малость.

Мы ответили в известной степени на вопрос о размере атомов; однако, если мы пойдем дальше и спросим себя об их форме, то полного и удовлетворительного ответа на этот вопрос мы не получим.

Химики, наука которых тесно связана с вопросом о соединениях атомов, редко считали нужным обсуждать вопрос об их форме; и в схемах химиков атомы не имеют никакой определенной формы. Отсюда не следует, что вид атомов не играет никакой роли — только старые методы не позволяли сделать на этот счет никаких заключений. Однако в одном отношении химики обращали на форму атома значительное внимание.

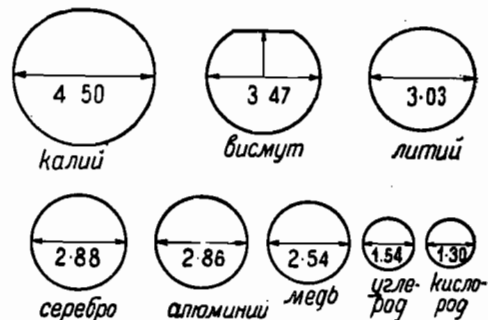


Рис. 1. Относительные размеры простейших атомов.

Атомы сложного тела расположены в пространстве некоторым определенным образом, причем расположение это различно для различных химических соединений. Особенно в органической химии оказалось необходимым изучать пространственное расположение атомов.

Зачастую эти пространственные расположения бывает довольно трудно себе представить, так как плоский рисунок на бумаге, к сожалению, не может дать точного представления о расположении в пространстве. Поэтому стараются употреблять твердые пространственные модели, в которых атомы изображаются шариками. С помощью этих моделей можно изобразить почти все последние открытия в этой области.

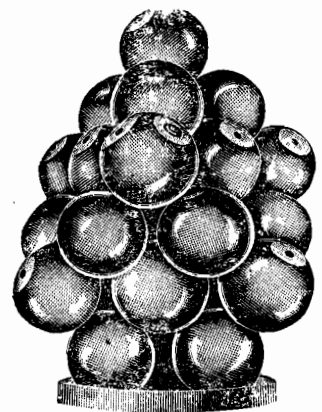


Рис. 2. Модель кристалла висмута.

Покуда мы еще не сообщили более подробных сведений о внутреннем строении атомов, т. е. о том, из каких частей они состоят и как эти части расположены, нам придется ограничиться лишь рассмотрением взаимного расположения самих атомов. Для этого нам достаточно указать направления, по которым лежат те или иные соседи данного атома.

В новейших работах, как мы увидим, расположение атомов твердых тел друг относительно друга изучено более подробно, и впервые измерены действительные расстояния между ними. Оказывается, что атом, имеющий

вокруг себя соседей одного и того же сорта, находится от них на одинаковых расстояниях. Но встречаются, однако, и исключения: например, в кристаллах чистого висмута каждый атом окружен шестью соседями, из которых три отстоят от рассматриваемого атома на расстоянии более близком, чем остальные три. Для построения модели кристалла висмута приходится пользоваться шариками с тремя площадками на них (рис. 2).

Зададим себе вопрос: что связывает атомы вместе в их различных комбинациях и сочетаниях? Подобно строителю, располагающему кирпичами, плитами, балками, мы имеем свой материал для постройки — атомы различных сортов. Поищем теперь цемента и гвоздей — оказывается, что их

нет. В качестве цемента природа не допускает никакого нового материала. Атомы соединяются сами собой. Химик говорит нам, что для этого они должны встретиться друг с другом в особых условиях; но так как соединение имеет место, то в самих атомах есть нечто, что удерживает их вместе, когда осуществляются те условия, о которых мы только что говорили. Сущность химии и заключается в изучении условий, при которых соединяются атомы.

Атомы притягиваются примерно так, как два магнита, обращенные друг к другу противоположными полюсами, или как электрические заряды противоположных знаков. Действительно, нет сомнения в том, что при этом действуют и электрические и магнитные силы притяжения. Мы уже знаем в настоящее время кое-что о характере действия этих сил, но в гораздо большей степени мы знакомы с законами соединения атомов; иначе говоря, нам лучше известны факты химии, чем силы притяжения, действующие между атомами. Это обстоятельство, однако, не должно нас смущать; пока достаточно помнить, что существуют силы, притягивающие атомы друг к другу.

Если существуют такие силы, то можно было бы задать себе вопрос: почему все атомы не соединятся в одно твердое тело? Каким образом существуют атомы, которые вовсе не соединяются со своими соседями? Что удерживает Землю от падения на Солнце и мешает окончательному соединению в одно твердое тело всей вселенной?

Земля не падает на Солнце потому, что она движется вокруг Солнца, или, точнее, потому, что оба небесных тела движутся друг около друга. Движение удерживает их вдали друг от друга; и если вдуматься в положение вещей, то можно понять, что движение играет первостепенную роль в природе: именно движение противодействует тем связывающим силам, которые стремятся соединить все атомы вместе.

В газе движение играет преобладающую роль — атомы движутся столь быстро, что не успевают вступать в какие-либо соединения друг с другом: иной раз атомы встречаются друг с другом, так сказать, безнадежно стремясь друг к другу, но скорости их так велики, что либо они не успевают войти в соприкосновение, либо, столкнувшись, отскакивают и в следующее мгновение уже находятся на большом расстоянии друг от друга. Даже в жидкостях, где между атомами существует более тесная и непрерыв-

ная связь, движение происходит так быстро, что никакая связь не может сохраняться постоянно.

В твердом теле относительное значение сил сцепления и движения претерпевает существенное изменение: силы сцепления настолько велики, что атомы и молекулы все время удерживаются на своих местах. Но и в твердых телах атомы не вполне неподвижны: они движутся и колеблются около некоторых средних положений, подобно тому, как колеблются части железного моста, когда по нему идет поезд.

Трудно даже представить себе, что атомы и молекулы тел, кажущихся нам совершенно неподвижными, например стол, кусок бумаги, вода в стакане, в действительности все движутся. Однако уже многие из старых мыслителей допускали этот факт. Например, английский физик семнадцатого века Гук¹ объясняет разницу между жидким и твердым состоянием следующим образом: он считает, что разница обусловлена движением атомов, которое более интенсивно у жидкостей, чем у твердых тел. Гук говорит:

Во-первых, что является причиной подвижности жидкости? Я думаю, что это не что иное, как резкое и непрерывное движение всех частей тела; части тела оказываются благодаря этому так слабо связанными друг с другом что они легко движутся во все стороны, и тело становится жидким. Чтобы несколько разъяснить это обстоятельство грубой аналогией, допустим, что блюдо с песком поставлено на какое-либо тело, покой которого сильно возмущается каким-нибудь быстрым и интенсивным колебательным движением. Например, пусть это будет быстро вращающийся мельничный жернов или же толстая кожа барабана, по которому быстро и сильно бьют палками. При таком опыте песок в блюде, бывший ранее совершенно спокойным, начинает приобретать свойства жидкости: нельзя более сделать в нем углубления пальцем без того, чтобы это углубление сейчас же не затянулось и внешняя его поверхность не выровнялась. Точно так же нельзя закопать в песок легкое тело, например кусок пробки: оно сейчас же «всплывает» на поверхность; наоборот, положенное на поверхность песка более тяжелое тело тотчас же закапывается в нем и попадает на дно сосуда. В боку сосуда нельзя сделать отверстия: песок высыпается из него до определенного уровня. Все новые свойства песка, аналогичные свойствам жидкости, появляются только потому, что сосуд, содержащий песок, быстро движется; ведь при этом каждая песчинка приобретает колебательное,

или «танцующее» движение, так что никакое более тяжелое тело не может лежать на песке, не будучи поддержано чем-либо иным; точно так же движущийся песок не потерпит под-собой никакого другого тела, если оно не тяжелее, чем он сам».

Этот опыт Гука можно повторить в несколько иной форме. Цилиндрический металлический ящик (шириной в 25 см и вышиной 7 см) расположен на площадке, под-

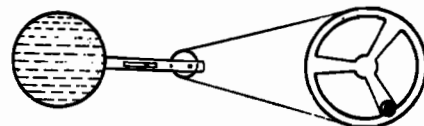


Рис. 3. Схема устройства центробежной машины для демонстрации опыта Гука.

держиваемой металлическими шариками и могущей легко двигаться. Экцентрическим шарниром площадка связана с колесом, как это показано на рис. 3 и 4. При быстром вращении колеса ящик с песком резко движется, как требует Гук. Детали устройства лучше всего понять, смотря на рисунок. Тяжелый металлический шар исчезает в песке мгновенно, а легкие предметы поднимаются на поверхность. Забавный эффект получается в том случае, если зарыть в песок фигурки с прикрепленными к ним внизу грузиками. Такие фигурки, очевидно, не могут лежать и, медленно поднимаясь из песка, высовывают наружу головы.

Мы знаем в настоящее время, что движение атомов какого-либо тела представляет в действительности запас его тепла: чем быстрее атомы тела движутся или колеблются, тем тело теплее. Когда мы греем руки у огня,

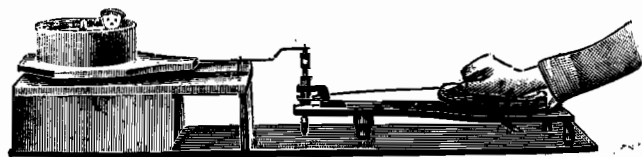


Рис. 4. Коллеблющаяся коробка с песком.

Цилиндрическая коробка находится на лево; легкая фигурка с грузом внизу высовывает голову из песка.

мы позволяем энергии, излучаемой огнем, ускорить движение атомов, из которых состоят наши руки. Охлаждая какое-либо вещество, мы замедляем эти движения. Если бы можно было прекратить тепловое движение атомов совершенно, мы понизили бы температуру до точки, ниже которой уже нельзя спуститься; это так называемый абсо-

¹ Из открытий, принадлежащих Гуку (1635—1722), наиболее замечателен его закон о пропорциональности напряжений и упругих изменений формы тел, вызываемых этими напряжениями. В настоящее время этот закон положен в основу математической теории упругости. Гуку принадлежит также большое количество различных усовершенствований и изобретений физических и технических приборов и механизмов.

лютный нуль, который по термометру Цельсия лежит на 273 градуса ниже нуля.

В попытках увидеть мельчайшие атомы, как я уже сказал, мы получили двух новых союзников в лице радиоактивности и лучей Рентгена. Они увеличили тонкость нашего зрения в десятки тысяч раз. Микроскоп сделал для нас все для него возможное, но мельчайшие предметы, которые еще можно рассмотреть в микроскоп, состоят из биллионов атомов. Дальнейшее усовершенствование линз микроскопа невозможно — техника уже достигла своего предела. Затруднение лежит в самой природе света, представляющего волновое движение; световые волны могут показать нам детали только тех предметов, которые больше длины световой волны. Нам нужен был новый свет с очень короткой длиной волны. Его мы имеем в рентгеновых лучах.

В то же время явления радиоактивности показали нам, что может сделать отдельный атом, если ему сообщить чудовищную скорость. Мы можем теперь наблюдать отдельный атом (хотя и косвенно) и обнаруживать, кроме того, и то, что он «совершает»: в первой задаче помощь оказывают лучи Рентгена, во второй — радиоактивность.

Я надеюсь объяснить вам, каким образом оба эти явления способствуют увеличению наших знаний, и начну с радиоактивности.

По своим размерам и массе атомы радия являются одними из наиболее тяжелых и крупных атомов. Совокупность таких атомов образует металлическое вещество, подобное железу или золоту. Сам по себе атом радия не имеет никаких особенных свойств, пока он остается самим собой, но внезапно, по неизвестной никому причине, наступает момент, когда атом радия взрывается. Маленькая часть его выбрасывается вон, как снаряд из орудия, остальная же часть атома отскакивает, как орудие при отдаче. Это остаток уже не представляет собой радия, это — меньший атом с совершенно иными свойствами. Радий превратился в новое вещество. Это новое вещество оказывается газом, а «снаряд» — атомом вещества, атомный вес которого один из самых низких в ряду атомных весов (второй по порядку); он называется гелием.

Никто не знает причин, вызывающих взрыв; точно так же нет способа вызвать этот взрыв или задержать его наступление. Атом радия способен взорваться в некоторый момент с совершенно одинаковыми шансами, будь он помещен в печь или погружен в жидкий воздух. Еще яснее

независимость момента распада атома радия от окружающих условий проявляется в том, что соединение радия с другими атомами несколько не влияет на вероятность взрыва.

В старину алхимики пытались найти способы превращать одни атомы в другие, преимущественно свинец в золото. В взрывах атомов радия имеет место то самое превращение, о котором мечтали алхимики. Но это не в точности то, чего они добивались.

Во-первых, это превращение не может быть вызвано и контролировано человеческой волей — последнее свойство радиоактивного распада является весьма замечательным, так как существует не очень много явлений, о которых можно было бы сказать то же самое. Даже в тех случаях, когда мы не можем понять явления, мы часто имеем возможность решить, произойдет оно или нет. Мы не можем понять, как произрастает семя, тем более не можем создать семя, способное к прорастанию, но мы можем запереть семена в амбаре и не позволить им расти сколько нам угодно. Взрыв же атома радия происходит совершенно независимо от наших действий или желаний.

Второе обстоятельство, которое идет вразрез с желаниями алхимиков, заключается в том, что превращение это не заканчивается золотом: оно заканчивается свинцом.

Продолжительность жизни газа, состоящего из атомов радия, потерявших по одному атому гелия, очень мала: средняя величина ее немного меньше четырех дней, тогда как средняя продолжительность жизни атома радия около двух тысяч лет. Второй взрыв превращает атом этого газа в новое вещество, называемое радием А, который в свою очередь может испустить новый атом гелия. Далее, происходит некоторая последовательность взрывов через различные средние промежутки времени, причем конечным продуктом распада оказывается свинец, а не золото. Резерфорд¹, открывший этот газ, назвал его «эманацией радия» (или радоном).

Вся последовательность превращений весьма замечательна, но я хотел бы обратить внимание на то, что происходит со снарядом, покидающим орудие.

Скорость, с которой этот снаряд вылетает, так велика,

¹ Резерфорд — современный английский физик, известный своими исследованиями в области строения атома.

что еще недавно считали невозможным, чтобы частица материи обладала такой большой скоростью.

Любопытно отметить, что во время полемики с Ньютоном¹ (Ньютон предполагал, что свет состоит из быстро движущихся частиц) Гюйгенс² указывал, что нельзя представить себе материальных частиц, которые двигались бы с такой же скоростью, с какой распространяется свет.

Сейчас нам известно, что существуют частицы, называемые электронами, также испускаемые радиоактивными веществами, скорости которых близки к скорости света. Второй аргумент Гюйгенса против теории Ньютона также оказался неверным в свете радиоактивных явлений. Он говорил, что с точки зрения теории Ньютона два человека не могли бы смотреть друг другу в глаза, так как частицы, сталкиваясь между собой, падали бы на землю. Мы скоро увидим, что и этот аргумент неверен.

Скорость, с которой атом гелия начинает свой полет, равна примерно 16 000 километров в секунду. В течение промежутка времени меньше минуты он мог бы достичь Луны и вернуться обратно, если бы скорость его не уменьшалась; но в действительности, несмотря на всю его начальную скорость и энергию, такой атом никогда не может залететь далеко, если он должен пройти через какую-либо материальную среду. Даже в том случае, когда путь его заканчивается в воздухе, скорость его падает до самой обычной величины, после того как он пройдет путь в пять-семь сантиметров. Путь этот обычно строго прямой, как мы увидим это на опыте. Это обстоятельство имеет существенное значение и на него следует обратить большое внимание.

На первый взгляд даже не видно, почему так важно, что путь нашего атома гелия прямой: можно подумать о пуле, простреливающей цилиндрическое отверстие в

куске дерева или же о пуле, пролетающей по прямой в воздухе. Но сравнение такое неверно. Пуля представляет массу из свинца, неизмеримо более тяжелую, чем встречные молекулы воздуха, которые она поэтому просто отбрасывает в стороны. Но атом гелия меньше и легче молекул азота и кислорода, из которых состоит воздух; поэтому нужно искать более подходящую аналогию.

Пусть на бильярде лежит некоторое количество шаров, которые изображают молекулы воздуха. Картина была бы точнее, если бы шары двигались, но это не играет особой роли. Теперь пустим через наш бильярд шар, целясь в подушку на противоположной стороне; посмотрим, что произойдет, когда пущенный нами шар будет пытаться пройти через кучу шаров на бильярде. Наталкиваясь на один из шаров, наш шар отскочит в сторону; после ряда последовательных столкновений шар наш потеряет всякие следы своего первоначального направления. Если попробовать пустить шар со всей возможной силой, то все же он не сохранит своего первоначального прямого направления, даже приблизительно. Какова бы ни была величина начальной скорости, все равно прямолинейный путь не может осуществиться.

Эта картина или модель гораздо более соответствует действительным условиям полета атома гелия, чем картина летящей пули. Атом гелия встречает на своем прямолинейном пути колоссальное количество молекул воздуха, которые расположены гораздо гуще, чем можно изобразить шарами на бильярде. Можно рассчитать, сколько молекул воздуха (кислорода и азота) было бы пронизано прямой линией в семь сантиметров длиной, проведенной внезапно в воздухе; результат выразился бы сотнями тысяч.

Как может атом гелия проскочить по прямой линии через это множество атомов, каждый из которых тяжелее атома гелия? Однако это так, и нам нужно найти какое-либо объяснение этому факту.

Можно было бы, пожалуй, думать, что прямолинейность пути только кажущаяся, что если бы мы могли рассмотреть путь достаточно детально, то мы обнаружили бы множество зигзагов, получающихся при обходе нашим атомом всех встречных молекул. Но уже короткое размышление покажет всю нелепость такой мысли: чтобы вновь находить раз потерянное направление, атом должен был бы обладать разумом живого существа. Если бы мы дали ребенку мелкую монету, указав ему на кондитерскую на противо-

217
1897

положной стороне оживленной улицы, то он, конечно, сохранил бы указанное ему прямое направление, хотя ему пришлось бы обходить людей и экипажи при переходе через улицу. Но ничего подобного нельзя себе представить относительно атома гелия.

Существует лишь одна возможность для объяснения прямолинейного пути: мы должны допустить, что атом гелия проходит через молекулы, с которыми он встречается; именно его громадная скорость каким-то образом дает ему возможность это сделать. Мысль эта очень странна, но иного объяснения нельзя найти. Оказывается, что допущение это позволяет объяснить и ряд других фактов. Это именно и дает уверенность, что выбранное объяснение правильно.

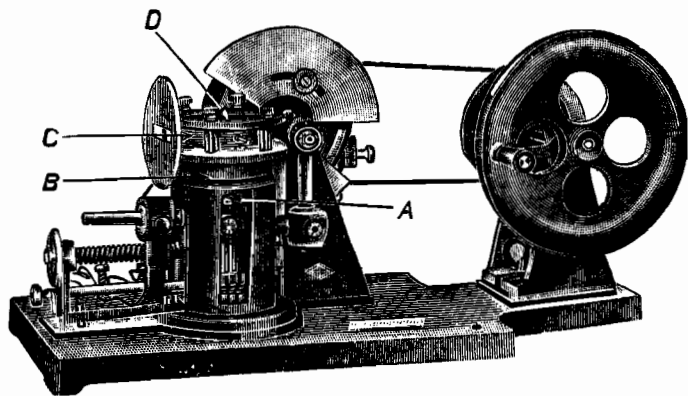


Рис. 5. Прибор для демонстрации путей атомов гелия, выброшенных радием.

Этот эффект может быть продемонстрирован с помощью остроумно устроенного прибора, дающего возможность получить живую картину происходящего. Опыт этот, по моему мнению, один из самых замечательных в мировой науке. Мы увидим действительные пути отдельных атомов гелия, каждый из которых начинает свой пробег со скоростью в 16 000 километров в секунду и заканчивает его, пройдя лишь около семи сантиметров воздуха. Но нам следует объяснить сперва способ действия прибора; в нем есть ряд гениальных подробностей.

Прибор этот изображен на рис. 5. Он состоит из цилиндрического латунного ящика *A*, скрытого под кожухом *B* со стеклянными крышкой и стенкой *C* наверху.

Отдельно эта деталь схематически изображена на рис. 6. Дно ящика *PP* может подниматься или опускаться, изменяя его глубину. Механизм, состоящий из ряда колес, шатунов и рычагов, показанный на рис. 5, дает возможность внезапно опускать дно ящика через необходимые промежутки времени. Когда это происходит, воздух или иной газ, наполняющий ящик, охлаждается вследствие внезапного расширения. Впоследствии мы остановимся подробнее на явлениях подобного рода. Внутри ящика, на соответствующей подставке, прикрепленной к боковой стенке, расположено ничтожное количество радия. В каждое мгновение некоторые из атомов радия распадаются и выбрасывают атомы гелия, часть которых летит по прямым путям внутри ящика. Диаметр ящика достаточно велик, чтобы позволить атомам гелия закончить свои пути внутри его (в воздухе). Средняя продолжительность жизни радия так велика, что даже если бы прибор существовал две тысячи лет, то и тогда половина пятнышка радия еще оставалась бы. Однако каждую секунду десять, двадцать или сто атомов разрушаются, выбрасывая атомы гелия. Это, пожалуй, наилучшее наглядное доказательство того, как много атомов сосредоточено в малом объеме.

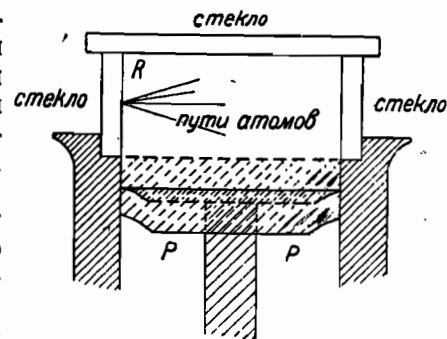


Рис. 6. Разрез камеры прибора, изображенного на рис. 5.

Воздух в камере поддерживается сырым, поэтому охлаждение, возникающее вследствие расширения, способствует возникновению тумана. Образование тумана заключается в том, что «переохлажденный» водяной пар осаждается (конденсируется) в виде мельчайших капелек на «взвешенных» в воздухе твердых частицах, так называемых центрах конденсации. В нашей атмосфере роль таких центров играют мелкие пылинки. Но более всего пары воды склонны осаждаться на тех атомах, через которые прошли атомы гелия. Причина этого заключается в том, что такие атомы временно повреждены атомом гелия; малая часть их вырвана из них вовсе.

Эта вырванная часть представляет собою то, что мы называем электроном; он заряжен отрицательным электричеством, и поэтому атом, потерявший электрон, оказывается заряженным положительно. Рано или поздно вырванный электрон прилипает к одному из соседних атомов; следовательно, таким образом возникают два заряженных атома (один положительный, другой отрицательный) в том месте, где ранее были электрически нейтральные атомы. Заряженные атомы особенно сильно привлекают влагу, и на них туман образуется предпочтительнее всего. Поэтому при внезапном расширении и охлаждении воздуха вдоль пути атома гелия, оставившего после себя след из заряженных атомов, образуется туман. Камера освещается очень ярким светом, так что можно непосредственно наблюдать туманные пути в виде ярких прямых линий на темном фоне зачерненного дна камеры. Фотографии наблюдаемой картины даны на рис. 7 и 8. Эти линии видны в те-

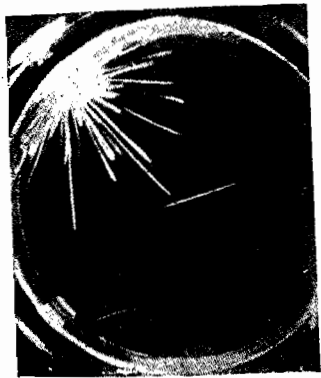


Рис. 7. Пути атомов гелия, наблюдаемые в приборе.

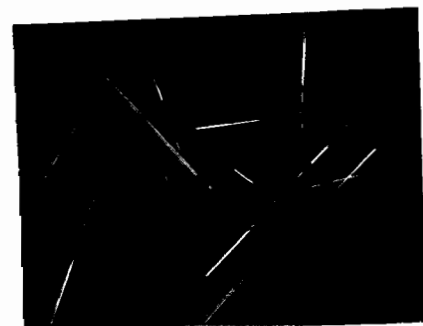


Рис. 8. Пути атомов гелия, наблюдаемые в приборе.

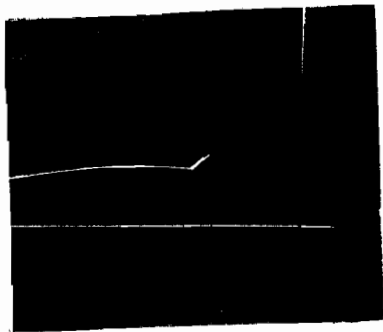


Рис. 9. Отклонение от прямолинейности в конце пути атома гелия.

чение нескольких секунд, а затем частицы тумана медленно рассеиваются. Линия оказывается резкой и ясной, если атом гелия совершил свой путь непосредственно перед образованием тумана, так как в этом случае у заряженных

атомов не было времени разойтись в стороны. Но если путь пройден заранее, до расширения, то линия тумана оказывается более размытой. Несколько таких размытых линий видно на рис. 8. Следует помнить, что атомы гелия выбрасываются непрерывно, ночью и днем; но только тогда, когда произведено расширение камеры, можно видеть их пути.

Рассматривая фотографии в лупу, мы увидим, что хотя пути и являются прямыми на значительной части своего протяжения, они очень часто претерпевают резкие отклонения и преимущественно в конце путей. Такая увеличенная фотография показана на рис. 9. Это замечательно: явление оказывается в высокой степени важным, и мы теперь же остановимся на нем.

Попытаемся представить себе, в каком направлении нужно изменить наше первоначальное представление об атоме, чтобы объяснить явления, которые мы сейчас видим. Атомы должны быть устроены так, чтобы при обычных их встречах, какие имеют место, например, при столкновении молекул кислорода в атмосфере, каждый атом занимал строго ограниченную область, в которую другой атом не может проникнуть. Но в случае, когда один атом — атом гелия в нашем опыте — брошен на другие с достаточной скоростью, он может пронизывать их, как будто загородки на границах атомов сломаны.

Удовлетворительное объяснение этому явлению мы дадим, если будем считать, что каждый атом подобен миниатюрной солнечной системе. В центре атома есть ядро, соответствующее солнцу; вокруг ядра движутся спутники или планеты, которые мы именуем электронами. Ядро заряжено положительным электричеством; каждый электрон заряжен отрицательно и все электроны совершенно одинаковы. Положительный заряд ядра как раз достаточен для того, чтобы компенсировать общий отрицательный заряд всех электронов. Все электроны вращаются вокруг ядер, как планеты вокруг солнца.

Таким образом вместо твердого шара определенного объема, которым мы изображали атом в нашей первой грубой картине, мы имеем нечто вроде маленькой солнечной системы. Это позволяет сразу представить себе, как атом такого рода может пройти через другой атом; совершенно так же одна солнечная система могла бы пройти через другую без всяких повреждений для обеих, лишь бы только не было прямых столкновений между телами обеих систем

и лишь бы скорость движения была достаточно велика. Последнее условие совершенно необходимо, так как если бы одна система была достаточно долгое время внутри другой или [вблизи ее, то, несомненно, возникли бы серьезные возмущения в движении планет.

Теперь мы можем спросить себя: как атом может удерживать другой атом вне своих границ при обычных столкновениях, если он устроен так, как мы только что описали? Как может атом сохранять для себя некоторую часть пространства, не позволяя другому атому войти в нее, если только скорость при встрече невелика? Причина этого

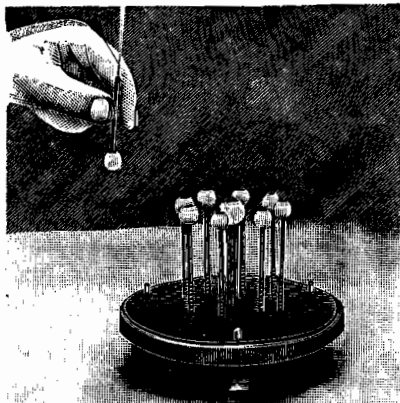


Рис. 10. Прямые магниты на пружинах.

совершенно ясна, если рассмотреть особое расположение положительных и отрицательных зарядов в атоме. Каждый атом окружен оболочкой из электронов, и когда два атома сталкиваются, то именно эти электронные оболочки сближаются прежде всего. Так как одинаковые заряды отталкиваются, то между атомами действует при этом сила, противодействующая их сближению: другими словами, они противодействуют взаимному проникновению их собственных частей.

Это, конечно, очень грубая картина того, что в действительности имеет место; характер этих противодействующих сил в действительности очень трудно объяснить такой простой гипотезой. Но общий характер объяснения, несомненно, верен.

Когда же два атома приближаются друг к другу с большой скоростью, система ядра и электронов одного из них проскальзывает через систему другого атома.

Следующая модель поможет нам уяснить себе это обстоятельство. На рис. 10 изображен ряд стержневых магнитов, укрепленных стоймя на спиральных пружинах. Вершина внутреннего магнита является северным полюсом, тогда как наружные магниты обращены вверх южными полюсами. Модель в грубом виде представляет ядро окруженное

совершенно ясна, если рассмотреть особое расположение положительных и отрицательных зарядов в атоме. Каждый атом окружен оболочкой из электронов, и когда два атома сталкиваются, то именно эти электронные оболочки сближаются прежде всего. Так как одинаковые заряды отталкиваются, то между атомами действует при этом сила, противодействующая их сближению: другими словами, они противодействуют взаимному проникновению их собственных частей.

кольцом из электронов. В нашей модели все расположено в одной плоскости; в настоящем атоме это не так, но это для нас не играет роли. Над нашей моделью, как раз над центральным магнитом, подвешен на длинной нити отдельный магнит южным полюсом вниз. Длина нити должна быть такова, чтобы качающийся магнит как раз касался магнитов модели. Отклоним качающийся магнит в сторону, как схематически показано на рис. 11, а, но не очень далеко; он будет двигаться по направлению ко всей системе но не может проникнуть внутрь нее. Он как будто стучится в двери в разных местах, но каждый раз отскакивает назад. Со-



Рис. 11. Пути подвешенного магнита (см. рис. 10) при различных начальных скоростях.

вершенно также и электроны напрасно пытаются проникнуть через наружные границы атома, если только они не ударяют достаточно сильно. Можно заменить один качающийся магнит системой, подобной нашей системе укрепленных магнитов, — результат опыта несколько не изменится. Мы имеем здесь картину наших атомов, сталкивающихся между собою и отскакивающих назад; каждый занимает определенную часть пространства и не допускает проникновения в нее других атомов.

Но если колеблющийся магнит отклонен достаточно далеко так, что он получает большую, чем прежде, скорость, то он пройдет через систему магнитов насквозь. При этом, если, скорость его очень велика, не произойдет значительного изменения движения магнита (рис. 11, с); при меньших же скоростях происходят значительные

изменения (рис. 11, б). При этом движение магнита сильно замедляется, часто резко изменяется направление его движения, а магниты нашей системы начинают колебаться, так как магнит *S*, прошедший мимо них, отталкивается от них и выводит их из положения равновесия. Это происходит независимо от того, каким полюсом наш качающийся магнит обращен вниз; тот же эффект имел бы место и при замене одного магнита целой системой из центрального «ядра» и спутников.

Поведение этой модели позволяет нам разобраться в том, что происходит, когда атомы описанного типа проходят один через другой. При сближении их с умеренной скоростью они отскакивают друг от друга; при больших скоростях они пронизывают друг друга, причем чем больше скорость, тем больше вероятность прохождения без всяких видимых последствий. Но всегда есть некоторые шансы, что ядро движущегося атома пройдет так близко от ядра другого атома, что произойдет заметное отклонение. Чем меньше ядра атомов, тем меньше вероятность этого события.

Вы, конечно, уже сообразили, что вы видели подобное отклонение на рис. 9, представляющем собою увеличенное изображение одного из кажущихся совершенно прямыми путей рис. 7. Большой частью бывает не более одного или двух изломов на каждом пути, причем они встречаются преимущественно в конце. Это и понятно, так как скорость в конце пути становится меньше. В конце почти всех путей есть такие отклонения, и при увеличении снятых с них фотографий их нетрудно обнаружить. Мы видим, что наше новое представление об атомной структуре объясняет удовлетворительно все явления.

Трудно представить себе атомы, простейшие частицы, из которых состоят все наши тела, столь же «пустыми», как солнечную систему: мы имеем не твердое, круглое, совершенно непроницаемое тело, а ажурную комбинацию из ядра и электронов, которые занимают лишь небольшую часть всего объема атома.

Фотографии, подобные воспроизведенным на рис. 7 и 8, удается получить только в результате многократных опытов. При каждом расширении присутствуют изломы путей, но приходится сплошь и рядом долго ждать, пока не удастся увидеть достаточно резкий излом. Прекрасная фотография, воспроизведенная на рис. 12, была получена следующим образом: камера была наполнена вместо воздуха гелием. Ядро летящего атома гелия, проходя через

один из атомов гелия, принадлежащих к газу, совершило прямой удар в ядро атома газа: игрок на бильярде сравнил бы это со столкновением бильiardных шаров. Как показывает фотография, оба атома разлетелись в разные стороны и при этом двигались с неодинаковыми скоростями, так как за одинаковое время образовали дорожки из тумана различной длины. Если присмотреться к рис. 9, то можно заметить в конце последнего участка пути атома гелия маленький отросток. Это значит, что атом азота или кислорода, отклонив атом гелия, сам отскочил в результате столкновения. Пробег его очень короток, так как масса отскочившего атома значительно более массы ударившего атома, следовательно, приобретенная скорость относительно мала.

На некоторых фотографиях есть одна занятная особенность, которую нетрудно объяснить. На некоторых из туманных путей есть перерывы, как будто туман не образовался в этих местах. Это действительно так: в этих местах нет влаги, так как здесь прошел несколько раньше атом гелия, и вся влага по соседству с таким местом была использована на образование тумана на другом пути. На рис. 8 показаны пути, возникшие при распаде эманации радия. Они начинаются во всех концах камеры, так как эманация в виде газа заполняет всю камеру.

Второй возникающий вопрос относится к числу электронов-спутников, имеющих в каждом атоме. В этом вопросе мы сталкиваемся с замечательнейшей особенностью новых открытий:

Нет надобности объяснять подробно, как эта особенность была открыта; мы удовольствуемся простым описанием.

Мы знаем в настоящее время, что ядро атома заряжено положительным электричеством, причем величина заряда как раз достаточна для того, чтобы нейтрализовать отрицательные заряды электронов. Как мы видели, все электроны совершенно одинаковы. Оказывается, что различные атомы могут удерживать различное число электронов, и знание этого числа совершенно достаточно для определения свойств атома.

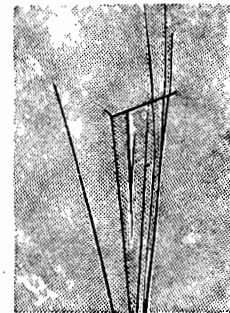


Рис. 12. Пути атомов гелия в камере, наполненной гелием.

Например, атом углерода может удержать шесть электронов; положительный заряд атома углерода равен по величине шести элементарным отрицательным зарядам. Всякий атом, могущий удержать шесть электронов, оказывается атомом углерода; другого определения атома углерода не нужно. Атом с семью электронами — это атом азота, а восьмиелектронный атом — кислород. В природе существуют атомы, начиная с одноэлектронного атома водорода и кончая атомом с девяносто двумя электронами — атомом урана.

Чрезвычайно странно, что бесконечное разнообразие природы можно свести к ряду целых чисел. Одно время казалось, что разнообразие различных сортов атомов объясняется более сложно; обнаружение столь простого отличия между различными атомами кажется весьма удивительным. Наиболее постоянным свойством каждого атома является величина положительного заряда его ядра. Именно эта величина опреде-

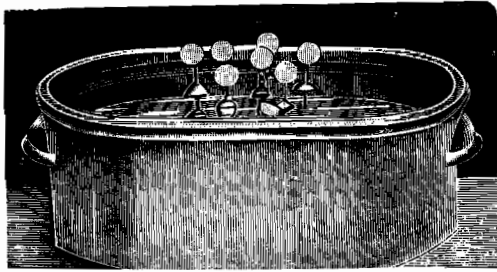


Рис. 13. Плавающие магниты.

Если число плавающих магнитов невелико, они располагаются в одно кольцо, если же число их возрастает, они образуют концентрические кольца.

каждом отдельном случае и действующих при этом сил, весьма сложны; мы не будем останавливаться на этих вопросах и ограничимся лишь их беглым обзором.

Прежде всего интересно посмотреть, как расположатся маленькие вертикальные магниты, плавающие в миске (рис. 13). Снизу к ним приделаны поплавки, выкрашенные в черную краску, а сверху — легкие белые шарики, чтобы они были лучше видны. Магнитики обращены вверх одинаковыми полюсами и потому они взаимно отталкиваются и уплывают к краям сосуда. Но под миской помещен электромагнит. Когда он начинает действовать, он собирает все маленькие магниты вместе. Их окончательное расположение обуславливается, с одной стороны, притяжением к центру

(где расположен электромагнит), с другой стороны, — их взаимным отталкиванием. Нечто подобное должно иметь место в атоме, но не следует продолжать эту аналогию чересчур далеко, так как возможно, что действующие в атоме силы совсем иного характера, чем те, что действуют в нашей модели. Мы должны удовольствоваться тем фактом, что когда плавающих магнитиков мало, они группируются все в одно кольцо, но при увеличении числа их они располагаются в ряд концентрических колец. Занятно наблюдать, как добавочный магнитик, помещенный у края сосуда, плывет к своему окончательному месту.

Подобное же разделение на концентрические слои или оболочки имеет место при распределении электронов вокруг положительного ядра атома. Этот вопрос мы рассмотрим в дальнейшем более подробно. Опыт не доказывает существования такого распределения электронов, но во всяком случае подсказывает его.

Мы можем теперь более отчетливо разобратся в том, что происходит, когда атом гелия разрушает атомы, через которые он проходит. Действительно, каждый атом может

потерять один из окружающих ядро электронов. Потеряв один электрон, атом более энергично противодействует потере второго электрона и тем более потере третьего. Совершая свой путь, атом гелия вырывает у одного атома за другим их спутников, причем освобожденные электроны начинают двигаться самостоятельно. Но самостоятельная жизнь электрона весьма коротка — он скоро присоединяется к другому атому. Атом, потерявший электрон, оказывается теперь заряженным положительно; атом, приобревший электрон, заряжен отрицательно. Оба атома восстановили бы прежнее состояние, если бы они сошлись достаточно близко и при встрече нейтрализовались бы.

Существует прекрасный опыт, описанием которого мы и закончим эту главу. Ударяясь в некоторые вещества, атомы гелия вызывают в этих веществах флюоресценцию (свече-



Рис. 14. Свечение кристаллов в трубочке, наполненной эманацией радия.

ние). Когда мы наблюдаем это явление под микроскопом, мы видим ряд мелких вспышек, возникающих при ударах отдельных атомов; под микроскопом явление имеет такой вид, как будто мы бросаем камешки в фосфоресцирующее море. Стеклоянная трубка содержит кристаллы, флюоресцирующие под ударами быстро движущихся атомов гелия. Кристаллы эти — кунцит, сернистый цинк (цинковая обманка) и веллемит (природный силикат цинка).

В другой трубке имеется некоторое количество эманации радия — газа, который, как вы помните, является прямым потомком самого радия. Если выпустить эманацию в трубку с кристаллами, то последние начинают светиться ярким светом (рис. 14). При получении нашего рисунка кристаллы не освещались извне, а фотографировались в собственном свете флюоресценции.

Мы видим, что действие радия дало удивительную возможность проникнуть в структуру атома. Всякий изучающий науку, уже давно освоился с существованием различных атомов и с их свойствами; но он никогда не видел ни отдельного атома, ни его действий. Он всегда встречался лишь с совокупностью атомов. Когда химик производит реакцию с различными элементами, он всегда имеет дело с огромным числом атомов. Но в радиоактивных явлениях мы видим действие лишь одного атома. Скорость нашего гелиевого снаряда, вылетающего из распадающегося атома радия, в сотни тысяч раз превышающая обычные скорости атомов в газе, дает отдельному атому возможность проявить себя непосредственно. Следя за туманными дорожками атомов, мы видим движение отдельных атомов. Мы видим нечто такое, что наполнило бы сердца первых защитников атомной теории удивлением и радостью. Когда, например, атом гелия проходил через атом кислорода, оба атома несли следы своей встречи. Мы использовали их для исследования строения атомов.

ЛЕКЦИЯ ВТОРАЯ

О ПРИРОДЕ ГАЗОВ

Соединение атомов в молекулы. Инертные атомы. Тепловое движение газовых молекул. Смесь газов. Распространение звука. Диффузия и теплопроводность. Атмосферное давление. Еще о строении атомов.

Мы видели, что все вещества состоят из атомов, которых насчитывается около девяносто различных сортов, воплощающих в себе все тайны и все бесконечное многообразие материального мира. В каждом из атомов имеется положительно заряженное ядро; вокруг него расположены электроны, представляющие собой элементарные (простейшие, наименьшие) частицы отрицательного электричества.

Положительный заряд ядра является целым кратным некоторого заряда, равного заряду электрона, но противоположного ему по знаку.

Число электронов, принадлежащих к какому-либо «нормальному» атому, в точности равно числу элементарных зарядов ядра. Таким образом атом в целом не обладает электрическим зарядом: положительный заряд ядра полностью компенсируется отрицательными зарядами окружающих его электронов.

Для нас в настоящий момент не представляет интереса вопрос о том, вращаются ли электроны вокруг центрального ядра, подобно планетам вокруг солнца, или их движение имеет какой-либо иной, еще более сложный характер. Дело в том, что важнейшие следствия, вытекающие из такого представления об устройстве атомов, могут быть получены и без изучения всех возможных движений электронов вокруг ядра.

Одним из таких следствий является, например, утверждение, что атомы в нормальных условиях непроницаемы друг для друга. Действительно, каждый из них обладает наружной оболочкой, состоящей из электронов, при сближении двух атомов возникает сила, обусловленная взаим-

ным отталкиванием электронных оболочек и вследствие этого препятствующая их слишком тесному сближению. Однако в том случае, когда два атома несутся навстречу друг другу с достаточно большой скоростью, наружная «защита» может не устоять, и один атом проникает во внутреннее «владения» другого. После того, как это произойдет, они могут оторваться друг от друга и продолжать далее свой путь таким образом, как если бы они совсем не встречались; один из них или оба вместе могут при этом потерять пару электронов, но такая потеря скоро возмещается.

Только в том случае, когда ядро одного атома приблизится на достаточно близкое расстояние к ядру другого, в их движении произойдет изменение, аналогичное тому, какое имеет место при столкновении двух шаров. Такого рода изменения случаются столь редко и требуют столь тесного сближения, что мы вынуждены приписать атомным ядрам чрезвычайной малые размеры.

В первой главе было указано, что для демонстрации описанных здесь явлений весьма полезными оказываются действия, вызываемые радием и прочими радиоактивными веществами. Эти явления имеют для нас огромное значение, так как именно они приводят к представлению об атоме, как о некотором подобии солнечной системы. Во всех случаях обыкновенного взаимодействия атомов последние непроницаемы друг для друга, так как обычно обладают слишком малыми скоростями.

Диаметр области, занимаемой одним атомом и недоступной для всех остальных, не превышает одной пятидесятиллионной доли сантиметра (2×10^{-8} см); внутри этого тесного пространства, которое можно назвать объемом соответствующего атома, и происходит движение ядра и электронов относительно друг друга. Легкие атомы занимают меньше пространства, более тяжелые — несколько больше. Объем наиболее тяжелых атомов приблизительно раза в три-четыре превышает объем самых легких.

Я уже сказал, что все атомы находятся в движении и что всюду и везде имеет место постоянное соревнование между некоторой силой притяжения, — которая при отсутствии всякого противодействия собрала бы все атомы вместе, и их непрерывным движением, стремящимся сделать атомы независимыми друг от друга.

Существование силы притяжения, которой мы приписываем такую важную роль, несовместимо с нашим пред-

ставлением о строении атомов, так как мы предполагаем, что внешние электронные оболочки препятствуют слишком тесному их сближению. Все затруднение заключается в том, что несомненно правильны обе точки зрения. И, конечно, только наше незнание природы этих сил не позволяет устранить это кажущееся противоречие.

Мы видели, каким образом два атома, приближающиеся с большими скоростями, могут пронизать друг друга, между тем, как при малых скоростях они отскакивают друг от друга подобно двум бильiardным шарам.

Пойдем дальше и покажем, как при очень медленном сближении атомы могут примкнуть друг к другу. Вам, наверно, приходилось где-нибудь видеть дверь на двойных пружинных петлях, которые позволяют открывать ее в разные стороны, и заставляют ее закрываться независимо от того, в которую сторону вы прошли. Если вы сообщите ей сильный толчок, то она будет некоторое время колебаться взад и вперед. Но скоро размах колебаний становится меньше, пружинная щеколда, позволяющая ей открываться в обе стороны, успевает попасть на свое место, дверь с треском закрывается и движение внезапно прекращается.

Мы стоим перед объяснением совершенно аналогичного явления. При встрече двух атомов отталкивание электронных оболочек обычно заставляет их отскочить друг от друга. Но если движение происходит медленно и благодаря этому атомы достаточно долго находятся в соседстве друг с другом, то этого промежутка времени достаточно для того, чтобы внутри них произошло нечто, похожее на защелкивание щеколды, в результате чего оба атома соединяются друг с другом.

Особенности строения атомов обычно обуславливают такое распределение электронов во внешней оболочке, которое при сближении двух таких оболочек вызывает их взаимное отталкивание. Но последнее превращается в притяжение в том случае, когда в распоряжении взаимодействующих атомов имеется достаточный промежуток времени для того, чтобы могло произойти необходимое внутреннее переустройство («защелкивание щеколды»), или если сближение атомов с самого начала происходило по определенному пути, благоприятствующему их соединению. Дальше мы увидим несколько весьма интересных примеров описанного здесь явления.

Сейчас мы рассмотрим тот случай, когда силы притяжения совершенно не проявляются вследствие ли недостатка

времени, или малой их величины, или по какой-либо другой причине. Совокупность атомов представляет собой в этом случае газ.

Подобные случаи весьма многочисленны. В частности, замечательный пример такого рода представляют атомы № 2, 10, 18, 36, 54, 86, т. е. атомы, у которых величины положительных зарядов ядер выражаются написанными здесь числами. В нормальных условиях эти атомы обладают таким же количеством внешних отрицательных электронов. Они совершенно не стремятся соединиться друг с другом и не вступают в соединения с атомами других сортов, иначе говоря, они не образуют химических соединений. Мы назовем их инертными атомами.

Эти атомы не принимают заметного участия в большинстве явлений и поэтому до самого последнего времени их существование оставалось незамеченным. Только особо тщательное измерение веса азота, полученного из различных источников, произведенное Рэли, дало возможность заметить малое, но неоспоримое расхождение между плотностью азота, приготовленного путем разложения одного известного азотистого соединения и плотностью остатка, полученного после удаления из воздуха всех известных тогда газов, кроме азота. Согласно взглядам того времени, когда производился опыт, этот остаток должен был быть чистым азотом. На самом же деле атмосферный азот содержит малую долю одного из инертных газов, а именно, № 18, ядро которого имеет восемнадцать единиц положительного электричества.

Таким образом чрезвычайно точные измерения привели к открытию нового вещества, дотоле неизвестного. Оно было названо аргоном, что значит «недеятельный». Однако это имя выбрано не совсем удачно: атом аргона столь же подвижен, как и всякий другой его собрат, имеющий такие же размеры. На 10 кг воздуха приходится приблизительно 5 г аргона. Такое его количество, хотя и относительно малое, легко было бы обнаружено с помощью чувствительных методов аналитической химии, если бы только аргон проявлял хотя бы малейшую склонность к образованию какого-либо химического соединения.

Атом гелия, самый маленький из всей серии, тождествен с тем атомом, который выбрасывается радием и другими радиоактивными веществами при их распаде. Нормальный атом гелия имеет два электрона, но, вылетая

из радия (или другого радиоактивного вещества) и пролетая через материю, он их теряет на некоторое время.

Перипетии, переживаемые атомом гелия при радиоактивном распаде, совершенно не отражаются на положительном заряде ядра, и поэтому, потеряв скорость, сообщенную ему при вылете из радиоактивного вещества, атом гелия быстро приобретает недостающие ему два электрона: для этого всегда имеется достаточное количество свободных электронов. Перейдя в нормальное состояние, атом опять начинает вести свойственное ему спокойное и независимое существование.

По всей вероятности, большая часть гелия, находящегося в природе, была выброшена атом за атомом радиоактивными веществами. Во всяком случае гелий находят в таких местах, где несомненно, происходили радиоактивные превращения. В настоящее время его добывают в больших количествах в Северо-американских соединенных штатах и в Канаде, где он выбивается на поверхность из подземных источников.

Гелий применяют для наполнения дирижаблей, так как многие его свойства делают его наиболее пригодным для этой цели. Гелий легок, и его подъемная сила почти не уступает подъемной силе водорода, атомы которого имеют по одному электрону. Атомный вес возрастает вместе с увеличением числа электронов. Мы должны помнить, что подъемная сила газа зависит не от его плотности, но от разности между плотностями воздуха и газа. Плотности водорода, гелия и воздуха относятся друг к другу, как 1:2:14,4 следовательно, подъемные силы водорода и гелия относятся, как 13,4:12,4.

Главное достоинство гелия заключается в его невоспламеняемости. Водородный атом весьма активен, охотно вступает в химические соединения и обладает особенно большим сродством к кислороду: достаточно пропустить искру через смесь этих двух газов, чтобы вызвать их соединение, сопровождаемое взрывом и вспышкой пламени. Поэтому дирижабль, наполненный водородом, может легко погибнуть; гелий же не поддается никаким изменениям, вследствие чего отсутствует возможность подобной катастрофы. Свое название этот газ получил потому, что впервые он был обнаружен на солнце: широкая линия солнечного спектра не могла быть отождествлена ни с одной из линий известных земных элементов, поэтому неизвестному веществу, которому эта линия принадлежала,

было дано название «гелия» или «солнечного вещества». Гораздо позже было обнаружено, что гелий является одним из членов семейства инертных (или благородных) газов, открытого Рэли и Рамзаем в результате опытов Рэли с атмосферным азотом.

К этому же семейству, кроме аргона, о котором была речь, принадлежит неон — «новый», обладающий десятью внешними электронами. Он является гораздо более редким газом, чем аргон. Главная его особенность заключается в способности ярко светиться под действием электрического разряда, и поэтому он нашел в последнее время применение в неоновых электрических лампочках, дающих красновато-оранжевое свечение.

Далее следуют криптон (№ 36) — «скрытый» и ксенон (№ 54) — «чужой». Они весьма редки. Наконец, эманация радия или радон — последний из семейства инертных газов, в нормальном состоянии обладающий восьмидесятью шестью электронами, представляет собой тяжелый обломок, получающийся при распаде атома радия. Подобно своим собратьям он стремится к независимому существованию, и, таким образом, распадающийся радий превращается в смесь двух инертных газов — гелия и эманации радия.

На некоторых из наших фотографий (рис. 7—9) легко заметить пути атомов, берущие начало в середине камеры: они вызваны разрушением атомов этого тяжелого газа, который также является радиоактивным. Средняя продолжительность его жизни — только три с половиной дня.

Мы не должны предполагать, что инертные атомы ни при каких условиях неспособны ассоциироваться (соединяться) друг с другом. С помощью очень низкой температуры их можно заставить сцепиться между собой и превратить в жидкость. При обыкновенной же температуре все они являются газами. Сжижение гелия представляет одно из главных достижений лаборатории Камерлинг-Оннеса в Лейдене (Голландия)¹, где получение самых

¹ Лаборатория Камерлинг-Оннеса занимается изучением свойств тел при очень низких температурах. В ней достигнуты сейчас такие низкие температуры, которые никому пока еще не удалось осуществить. Самая низкая температура, полученная в этой лаборатории, — 272°. В лаборатории произведен ряд замечательных исследований над свойствами тел при низких температурах.

За свои работы Камерлинг-Оннес (1853—1926) получил в 1913 г. Нобелевскую премию по физике, являющуюся высшей международной наградой.

низких температур доведено до высокой степени совершенства.

Существуют, однако, газы — водород, азот, кислород и другие, атомы которых соединяются в маленькие группы, называемые молекулами; последние совершенно не обладают сродством к молекулам того же сорта, в некоторых случаях они не ассоциируются и с другими частицами: например, с атомами гелия и аргона. Два атома водорода образуют весьма устойчивую и инертную молекулу; то же самое происходит с двумя атомами азота или кислорода. Во всех этих случаях вещество при обыкновенной температуре обладает свойствами газа.

Воздух представляет собой, главным образом, смесь кислородных и азотных молекул. Примеры других хорошо известных газовых молекул представляют окись углерода (CO), двуокись углерода (CO₂), метан (CH₄) и т. д. Во всех этих случаях при столкновении двух молекул, летящих со скоростями, соответствующими обыкновенной температуре, они отскакивают друг от друга и продолжают вести свое независимое существование. Рассмотрим те следствия, которые, как следовало бы ожидать, вытекают из этого представления о независимых газовых частицах.

Представим себе закрытый сосуд, содержащий газ, т. е. некоторое количество движущихся внутри него атомов или молекул. Последние непрерывно сталкиваются друг с другом и со стенками сосуда и ведут себя подобно множеству бильярдных шаров, катающихся по столу, с той только разницей, что молекулы газа не испытывают трения и поэтому скорость их от столкновения до столкновения остается постоянной.

В дальнейшем мы иногда будем иллюстрировать движение газовых молекул движением бильярдных шаров. Бильярдные шары очень скоро останавливаются, потому что стенки бильярда, так же, как и сами шары, не обладают свойствами идеальной упругости, которую мы приписываем молекулам; кроме того, как бы тонко ни было сукно, катящиеся по нему шары все же испытывают трение. Тем не менее, будучи один раз приведены в движение, шары катятся достаточно долго для того, чтобы можно было составить представление о явлениях в том случае, когда движение происходит бесконечно долго.

Весьма естественным является вопрос о влиянии, оказываемом силой тяжести на движение атомов в нашем закрытом сосуде. Не опустятся ли они все под действием

этой силы на дно сосуда? Почему газ равномерно заполняет как верхние, так и нижние части сосуда? Дело в том, что сила тяжести, вобщем говоря, оказывает некоторое действие, но вследствие сравнительно малой величины последнего оно остается совершенно незамеченным в нашем частном случае. Если бы можно было отнять от газа всю теплоту, то, конечно, совершенно прекратилось бы движение его атомов или молекул, и последние недвижимо покоились бы на дне сосуда.

Далее, если подвести газу немного тепла, то его частицы начнут танцовать вверх и вниз подобно упругим мячикам на идеально упругом полу. При поднятии температуры только на одну тысячную долю градуса они будут подпрыгивать на высоту около 18 сантиметров. При более высокой температуре они опять начнут достигать крышки сосуда. Мы можем предположить, что ввиду малого их размера атомы или молекулы не слишком часто сталкиваются друг с другом. Но при обыкновенных температурах скорость, сообщаемая молекулам силой тяжести, направляющей их вниз, будет составлять лишь незначительную долю их тепловой скорости, достигающей в среднем 1800 метров в секунду, и поэтому они будут равномерно заполнять весь сосуд. При обыкновенных условиях (температуре и давлении) частицы чаще будут сталкиваться друг с другом, чем со стенками сосуда. В воздухе длина пути, пробегаемого молекулой между двумя последовательными столкновениями ее с другими молекулами, составляет только около одной десятиллионной доли сантиметра.

Вследствие непрерывных ударов газовых атомов или молекул о стенки последние должны испытывать давление со стороны газа: и действительно, — мы говорим о давлении газа, оказываемом на заключающий его сосуд — воздушный шар раздувается вследствие бомбардировки молекул об его оболочку. Предположим, что один из бортов бильярда сделан подвижным; он, очевидно, будет перемещаться под действием ударяющихся о него шаров. Если увеличить в два раза число шаров, то в два раза увеличится вызываемое ими действие: общеизвестно, что давление газа при прочих равных условиях пропорционально его плотности. Давление, испытываемое бортами бильярда, увеличится, если заставить шары двигаться с большей скоростью: аналогичным образом давление газа увеличивается вместе с температурой.

Предположим, что я внезапно двинул подвижной борт бильярда навстречу ударяющимся о него шарам, уменьшив таким образом его поле. Совершенно очевидно, что скорость шаров увеличится. Маленький бильярд, на котором это можно продемонстрировать, изображен на рис. 15. Подобным же образом при вдвигании внутрь сосуда, содержащего газ, одной из его стенок (или при опускании поршня в цилиндре с газом) возрастает скорость атомов или, другими словами, поднимается температура. Все мы знаем, как сильно может нагреться велосипедный насос при нагнетании воздуха в шину.

Описанные здесь явления могут протекать и в обратном порядке. Если внезапно отодвинуть борт бильярда в тот момент, когда о него ударяются шары, то движение последних замедлится. В газе наблюдался и этот эффект: он применен в разобранном нами приборе, в котором мы наблюдали пути атомов гелия, где внезапное расширение воздуха, содержащего насыщенный водяной пар, вызывает столь сильное охлаждение, что вдоль пути полета атомов гелия осаждалась влага в виде тумана. Расширение должно быть произведено внезапно, потому что в противном случае за время действия прибора произойдет приток тепла снаружи и не сможет установиться необходимая для успеха опыта низкая температура.

Расширение больших масс воздуха в атмосфере очень часто бывает причиной дождя и снега. Вследствие постоянных воздушных течений может случиться, что огромный объем воздуха, содержащий водяной пар, начнет расширяться в сторону уменьшившегося давления; он при этом настолько сильно охладится, что произойдет сгущение водяного пара.

Не представляет почти никакого труда воспроизвести это явление в малых размерах. Стеклянная трубка, укрепленная в горизонтальном положении (рис. 16), содержит воздух, увлажненный до насыщения путем продувания его через сосуд с водой. Стеклянная трубка с двух сторон запирается кранами, один из которых ведет к резервуару, откуда высасывающим насосом откачивается воздух, а

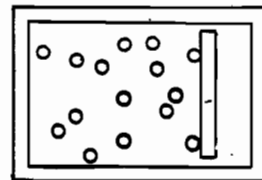


Рис. 15. Маленький бильярдный стол.

Если шары движутся, они толкают перегородку перед собой и теряют при этом часть своей энергии. Если, наоборот, перегородка быстро вдвинута, энергия движения шаров возрастает.

через другой она сообщается с резервуаром, увлажняющим воздух. Если открыть первый кран, то воздух в трубке расширится, и она наполнится тончайшим белым туманом — сгустившимся паром воды, который можно увидеть, осветив трубку пучком света в продольном направлении. Удалив из трубки туман, можно будет повторить весь опыт сначала. Всякий раз при наполнении трубки влажным воздухом, очищенным от взвешенных в нем пылинок, получается тончайший белый туман, который можно иногда видеть в местности с чистой атмосферой. Но если впустить в трубу непрофильтрованный комнатный воздух, то расширение создаст густой туман, вроде того, который так хорошо известен жителям больших приморских городов.

Газы обладают еще многими другими свойствами, для

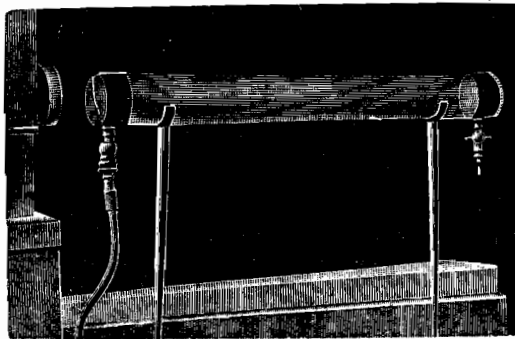


Рис. 16. Прибор для образования тумана. Длинная стеклянная трубка наполняется туманом.

Точно так же, если газ содержит два сорта атомов — тяжелые и легкие, в результате постоянных столкновений последние приобретают большую среднюю скорость, чем тяжелые. В смеси водорода с кислородом водородные молекулы движутся в среднем в четыре раза скорее кислородных. Вычисление, которое мы не имеем возможности здесь привести, показывает, что в смеси двух или нескольких газов все атомы обладают одной и той же средней энергией, причем более легкие свой недостаток в массе возмещают избыточной скоростью.

Даже в том случае, когда газы не смешаны, а содержатся в отдельных сосудах, имеет место то же самое правило, если только газы находятся при одной и той же температуре. Хотя в последнем случае атомы обоих газов не могут непосредственно обмениваться скоростями и урав-

объяснения которых может оказаться весьма полезным тот же миллиард. Прибавим к тяжелым бильярдным шарам несколько легких шариков. Мы сразу заметим, что в общей картине движения легкие шарики движутся гораздо быстрее других.

нить свои энергии, тем не менее этот процесс происходит с помощью самых разнообразных факторов: через стенки заключающих их сосудов, через крышку стола, на котором оба они стоят, и, наконец, через атмосферный воздух. Действительно, средняя скорость движения атома всецело определяется температурой окружающей среды.

Мы легко можем найти иллюстрацию описанного явления. Звук представляет собой движение частиц газа, передаваемое от одного атома к другому подобно тому, как на пожаре передают цепью ведра с водой. Чем быстрее движения отдельных работников, тем скорее подается вода. Точно так же звук распространяется тем быстрее, чем больше скорости атомов или, что то же самое, чем легче атомы. Органная труба, наполненная легким светильным газом, дает более высокий звук, чем в том случае, когда она наполнена воздухом, потому что молекулы более легкого газа движутся быстрее и колебания трубы становятся более частыми.

Простой опыт поможет выяснить всю суть дела. На столе находится стеклянная банка, в которую налито столько воды, что оставшийся воздух звучит под влиянием колебаний помещенного над ним камертона (рис. 17). Воздушные волны проходят вдоль банки и возвращаются обратно одновременно с колебаниями камертона. Частота собственных колебаний банки равна частоте той ноты, на которую настроен камертон; в этом можно убедиться, дунув слегка в банку: результатом явится слабый звук. После того, как мы введем в банку через резиновую

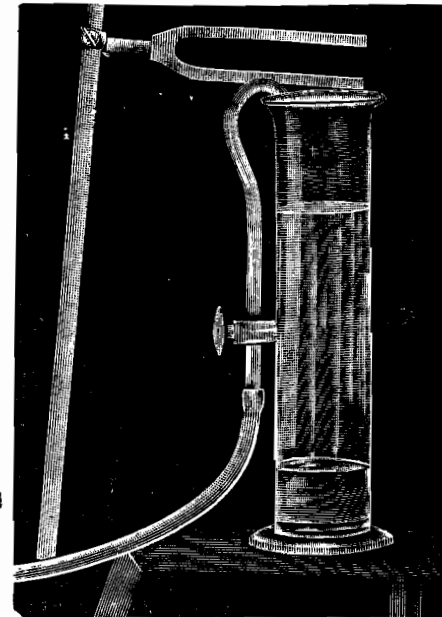


Рис. 17. Опыт для наблюдения влияния плотности газа на скорость распространения звука.

трубку другой газ, звук исчезнет. Воздушные волны проходят теперь быстрее, и естественный период колебаний банки больше уже не совпадает с частотой колебаний камертона. То же самое отсутствие звука получится, если отлить немного воды и, впустив в банку воздух, начать прибавлять другой газ. Звук появится в тот момент, когда установится такая пропорция, при которой периодичность движений газа вполне совпадает с частотой колебаний камертона.

Представим себе опять, что в стенке сосуда, содержащего газ, проделано маленькое отверстие. Всякий раз, когда против него оказывается атом или молекула, они выходят через отверстие и больше не возвращаются. Ясно, что утечка легкого газа происходит быстрее тяжелого, потому что атомы первого движутся с большей скоростью, и еже-секундно большее их число проходит через отверстие.

Описанный эффект часто применяется для разделения двух газов в тех случаях, когда все другие способы оказываются неприменимыми.

Этот способ был применен Рэли и Рамзаем для отделения аргона от азота; смесь обоих газов представляла собой, как уже говорилось, остаток, получившийся после удаления из атмосферного воздуха всех других газов. Смесь прогонялась через целый ряд глиняных чубуков от курительных трубок, причем азот вытекал через поры чубуков гораздо быстрее аргона. Атом последнего в сорок раз тяжелее водородного атома, в то время как молекула азота в двадцать восемь раз тяжелее атома водорода; следовательно, утечка азота через пористые глиняные стенки происходит гораздо скорее, чем утечка аргона.

Таким образом газ, выходящий из другого конца всей системы, богаче аргоном, чем та смесь, которая была введена вначале.

Процесс диффузии¹ одного газа в другой носит тот же самый характер, потому что промежутки между атомами или молекулами одного газа могут быть сравниваемы с порами в глиняной трубке. Диффузия протекает очень медленно, несмотря на большую скорость движения атомов, так как столкновения между ними весьма многочисленны. Судя по тому, как быстро распространяется запах светиль-

¹ Диффузией называется постепенное смешивание газов, которое происходит вследствие одного только теплового движения молекул, т. е. тогда, когда общие массы газов неподвижны и лишь соприкасаются друг с другом.

ного газа, если открыть край газопровода, можно было бы подумать, что диффузия, наоборот, происходит очень быстро.

Но это рассеяние по всей комнате обусловлено скорее потоками конвекции¹, чем диффузией: газ струями распространяется в воздухе. Это явление великолепно видно при наблюдении над дымящейся папиросой (рис. 18 А В и С). Бросьте папиросу в пепельницу и вы увидите тонкую волнистую струйку синеватого дымка, поднимающегося

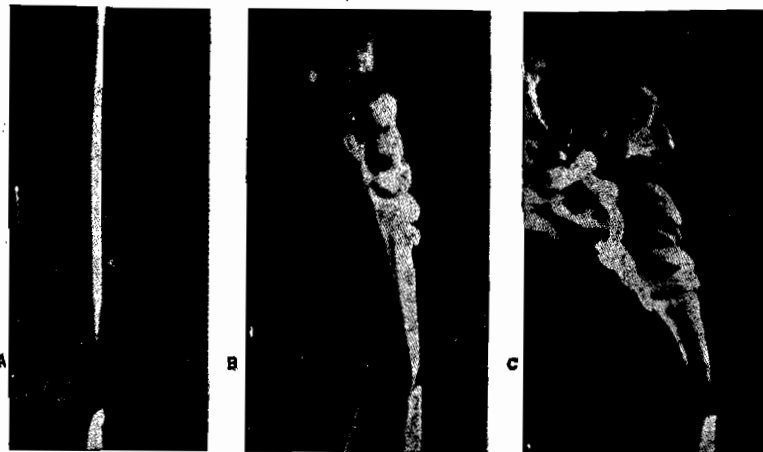


Рис. 18. Дым от папиросы.

А — дым поднимается ровной колонной. Весь воздух вокруг него увлекается вместе с ним, хотя на фотографии этого не видно; тут образуется восходящий ток, центр которого составляет дым. В и С — здесь папироса была резко сдвинута, как раз перед съемкой. Токи поднимающегося воздуха, которые раньше соприкасались с папиросой и подымались вместе, теперь свертываются и закручиваются друг возле друга, сохраняя свою независимость. Они смешиваются лишь очень слабо и притом только путем диффузии частиц из одного потока в другой; если бы это не было так, дым представлял бы бесформенную массу. Соседние токи воздуха перемешиваются скорее вследствие конвекции, чем диффузии.

кверху, который закручивается и изгибается, образуя тонкие кольца и извилистые поверхности. Так как эта струйка в конце концов смешивается с воздухом, то мы имеем здесь пример конвекции. Кроме того, все время имеет место диффузия между дымной струей и чистым воздухом, но процесс этот происходит настолько медленно,

¹ Конвекцией называется такое смешение газов, которое происходит вследствие перемешивания их масс. Например, в силу неравномерного нагревания газы начинают струйками двигаться друг относительно друга; струйки эти разветвляются, завиваются и перемешиваются между собою.

что края дымного облачка остаются резко очерченными в течение долгого времени. Равным образом при обогревании комнаты горячим воздухом, распространение тепла создается конвекцией, т. е. струи горячего воздуха просачиваются в толщи холодного воздуха. При этом и молекулы горячего воздуха, каждая в отдельности, пробираются между молекулами холодного воздуха, но последний процесс идет очень медленно. Таким образом теплопроводность гораздо менее эффективна, чем конвекция.

Движение масс горячего газа в холодном, конечно, подчиняется законам тяжести: более легкое тело стремится подняться. Дым от папиросы поднимается потому, что воздух над тлеющим концом нагревается и делается легче; струи холодного воздуха притекают со всех сторон и, встречаясь друг с другом, окружают тонкий слой дыма,

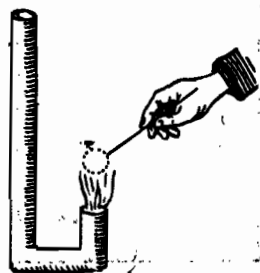


Рис. 19. Всасывание пламени в U-образную трубку.

который и является их границей. Если воздух спокоен и потоки в нем устойчивы, то дымок вытягивается высоко вверх, но достаточно небольшого перемещения папиросы, чтобы разрушить непрерывность притока воздуха — дымовая колонна разбивается на целый ряд красивых колец. Без сомнения, всем известно, какое участие в образовании тяги принимает печная труба; тем не менее, быть может, не лишен интереса следующий старый опыт Фарадея¹. Маленькая зажженная спиртовка с рукояткой помещена над отверстием короткого и колена U-образной трубки (рис. 19). Всасыванием воздуха с длинного конца можно заставить пламя пройти через оба колена и выйти наружу; после этого горение будет происходить таким образом даже в том случае, если прекратить всасывание воздуха. Дымовые трубы в госпитальных палатах часто устраиваются по этому принципу, причем тяга проходит под полом. Вся суть, конечно, в том, что горячий воздух в коротком колене легче, чем соответствующий объем наруж-

1. Фарадей (1791—1867 гг.) — английский физик, прославившийся своими исследованиями электролиза и электро-магнитной индукции. Его работы, в которых он установил общность между явлениями электрическими, магнитными и световыми, послужили исходной точкой для математической теории электричества и магнетизма, созданной также англичанином Максвеллом.

ного воздуха. Но может случиться и обратное: например, если печь холоднее наружного воздуха, то создается обратная тяга и отопляемое помещение наполняется дымом.

Теплопроводность играет главную роль при нагревании газа в закрытом сосуде. Молекулы, сталкиваясь со стенками сосуда, получают импульсы от колебаний, совершаемых последними подобно тому, как колеблющийся камертон сообщает толчок подвешенному около него бужинному шару (рис. 20).

В пустотном приборе для хранения жидкого воздуха, сконструированном Джемсом Дьюаром (рис. 21), устроены двойные стеклянные стенки и из пространства между ними выкачан воздух до минимального возможного давления. Благодаря этому число молекул, передающих энергию от внешней стенки к внутренней, во много раз уменьшается, и тепло как конвекцией, так и проводимостью подводится жидкому воздуху в гораздо меньшей мере. Но теплота передается через разреженное пространство также и путем излучения; для борьбы с этим серебрится стекло с внутренней стороны двойных стенок, чем достигается еще большая тепловая изоляция сосуда от внешней среды.

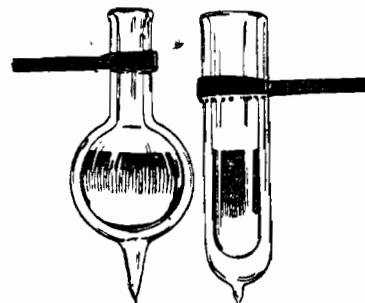


Рис. 21. Сосуды Дьюара для хранения жидкого воздуха.

Полная независимость атомов или молекул газа обеспечивает абсолютную делимость последнего. Когда мы разрезаем ножом твердое тело, то затрачиваем усилие для отделения молекул друг от друга; в газе же силы сцепления весьма незначительны. Сопротивление движению какого-либо тела возникает лишь вследствие необходимости привести в движение часть воздуха, для чего требуется

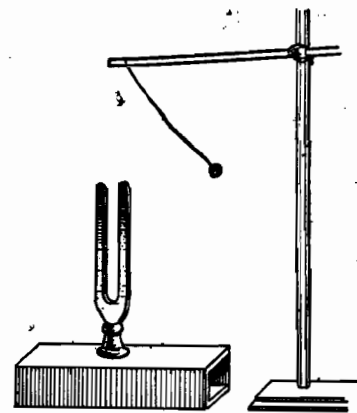


Рис. 20. Камертон и шарик. Шарик отбрасывается звучащим камертоном.

затрата энергии. Газы весьма легки, поэтому энергия, затрачиваемая на приведение их в движение, относительно мала.

Легкость воздуха и малая величина сопротивления, возникающего при движении в воздухе с относительно малыми скоростями, заставляют забыть о том, насколько огромно давление воздуха на поверхности земли и как велик вес воздуха, находящегося в большом зале. Атмосферное давление составляет около одного килограмма на каждый квадратный сантиметр поверхности нашего тела; мы выдерживаем такое огромное давление только потому, что воздух изнутри нашего тела давит практически с той же самой силой. В сосуде из тонкой жести, показанном на рис. 22, кипятили воду до тех пор, пока она не превратилась в пар и не вытеснила из сосуда весь воздух. Отверстие, через которое пар выходил, было закрыто, после чего сосуд быстро охладил, облив сверху холодной водой. Водяной пар конденсировался, давление внутри сосуда упало почти до нуля, и он был раздавлен наружным атмосферным давлением. Огромная величина последнего станет для нас еще более внушительной, когда мы сообразим,

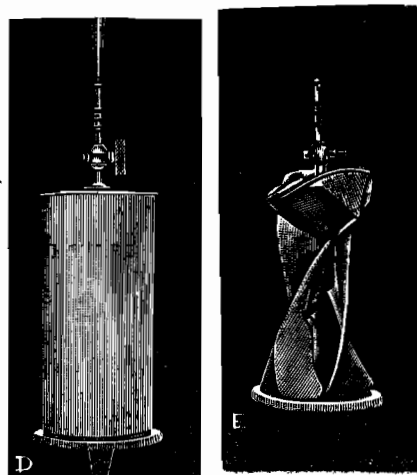


Рис. 22. Жестяной сосуд, раздавленный атмосферным давлением.

что железная балка в один квадратный дюйм поперечного сечения и около полутора метров длины, поставленная на стол в вертикальном положении, производит своим весом давление на один квадратный дюйм стола, не превосходящее атмосферного.

Неудивительно поэтому, что требуется большое усилие для приведения воздуха в быстрое движение; и наоборот, воздух, движущийся с достаточно большой скоростью, оказывает большое давление на любое тело, стоящее на его пути. Все мы знакомы с давлением ветра и прекрасно осведомлены о разрушениях, производимых ураганами.

Аналогичным образом вращающийся аэропланый винт отталкивает назад с большой скоростью массу воздуха, и возникающая вследствие этого большая сила реакции дает необходимую скорость аэроплану. С другой стороны, аэроплан, несущие поверхности (крылья) которого находятся в горизонтальной плоскости, все время стремится упасть и увлечь вместе с собою окружающий его воздух. Но для того чтобы привести в движение такую значительную массу воздуха, требуется приложить определенную силу; возникающее отсюда сопротивление воздуха создает подъемную силу аэроплана. Если бы последний не имел поступательного движения, он в конце концов увлек бы за собой окружающий его воздух и упал бы вниз, но благодаря большой поступательной скорости аэроплана под ним оказываются все новые и новые еще неподвижные массы воздуха.

Следующий простой опыт выяснит суть дела. Небольшой кусок бумаги (приблизительные размеры: 8×3 см) брошен, как показано на рис. 23; во время полета он много раз переворачивается и, наконец, по наклонной линии достигает земли.

Наоборот, птица или аэроплан при парящем полете движутся спокойно и неизменно; и как убедились строители аэропланов, конструирование крыла является совсем не таким простым делом. Форма крыла, особенно в лобовой его части, имеет огромное значение.

Птица употребляет свои крылья не только для парения, но и для взмахов: природа сконструировала великолепный механизм, приспособляющий их для этой цели. Крыло в действительности представляет собой ряд трубок, которые открываются, когда крыло поднимается, и закрываются, когда оно опускается; таким образом при взмахе давление на крыло меньше, чем при спуске. Здесь имеется некоторое сходство с перепончатой лапой утки: перепонка растягивается и производит большее давление на воду при отталкивании, чем когда лапа выбрасывается вперед;



Рис. 23. Кусочки бумаги различной формы, падающие на землю.

a — последовательные положения падающего куска бумаги; *b* — кусок бумаги, слегка изогнутый, колеблется из стороны в сторону; *c* — кусок бумаги, загнутый со всех сторон, падает прямо.

но образ действия отличается существенным образом в этих двух случаях.

Лопasti пера расположены таким образом, что они пере-крывают друг друга. При подъеме крыла они раскрыва-ются подобно створчатому окну и через них проходит воздух; когда крыло опускается, они прижимаются друг к другу; это схематически изображено на рис. 24, заим-

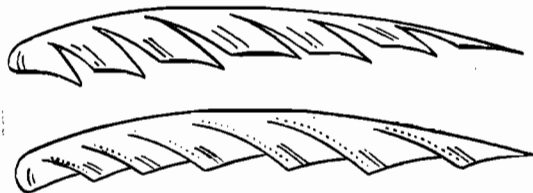


Рис. 24. Рисунки Лилиенталя, показывающие перья, раскрытые для пропуска воздуха при подъеме (верхний рисунок) и сложенные для задержки воздуха при спуске (нижний).

ствованном из книги Отто Лилиенталя¹. Как говорит Лилиен-таль, «каждый, кто наблюдал полет аистов, знает, что через правильные промежутки времени в крыльях появляются просветы». Все бесчисленные детали каждого пера при-нимают участие в описанном процессе. Отсюда ясно, что, независимо от всех других причин, при наличии подобного механизма одно взмахивание крыльями должно обеспечить необходимую подъемную силу. Поступательное движение сообщается сгибанием крыла в жесткой лобовой части, как

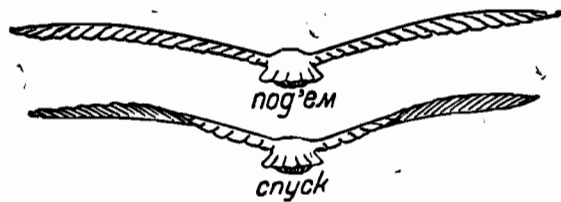


Рис. 25. Положение крыльев чайки при подъеме и спуске.

это видно из рис. 25, изображающего крылья летящей чайки. При подъеме крыла правые лопасты перьев (рис. 25) поворачиваются вниз и открывают широкую верхнюю по-

¹ Лилиенталь — конструктор первого планера, разбившийся при одном из своих полетов. Его работы подготовили почву для постройки аэро-плана.

верхность; когда же крыло опускается, оно скручивается таким образом, что открывается более темная нижняя его поверхность. Даже в том случае, когда крылья распростер-ты без всякого движения, будет действовать некоторая подъемная сила, если только воздух неспокоен и в нем име-ются маленькие струйки, вихри. Поразительное парение-птиц, пролетающих несколько километров без малейшего движения крыльев или какого-либо другого усилия, может быть связано именно с описанным здесь явлением; другими словами, оно не должно иметь места в абсолютно спокой-ном воздухе.

Рассмотренные здесь различные свойства газов могут быть объяснены, как мы видим, с помощью гипотезы о неспособности атомов некоторых сортов ассоциироваться (объединяться, соединяться) с другими атомами того же самого сорта или иными; такие атомы были названы инер-тными. С другой стороны, некоторые атомы, как, напри-мер, водород или кислород, обладающие каждый в отдель-ности большим сродством друг к другу, стремятся обра-зовать более или менее инертные молекулы, не вступающие в соединения друг с другом. Так, например, воздух пред-ставляет собой смесь неассоциированных атомов и моле-кул; в нем имеются: 1) молекулы кислорода, из коих каж-дая состоит из двух ассоциировавшихся атомов, 2) молекулы азота, построенные аналогичным образом, 3) некоторое количество молекул двуокиси углерода, состоящих из атома углерода и двух атомов кислорода, определенное число отдельных атомов аргона и, вероятно, незначительная доля других газов. Все они находятся в газообразном состоянии вследствие отсутствия у отдельных частиц всякого стрем-ления к ассоциации друг с другом; непрерывное их дви-жение в связи с полной их независимостью друг от друга позволяет понять все особенности их поведения.

Мы переходим теперь к вопросу о связи изученных нами свойств этих атомов с общими представлениями об атомном устройстве, изложенными в последней лекции. Каким образом представление об атомах, как о своего рода солнечных системах, связано с их стремлением к ассоциации между собой, к образованию молекулы и т. п.? Исчерпывающий ответ на этот вопрос потребовал бы такого изложения, которое вышло бы далеко за пределы этой книжки. Но существуют определенные простые пра-вила, которые хотя и не всегда могут быть объяснены и имеют кажущиеся исключения, тем не менее представ-

ляют собой надежную руководящую нить при изучении поставленных здесь вопросов. Возвратимся опять к нашим инертным атомам № 2, 10, 18, 36, 54, 86. Прежде всего нас поражают любопытные соотношения между их номерами. Написав разности между двумя, рядом стоящими числами, получим 2, 8, 8, 18, 18, 32. Числа 2, 8, 18, 32 представляют собой удвоенные квадраты 1, 2, 3 и 4. Мы уже видели, что разница между атомами различных сортов чисто арифметическая. Я не пытался объяснить сущность экспериментальных и теоретических методов, применявшихся для определения числа электронов в различных атомах — методы эти чрезвычайно сложны, между тем они приводят к очень простому результату, вполне достаточному для нашей цели.

Так как количество электронов, вращающихся вокруг атомного ядра, или число, выражающее величину положительного заряда последнего, приобретает столь исключительное значение, мы не можем не предположить, что в основе только что отмеченных численных соотношений лежит какой-то нам неизвестный закон природы. Вероятность последнего предположения значительно увеличивается, если взглянуть на вопрос с другой точки зрения.

Химики давно обратили внимание на замечательные аналогии, существующие между свойствами атомов различных сортов. Для наших целей удобнее всего выразить их открытие с помощью соотношений между номерами атомов. Выпишем несколько названий атомов в следующем порядке. Возьмем, во-первых, восемь атомов в порядке их номеров, начиная с гелия; под ними поместим следующие восемь, начиная с неона. Будем поступать таким образом вплоть до № 20:

Гелий	Литий	Бериллий	Бор	Углерод	Азот	Кислород	Фтор
2	3	4	5	6	7	8	9
Неон	Натрий	Магний	Алюминий	Кремний	Фосфор	Сера	Хлор
10	11	12	13	14	15	16	17
	Аргон	Калий	Кальций	и т. д.			
	18	19	20				

Мы переписали в действительности часть «периодической таблицы». Последняя расположена таким образом, что атомы гелий, неон и аргон, обладающие одним общим для них весьма важным свойством неассоциируемости, находятся в одном столбце. Далее, оказывается, что литий,

калий и натрий, очень похожие друг на друга в отношении многих свойств, тоже попали в один вертикальный столбец. Сходство атомов, находящихся в одном столбце, проявляется в бесчисленном множестве явлений: в этом заключается одна из главных особенностей химии. Самое название «периодической таблицы» было выбрано потому, что оно очень верно передает факты.

Весьма естественным является предположение, что свойства атома, проявляющиеся в его отношениях к другим атомам, вполне определяются особенностями расположения его электронов, преимущественно тех из них, которые ближе всего к его поверхности и которые в силу этого первыми вступают в соприкосновение с другими атомами. Таким образом литий, калий и натрий ведут себя одинаково, вероятно, потому, что все они обладают одним и тем же расположением наружных электронов; так же обстоит дело с углеродом и кремнием, фтором и хлором и т. д.

Подобные соображения привели к следующей гипотезе. Предположим, что оба электрона в атоме гелия расположены симметрично относительно ядра. Далее, предположим, что каждый последующий атом имеет то же самое расположение электронов, причем все добавочные электроны образуют внешнюю оболочку.

Таким образом литий имеет два электрона, расположенные так же, как и у гелия, и, кроме того, еще один, входящий в новую наружную группу. Бериллий имеет два электрона во внешней группе, бор — три, углерод — четыре, азот — пять, кислород — шесть и фтор — семь. Мы утверждаем, что этот ряд заканчивается неоном: во всех следующих атомах сохраняются полностью две внутренних группы из двух и восьми электронов, все же прочие электроны, образуют новые оболочки. Таким образом натрий, подобно литию, имеет один электрон в самой внешней группе, магний — два (подобно бериллию) и т. д. У хлора, аналогичного фтору, заполнены все группы за исключением самой внешней, в которой не хватает одного электрона; наконец, у аргона так же как и у неона, построены все группы. С калия начинается новый ряд; кальций имеет два электрона в наружной группе и т. д. Из совокупности химических явлений следует, что последняя группа не заполнена, так как она содержит восемнадцать электронов; но мы не будем углубляться в этот вопрос, так как дальше он все более и более усложняется.

Рассуждая подобным образом, мы начинаем понимать, почему атомы, принадлежащие к одному столбцу периодической системы, должны обладать одинаковыми свойствами. Но какие именно свойства атома связаны с числом электронов в его внешней оболочке? Мы уже знаем, что это число одинаково для атомов, стоящих в одном и том же вертикальном ряду периодической системы. Изучение громадного многообразия химических явлений, главным образом, условий образования и распада соединений различных атомов, приводит к установлению определенных правил, которые непосредственно связаны с интересующим нас вопросом.

Во-первых, всем атомам свойственно стремление к укомплектованию недостроенных внешних оболочек. Так, например, если бы хлор имел одним электроном больше в своей наружной группе, то последняя была бы заполнена в том смысле, что при переходе к атомам с более высокими номерами эта группа оставалась бы без изменения, и новые электроны начали бы образовывать новую группу. Вследствие этого хлор, если можно так выразиться, находится в поисках недостающего ему электрона и проявляет большую настойчивость, отнимая этот электрон у тех атомов, которые держат его недостаточно сильно. Но при этом атом хлора перестает быть электрически нейтральным; лишний электрон сообщает ему отрицательный заряд. Существует сила, которая стремится наполнить наружную оболочку до восьми электронов. Так, например, хлор стремится присвоить себе один электрон, отняв его от других атомов; для осуществления этого он разрушает их соединения, чем обуславливаются его ядовитые свойства. Точно так же сера имеет два незаполненных места. Последним обстоятельством в значительной мере обуславливается все ее поведение.

С другой стороны, литий, натрий, калий обладают внешними группами только еще в начальной стадии их формулирования: там имеется только по одному электрону. Связь с последним весьма слаба, и поэтому перечисленные здесь атомы отдают свой единственный наружный электрон по первому требованию хлора. В результате этого обмена каждый из атомов приобретает вполне законченную наружную оболочку: хлор с внешней стороны похож на аргон, а если другим атомом, у которого был отобран электрон, является натрий, то последний приобретает сходство с неонам.

Оба атома приобрели теперь электрический заряд: хлор — отрицательный, потому что он имеет один лишний электрон, натрий — положительный, так как вследствие потери одного электрона положительный заряд ядра больше не компенсируется отрицательными зарядами оставшихся электронов. Вследствие этого оба атома начинают притягивать друг друга и образуют молекулу обыкновенной поваренной соли.

Натрий представляет собой мягкий металл белого цвета. Ниже мы увидим, что отличительным признаком атомов металлов является то обстоятельство, что они обладают одним или двумя электронами, которые легко могут быть от них отняты. В только что описанном случае белый металл и ядовитый газ, соединившись друг с другом, образовали прозрачную кристаллическую соль. Такая радикальная перемена не должна нас удивлять, если мы вспомним, что расположение внешних электронов в молекуле коренным образом отличается от их расположения в каждом из атомов, прежде чем они образовали соединение; характерные свойства атома или молекулы как раз зависят от этого расположения.

Можно привести бесчисленное множество примеров подобного рода соединений.

Возьмем, например, фтористый кальций, кристаллы которого известны под именем плавикового шпата. Здесь два атома фтора соединяются с одним атомом кальция, имеющим два электрона в наружной группе; при этом они отнимают у кальция по одному электрону для укомплектования своих внешних оболочек. Таким образом молекула фтористого кальция содержит три атома. Далее, в глиноземе, кристаллической формой которого является рубин, мы имеем два атома алюминия, из коих каждый отдал три самых внешних электрона трем кислородным атомам; на каждый из последних пришлось по два электрона.

Но существует, кроме здесь описанного, еще другой способ, с помощью которого атомы заполняют свои внешние электронные группы: электроны могут быть общими для двух или нескольких атомов подобно тому, как стена может быть общей для двух соседних домов.

Так, например, при образовании водородной молекулы из двух водородных атомов по одному электрону поступает в общее владение для устройства такой же группы из двух электронов, как в случае гелия. В кислородной

молекуле, состоящей из двух атомов, каждый из которых окружен восемью электронами, половина последних принадлежит обоим атомам. В алмазе, как мы увидим ниже, каждый углеродный атом окружен четырьмя другими углеродными атомами; вместе с каждым из них он владеет двумя электронами. Таким образом каждый атом окружен наружной оболочкой из восьми электронов; ни один из этих электронов не принадлежит полностью какому-либо определенному атому. Подобного рода соединения обладают большой прочностью.

Помимо того, многие молекулы, образованные таким путем, довольствуются, если можно так выразиться, своим собственным обществом: они почти не обладают сродством к другим молекулам и не стремятся с ними ассоциироваться, оставаясь в газообразном состоянии.

Наиболее постоянными газами, естественно, являются те из них, которые имеют заполненные внешние оболочки: гелий, неон, аргон и остальные. В них получили наиболее полное выражение все те свойства газов, в которых, как мы считали, проявляются независимость частиц друг от друга и отсутствие стремления к ассоциации между ними.

ЛЕКЦИЯ ТРЕТЬЯ.

О ПРИРОДЕ ЖИДКОСТЕЙ

Отличие жидкостей от газов. Испарение. Силы сцепления. Несжимаемость жидкостей. Круглая форма капель. Смачивание. Поверхностная пленка. Мыльный пузырь. Растекание масла по поверхности воды. Еще о смачивании. Пузыри внутри жидкости. Капиллярность.

Разница между газом и жидкостью заключается в том, что атомы и молекулы первого движутся независимо друг от друга, между тем как в жидкости они находятся в тесном соприкосновении, хотя и меняются все время местами. Частицы уже не выходят полными победительницами из противоборства между движением и силами сцепления между частицами. Силы сцепления теперь достаточно интенсивны для того, чтобы заставить молекулы соприкасаться друг с другом и занимать вполне определенный объем.

Однако господство сил сцепления не является абсолютным: в процессе испарения частицы жидкости от них освобождаются.

Предположим, что в большой комнате стоит стакан воды. Молекулы воды все время находятся в движении — колеблются, вращаются, смещаются, меняются местами. Но этого движения, вообще говоря, недостаточно для того, чтобы оторвать их друг от друга. На поверхности жидкости, где имеют место особые условия, дело обстоит иначе. Действительно, благодаря наличию сил сцепления молекулы образуют жидкое тело, занимающее некоторый ограниченный объем. В результате непрерывных столкновений одна из молекул, находящихся на поверхности, может получить настолько сильный толчок, что она порвет связь с окружающими ее молекулами и совершенно покинет жидкость. Таким образом пространство, в котором находится стакан с водой, будет содержать постепенно увеличивающееся число водяных молекул, не зависящих друг от друга и образующих газ. Если пространство замкнуто, то число

свободных молекул перестанет возрастать в тот момент, когда столько же молекул будет покидать поверхность жидкости, сколько их будет возвращаться обратно. Пространство будет насыщено водяным паром. Это может произойти раньше, чем из стакана исчезнет вся вода. Но если непрерывно удалять из закрытого пространства воздух вместе с паром, то с течением времени испарится вся вода, находившаяся в стакане.

Только те молекулы отрываются от поверхности жидкости, которые обладают энергией, превосходящей среднюю тепловую энергию остальных молекул; часть этой энергии они затрачивают на то, чтобы оторваться от своих соседей. По мере того как происходит испарение, средняя тепловая энергия всего тела должна уменьшаться; другими словами, вода при испарении охлаждается. Всем, конечно, хорошо известно это явление.

Охлаждение может быть увеличено с помощью жидкости, которая испаряется быстрее воды: так, например, одно время хирурги употребляли эфир для замораживания оперируемого места. В жарких засушливых странах для охлаждения питьевой воды ее наливают в пористый сосуд и подвешивают в таком месте, которое защищено от прямых солнечных лучей, но открыто для ветра. Чем последний горячее и суше,

тем быстрее охлаждается вода. В Австралии летом сосуды, висащие над верандой дома или под крышей стационарного здания, представляют обычное зрелище. Быстрое испарение воды, просачивающейся через поры сосуда, вызывает охлаждение оставшейся жидкости.

Произведем следующий опыт. Два полых стеклянных шара, соединенных стеклянной же трубкой, как показано на рис. 26, наполнены до половины водой; воздух из них выкачан. Перельем сначала воду в верхний шар, а нижний погрузим в жидкий воздух; через три или четыре минуты вся вода замерзнет, хотя верхний шар все время

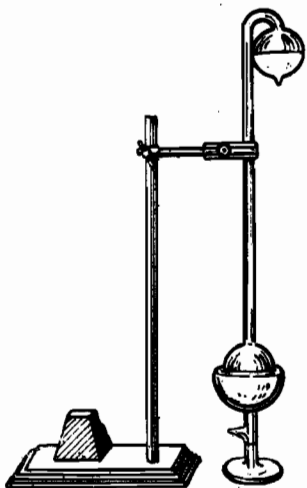


Рис. 26. Опыт с двумя шарами.

Нижний пустой шар погружен в жидкий воздух; верхний — содержит воду, быстро замерзающую.

находился на большом расстоянии от жидкого воздуха.

Суть дела заключается в том, что водяные молекулы, вылетающие из водной поверхности, попадают по соединительной трубке в нижний шар; когда последний не охлаждается жидким воздухом, если не все, то, по крайней мере, большинство вылетевших молекул вернется обратно в воду, возвратив ей свою избыточную энергию, которую они получили при вылете из жидкости. Таким образом вода охладится весьма незначительно. Если же нижний шар находится при температуре жидкого воздуха, то молекулы не будут возвращаться из него обратно в верхний шар. Они потеряют в нем свою скорость и образуют в нижнем шаре сначала воду, а затем лед. Вода наверху, совершенно не получая обратно избыточной энергии вылетевших молекул, быстро охладится и вскоре замерзнет.

Воздух откачивается из шаров для того, чтобы ничего не препятствовало свободному движению молекул воды и чтобы испарение происходило достаточно быстро. Если бы процесс происходил медленно, то снаружи притекло бы столько тепла, что вода вовсе бы не замерзла. Присутствие воздуха не прекращает испарения, т. е. не мешает молекулам, обладающим достаточной энергией, покинуть поверхность воды, но воздух стесняет свободу движений таких молекул, сводя явление к рассмотренному раньше процессу диффузии.

При кипении жидкости температура поднимается до такой точки, когда количество испаряющихся молекул достигает такой величины и они имеют столь большую скорость вылета, что могут оттолкнуть молекулы воздуха от поверхности воды. Молекулам воды больше не приходится пробивать себе дорогу каждой в отдельности. Весь процесс кипения в столь высокой степени отличается от обычного испарения, что весьма легко упустить из виду основное сходство между обоими явлениями.

Температура кипения жидкости зависит от величины внешнего давления, которое должны преодолеть испаряющиеся молекулы: на вершине Мон-Блана кипящая вода на 15°C холоднее, чем у подножия горы.

Теплота, необходимая для испарения жидкости, служит мерой энергии, необходимой для расчленения жидкости на отдельные молекулы, т. е. для определения сил сцепления между ними. Мы лучше всего составим себе правильное представление о значительности этих сил, если сравним

теплоту, потребную для превращения воды в пар, с количеством работы, которую пар может произвести.

Силы сцепления наглядно проявляются в любой висящей капле воды или другой жидкости. Молекулы прилипают одна к другой подобно роющимся пчелам. Силы, удерживающие слой молекул, прилегающий к поверхности, с которой свешивается капля, выдерживают всю тяжесть капли.

Этот простой пример, может быть, недостаточно убеждает нас в том, что силы сцепления велики и имеют чрезвычайно важное значение. Следующий опыт может сделать это более ощутимым.

Изогнутая стеклянная трубка высотой около 30 сантиметров, из которой выкачан воздух, содержит воду (рис. 27). Приведем трубку в такое положение, чтобы вода полностью заполнила одно колено; если в трубке окажется маленький пузырек, его надо будет перегнать в другое колено.

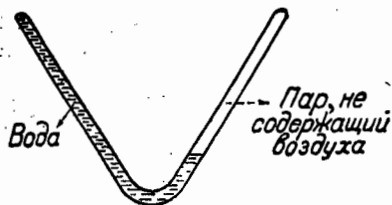


Рис. 27. Опыт с изогнутой трубкой.

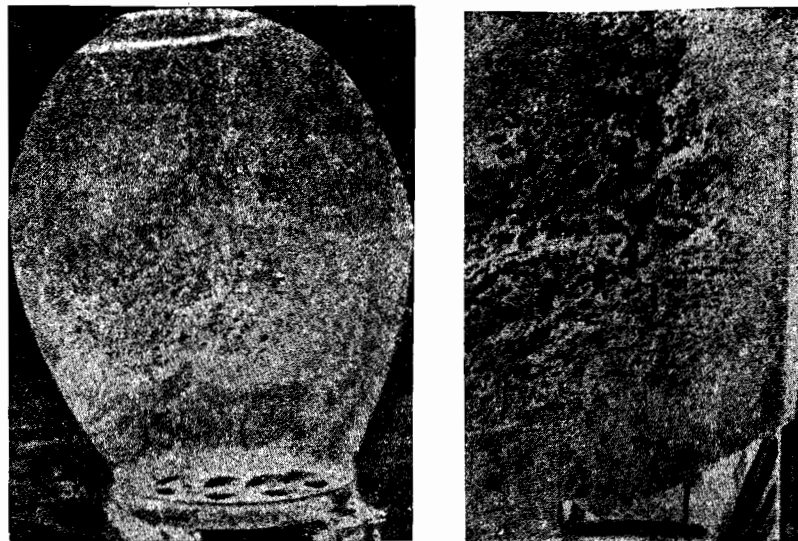
На рис. 27 трубка повернута в такое положение, что одно колено заполнено целиком, а в другом вода стоит на низком уровне. Вес колонны воды над этим уровнем в первом колене полностью уравнивается только силами сцепления между водяными молекулами и стеклом, а также сцеплением между водяными молекулами. В самом деле, в правом колене нет воздуха, который мог бы своим давлением поддерживать столбик воды.

Итак, мы имеем каплю воды около 30 сантиметров длины. Мы не можем заставить висеть каплю такой длины на кончике пальца, так как вода отрывается вследствие ничем не останавливаемого изменения размеров и формы капли под действием ее собственного веса. Если же этого избежать, воспользовавшись трубкой, то величина молекулярных сил станет более очевидной.

Когда мы стараемся растянуть железный стержень, то усилие, которое мы должны при этом приложить, дает представление о величине сил, удерживающих вместе молекулы в твердом железе. О воде же мы привыкли думать, что ее массу легко растянуть; на самом деле это не так. Легко изменить форму какого-либо объема воды, но трудно

оторвать один слой молекул от другого, с которым он непосредственно соприкасается. В действительности вода также сильно сопротивляется растяжению, как и сжатию.

Мы позволим себе маленькое отступление от главной темы наших рассуждений, потому что манипулирование с изогнутой трубкой приводит нас к следующему любопытному явлению. Если встряхнуть трубку и взболтать находящуюся в ней воду, а затем внезапно опрокинуть ее на



а

б

Рис. 28, а и б. Правый снимок изображает разъединенную часть лопасти винта «Мавритании». Маленькие выбоины на краю лопасти особенно хорошо видны на левом снимке.

один конец, то послышится звук от удара, как если бы столкнулись два твердых предмета; рука, в которой зажата трубка, получит толчок. Действительно: из трубки выкачан воздух, вода ударяется о стекло точно так же, как если бы она была твердым телом; собственно говоря, вследствие своей несжимаемости вода и ведет себя подобно твердому телу. С трубками необходимо обращаться очень осторожно, потому что очень легко разбить их на конце: стекло разбивается так же, как если бы мы его ударили молотком.

Чрезвычайно любопытный и к тому же очень важный пример описанного явления представляла собой обнаруженная несколько лет назад порча судовых винтов. Рис. 28, *a* и *b* представляют разрушения в лопасти винта «Мавритании». Впервые подобные повреждения появились после введения паровой турбины Парсонса, увеличившей число оборотов винта и скорость движения судов; в результате оказались большие материальные убытки. Описанное явление удалось объяснить следующим образом: судно двигалось настолько быстро и винты совершали столь большое число оборотов в единицу времени, что вода не успевала заполнять пустое пространство, оставляемое за собой лопастями винтов. На рис. 29 показаны эти пустоты, образованные в опытном бассейне заводов «Турбиния» в Ньюкэстле;

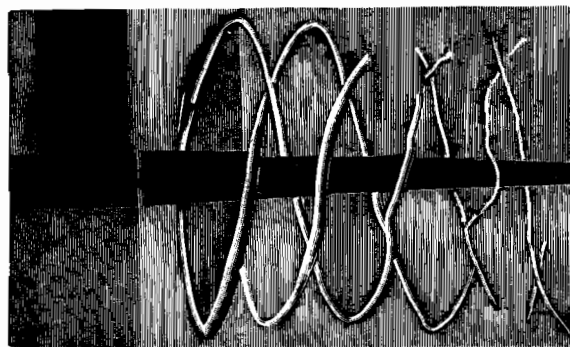


Рис. 29. Пустоты, образованные гребным винтом при быстром вращении.

они расположены по спиралям, из коих каждая принадлежит одной лопасти винта.

Под давлением окружающей воды пустое пространство заполняется, и так как в нем нет воздуха, то лопасть винта, образуя заднюю стенку пустоты, подвергается, подобно трубке в предыдущем опыте, столь сильному удару, что происходит частичное разрушение металлической поверхности. Было затрачено много труда и денежных средств, прежде чем удалось найти полное объяснение и средство борьбы с этим злом: лопасти винтов теперь делаются из специального сплава, способного противостоять подобного рода ударам.

Во время этого исследования был сделан следующий поразительный опыт, изображенный на рис. 30. Прочный металлический сосуд, находящийся в центре чертежа,

наполнен водой и падает на дно бассейна, также наполненного водой; достигнув дна, сосуд ударяется о него своей нижней частью и останавливается. В первый момент после удара плотно прилегающая к стенкам гиря *W*, подвешенная на пружине, а вместе с нею и вода в верхней части сосуда продолжают двигаться по инерции, вследствие чего создается пустое пространство у вершины *P* конуса *V*. В следующий момент действием пружины и давлением окружающей воды гиря *W* вновь подымается и пустота в вершине *P* быстро заполняется водой; так как по мере сужения конуса скорость прибывающей воды возрастает, то она с такой силой ударяется о вершину конуса, что даже пробивает дыру в листе латуни, помещенном в *P*.

Заполнение водой пустот, оставляемых за собой лопастями винтов, сопровождается таким шумом, что приближение корабля может быть определено на большом расстоянии с помощью подводных приемников звука.

Многие должны быть знакомы с менее серьезным примером того толчка, которым сопровождается столкновение с большой массой воды вследствие ее несжимаемости: я имею в виду неудачное ныряние с большой высоты.

Молекулы жидкости стремятся сблизиться друг с другом под влиянием взаимного притяжения, поэтому при отсутствии посторонних факторов (веса и т. п.) жидкость должна была бы принимать шаровую форму. Так в действительности и происходит с маленькими капельками ртути: если ртуть разлить по столу, то она при этом разбивается на круглые капельки. С водой обстояло бы также, если бы она не смачивала стола; вообще говоря, вода смачивает твердое тело, по которому она разлита; исключением является пыльная поверхность.

Ниже мы подробнее остановимся на явлении смачивания и выясним его смысл.

Когда жидкость взята в большом количестве, сила тяжести противодействует стремлению жидкости принять

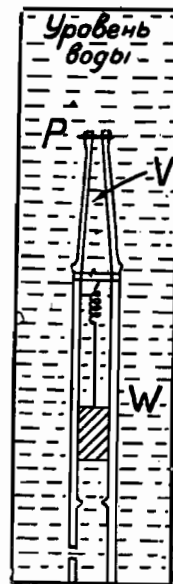


Рис. 30. Водяной молот Парсонса.

форму шара. Когда же капли весьма малы, то они принимают правильную шаровую форму. По мере увеличения этих капель, они превращаются в толстые диски с закругленными краями, как это показано на рис. 31.



Рис. 31. Капли ртути на столе.

Маленькие капли ртути имеют совершенно круглую форму. Широкие капли сплющиваются.

Другой пример представляет изготовление свинцовой дроби. Расплавленный свинец течет с высоты и дождем падает вниз; при падении расплавленная масса разбивается на отдельные капельки правильной сферической формы. Во время падения капельки успевают застыть в виде маленьких шариков.

С первого взгляда может показаться, что это противоречит всему, изложенному выше: ведь здесь действие силы тяжести не устранено, а между тем, происходит образование круглых капель. Дело в том, что вредное влияние силы тяжести скывается не непосредственно: только сопротивление силе тяжести препятствует образованию сферических капель. В случае больших капель ртути сплющивание обусловлено не непосредственно самой силой тяжести, но обратной реакцией (противодействием) стола, оказывающего сопротивление этой силе.

Следующий опыт послужит иллюстрацией предложенного здесь объяснения. Темная, непрозрачная жидкость, ортотолуидин, не смешивается с водой, или, другими словами, вода ее не смачивает; плотность ортотолуидина такова, что он не тонет в слое чистой воды, налитом поверх водного раствора соли (рис. 32.)

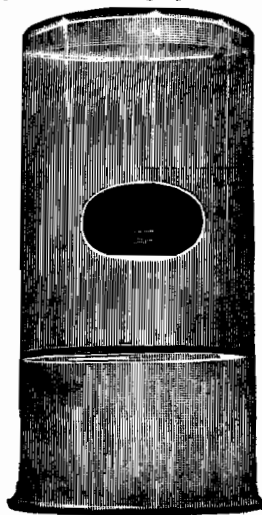


Рис. 32. Большая капля ортотолуидина, плавающая в воде поверх слоя раствора соли.

Для получения правильных сфер нужно добиться уничтожения вредных влияний, вызываемых силой тяжести и смачиванием. Маленькие капельки ртути, разлитой на столе, на полу являются великолепной иллюстрацией сказанного.

В условиях нашего опыта отсутствует как смачивание, так и влияние силы тяжести, вследствие чего, как мы видим, происходит образование большой капли, достигающей нескольких сантиметров в диаметре; если ее потревожить стеклянной палочкой, то с течением времени она сама восстановится в прежнем виде или разобьется на несколько сфер меньших размеров. Если придавить каплю сверху той же палочкой, то она слегка сплющится: внешнее усилие будет теперь препятствовать стремлению ортотолуидина принять сферическую форму; восстановление последней произойдет в тот же самый момент, когда создадутся благоприятствующие этому условия. Совершенно так же образуется углубление, впадина на поверхности ртути, когда на последней плавают какое-либо твердое тело, например железный шар; поверхность ртути вблизи последнего принимает форму, изображенную на рис. 33. То же самое мы увидим, обратив внимание на форму ртутной поверхности вблизи стенки содержащего ее сосуда.



Рис. 33. Железный шар, плавающий на поверхности ртути (разрез).

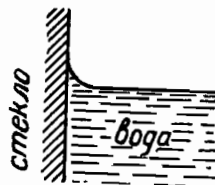


Рис. 34. Вода, поднимающаяся у стенки стеклянного сосуда, которую она смачивает.

Иначе обстоит дело, когда жидкость смачивает стенку содержащего ее сосуда или поверхность плавающего в ней тела. Налив чистой воды в чистый стеклянный сосуд, увидим, что уровень воды около краев выше, чем посередине сосуда. Явление это представляется более сложным, чем описанное раньше; очевидно, здесь существуют силы сцепления между стеклом и водой (рис. 34).

Опустим стеклянную пластинку на дно сосуда, наполненного ртутью (рис. 35), и заставим ее коснуться дна таким образом, чтобы не было ни одной капли ртути между дном и пластинкой; после того, как это будет сделано, пластинка останется лежать на дне, хотя процесс опускания потребовал затраты немалого усилия; далее, не легко будет вновь поднять пластинку. Объяснить это явление



Рис. 35. Стеклянная пластинка на дне сосуда со ртутью.

Пластинка слегка поднята над дном для того, чтобы показать, что ртуть не проникает в образовавшееся таким образом пространство.

в согласии с рассмотренными здесь принципами не представляет особого затруднения. Для того чтобы поднять пластинку нужно, чтобы под нее опять проникла ртуть, потому что хотя под пластинкой и нет абсолютной пустоты, тем не менее, давление того малого количества воздуха, который там находится, сразу падает, когда пластинка будет приподнята. Так как давление с верхней стороны пластинки больше атмосферного, то силы, прижимающие пластинку ко дну, больше тех, которые стремятся ее поднять. Вид поверхности ртути, который она принимает у края пластинки, показан на том же рис. 35; дело обстоит таким образом, что ртуть сама не может попасть в узкий зазор между пластинкой и дном сосуда.

Капля жидкости, стремящаяся приобрести сферическую форму, выглядит так, как если бы она помещалась в эластичном мешке.

Атомы ртути на поверхности находятся несколько в иных условиях, чем те же атомы внутри жидкости, потому что первые свободны с одной стороны; только в этом смысле и можно говорить о поверхностной пленке. Мы пользуемся этим термином за неимением лучшего и говорим о стремлении пленки к сокращению и сжатию.

Иногда, однако, существует настоящая пленка на поверхности, по своему строению совершенно отличающаяся от жидкости во внутренних слоях. В подобных случаях мы встречаемся с целым рядом загадочных и красивых явлений. Наиболее известным для нас примером, несомненно, являются мыльные пузыри. Какую роль в их образовании играет мыло? Ответ может быть найден в свойствах мыльной молекулы. Последняя обладает чрезвычайно любопытным видом, причем ее длина в несколько раз больше ширины; она представляет собой цепочку из углеродных атомов, расположенных по длине вместе с водородными атомами и заканчивающуюся с одного конца гроздью из трех водородных атомов, а с другого конца — небольшой группой, состоящей из кислорода и натрия. Первая группа носит законченный характер: она обладает весьма малым сродством к другим атомам и молекулам. Наоборот, другой конец мыльной молекулы является весьма активным и охотно вступает в соединение с другими частицами, она обладает особенно большим сродством к воде. Благодаря тому, что только один конец цепочки является деятельным в этом отношении (другой конец и боковые края цепочки совершенно неактивны), мыльные молекулы

обладают способностью унизывать с внешней стороны поверхность воды, куда они попадают в результате своих странствований.

Таким образом на поверхности воды образуется настоящая пленка, состоящая из мыльных молекул, опирающихся на один конец, или, если можно так выразиться, одним концом вросших в воду, а другим торчащих наружу. Они толпятся друг возле друга подобно колосьям в поле или ворсинкам на куске бархата. Но мыльные молекулы не обладают той свободой, которую имеют отдельные волоски ворса: наоборот, они связаны друг с другом силами сцепления. Мы еще встретимся с последним явлением. Таким образом мыльные молекулы образуют своего рода кольчугу на поверхности воды. Эта пленка может быть растянута в том смысле, что при этом из внутренних слоев явятся новые цепочкообразные молекулы и займут свои места наряду с остальными.

Мыльный пузырь представляет собой тонкостенную оболочку из раствора, обтянутую как с внутренней, так и с внешней стороны мыльной пленкой: только благодаря последнему обстоятельству он и сохраняет так хорошо свою форму. Мыльный пузырь разрушится, если выпустить из него воздух. Следующий весьма простой опыт послужит иллюстрацией стремления пузыря к сжатию. Проволочное кольцо опущено в мыльный раствор; вытаскивая его оттуда, мы увидим, что кольцо затянато внутри мыльной пленкой. Внутри последней плавает нитяное кольцо, которое было привязано к проволоке еще до опускания в раствор. Если прорвать пленку внутри нитяного кольца, прикасаясь к ней нагретой иглой, то нитяная петля мгновенно примет форму правильной окружности, как показано на рис. 36. Совершенно очевидно, что вся пленка находится в напряженном состоянии и стремится сжаться.

Весьма замечательной особенностью мыльного пузыря является его противодействие сближению с другим пузырем. Если выдуть пузырь на кольцо (рис. 37), то можно ударить о него другим пузырем с силой, казалось бы достаточной, чтобы прорвать их. Но пузыри отскакивают



Рис. 36. Петля из очень тонкой нити, плавающая на мыльной пленке.

Часть пленки внутри петли проколота горячей иглой; сейчас же петля принимает форму правильного круга.

друг от друга, как резиновые шары. Возможное объяснение этого явления заключается в том, что в обоих случаях внешний слой состоит из тех упомянутых выше цепочкообразных молекул, которые, как мы видим, весьма

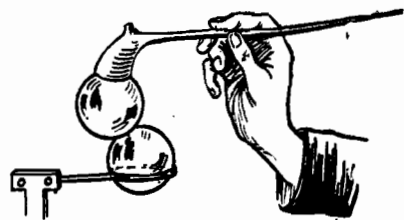


Рис. 37. Два соприкасающихся пузыря.

Пузыри плотно прилегают друг к другу и могут двигаться один по другому, но они не сливаются, потому что жидкости в них не могут соединиться; здесь соприкасаются только недейательные концы молекул.

мало склонны к соединению с другими молекулами. У пузырей нет тенденции к соединению, когда их сжимают вместе, так как части, прежде всего соприкасающиеся, не притягивают друг друга. Весьма ясно это видно на следующем замечательном опыте Ч. В. Бойса¹.

Пузырь выдувается на кольцо, укрепленном в подставке (рис. 38). К нижней части пузыря прикрепляется небольшой грузик, как показано на рисунке. Затем стеклянная трубка с мыльным раствором вводится через верх пузыря внутрь; при раздувании внутри первого пузыря появляется второй; когда он достигнет нужных размеров, то легким движением его отделяют от трубки. Внутренний пузырь падает на нижнюю часть наружного пузыря, касаясь его стенок по кругу. Несмотря на то, что пузыри соприкасаются по целой линии, они не стремятся слиться.

Без сомнения, это происходит потому, что они обращены друг к другу неактивными или несоединяющимися концами молекул. Если бы форма наружного пузыря не была искажена грузиком, внутренний и наружный пузыри коснулись бы в своих нижних частях. Обычно на нижней части внутреннего пузыря есть капля раствора.

Если эта капля коснется внешнего пузыря, то оба пузыря сольются вместе. Капля раствора играет роль мостика между двумя пузырями, по которому один пузырь переливается в другой. Если через наружный пузырь

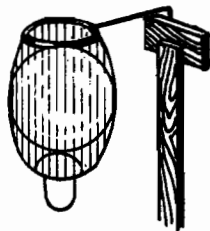


Рис. 38. Опыт Ч. В. Бойса.

просунуть стеклянную трубку и удалить эти капельки из внутреннего пузыря, то грузик, висящий на наружном пузыре, можно удалить; теперь пузыри могут коснуться и нижними частями без разрушения, как показано на рис. 39.

Когда на поверхности ручья образуется пена, то причиной этого является присутствие в воде молекул сапонинов — образований, имеющих во многих растениях. Точно так же и пена на морском берегу, возможно, появляется вследствие присутствия подобных молекул, образующихся в водорослях.

За последние годы мы много узнали о природе этих цепочкообразных молекул. В частности, изучением явлений, возникающих при растекании масла по поверхности воды, занимались многие известные физики: покойный Рэлей в Англии, Дэво во Франции, Лангмюир в Америке, Харди и Адам в Англии.

Чтобы дать понятие о величине тех эффектов, о которых мы говорим, мы повторим один или два из опытов. Возьмем чистую поверхность воды, т. е. поверхность, совершенно свободную от малейших следов масла или жира. Для этого, привязав резиновую трубку к крану, опустим ее свободный конец на дно сосуда с тем, чтобы вода, наполняя резервуар, переливалась через края и смывала таким образом всю грязь с поверхности. После этого посыпем на поверхность тонкую тальковую пудру или что-либо в этом роде. Затем возьмем тонкое стеклянное острие или иглу и погрузим ее в какое-либо масло. Далее, вытрем почти все масло с иглы и острие ее с ничтожными остатками жира погрузим в воду. Тотчас же на поверхности воды, посыпанной тальком, вокруг иглы образуется свободный от талька круг (рис. 40).

Повидимому, длинные молекулы расположены на поверхности одна около другой, как в прежних опытах; к поверхности мыльного пузыря они проникали изнутри, теперь

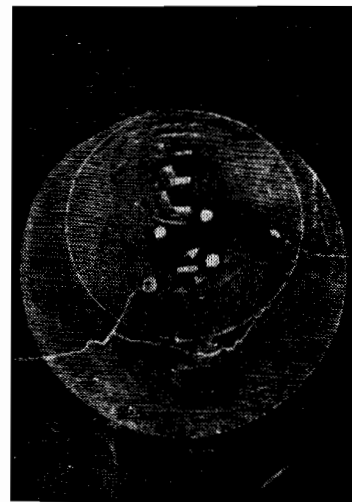


Рис. 39. Один пузырь внутри другого.

¹ См. Ч. В. Бойс, Мыльные пузыри, перевод Познера, изд. «Научного книгоиздательства», 1919 г.

мы вводим их снаружи. Каждая молекула стремится закрепиться в воде своим активным концом и располагается стоймя, как растение, растущее из воды. В конце концов это удастся сделать всем молекулам, и поверхность воды покрывается тонким слоем, толщиной всего в одну молекулу. Толщина такого слоя порядка двух-трех десяти-миллионных долей сантиметра. Толщину этой пленки можно измерить, определяя вес капли масла (что, конечно, весьма затруднительно ввиду малости ее) и площадь,

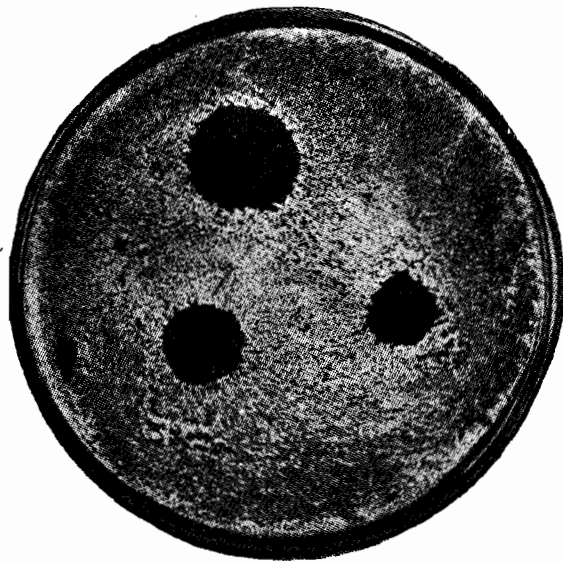


Рис. 40. Круги, образованные маленькими каплями масла на поверхности воды, посыпанной тальком

покрытую маслом. Таким, именно, методом и пользовались при исследовании этих явлений названные выше исследователи.

В недавнее время для измерения этой величины оказалось возможным применить новый метод, основанный на использовании лучей Рентгена.

На основании более ранних исследований можно было заключить, что толщина слоя такая, какую следовало бы ожидать, если бы слой был одномолекулярным. Этот вывод в значительной степени подтверждается тем, что при образовании на поверхности воды слоев из веществ, кото-

рые по данным химиков состоят из цепочкообразных молекул различной длины, толщина слоя изменялась вместе с длиной молекул.

Если капля масла достаточно мала и пыль мелко рассеяна по поверхности, то очищенное от пыли пятно в точности круглое. При прикосновении к поверхности воды в другом месте образуется новый круг. Каждый из кругов совершенно не зависит от присутствия другого. Это обстоятельство позволило Дэво утверждать, что действие каждой капли сосредоточено только на поверхности вокруг той точки, где растеклось масло.

Явление происходит так, как будто капля жидкости растекается все больше и больше вплоть до некоторой определенной толщины и далее уже растекаться не может. Опуская большую каплю, мы очистили бы от пыли большое пространство. Опустив, например, несколько капель масла, можно очистить поверхность воды в большом бассейне.

Если слой пыли на поверхности воды разбит на отдельные «заплаты» путем опускания на него мелких капель масла в разных местах и если не вся поверхность сплошь покрыта маслом, мы можем наблюдать скорость расплывания его по поверхности; для этого коснемся поверхности жирной иглой на малом расстоянии от плавающего пятна из пыли и будем следить, как внезапно, толчком, пыльная часть оттягивается от жирного пятна.

Такие же толчки являются причиной быстрых движений кусочков камфоры, опущенных на поверхность воды. По мере растворения камфоры раствор растекается по поверхности в виде тонкой пленки и кусочек камфоры отскакивает подобно пушке после выстрела или ракете, когда нагретые газы вырываются из ее хвоста. Иной раз движение кусочков камфоры происходит беспорядочно во все стороны, а иногда они забавно вертятся.

Можно сделать легонькую лодочку и, прикрепив к ее корме кусочек камфоры (так, чтобы он касался воды), заставить ее двигаться по воде.

Однако стоит вылить на поверхность воды немного масла, чтобы все такие лодочки и просто кусочки камфоры сразу остановились, как вкопанные. Масляная пленка мгновенно покрывает поверхность воды, и растворенная камфора не может более растекаться по ней. Все мы знаем, что волны стихают при выливании в море масла. Мы можем наблюдать этот эффект, создавая волны в длин-

ном корыте. Чтобы создать ветер, мы воспользуемся вентилятором и увидим, что на поверхности воды в сосуде происходит настоящий шторм (рис. 41). Он стихает, как по волшебству (рис. 42), лишь только в середину его пустить несколько капель масла; через несколько мгновений ветер сдувает масляный слой к концу корыта, и волны поднимаются вновь.

Мы должны предположить, что в этом случае ветер не может поднять воду. Как мы знаем, последняя покрыта

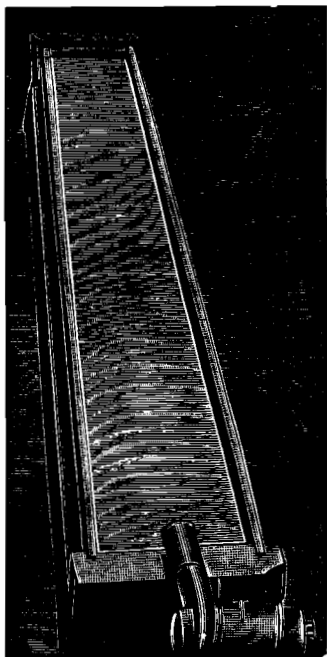


Рис. 41. Волнение на чистой поверхности воды.



Рис. 42. Масло успокаивает «бурю».

пленкой из масла, верхняя поверхность которой образована неактивными концами длинных молекул масла, подобных молекулам мыла; возможно, что ударяясь о них, молекулы воздуха отскакивают, как от гладкой поверхности. Поверхность чистой воды является как бы шероховатой поверхностью, так как между ее молекулами есть промежутки, приблизительно такого же размера, как молекулы воздуха, ударяющиеся в нее. Но если поверхность масля-

ной пленки очень гладка и мало противодействует молекулам, ударяющимся в нее, воздух не может поднять тех малых волн, которые затем вырастают в большое волнение, и таким образом масло успокаивает волны, парализуя действие ветра; движение ранее существовавших волн замирает благодаря их собственному трению.

Мы переходим теперь к вопросу о смачивании. Известно, например, что чистая поверхность стекла смачивается водой; но это не имеет места если поверхность стекла смазана жиром, даже когда слой жира совершенно невидим. Это, пожалуй, неудивительно, так как мы видели, что, по крайней мере, в некоторых случаях, длинные молекулы, из которых состоят жиры и масла, обращены наружу своими неактивными концами; последние весьма мало притягиваются к молекулам воды. Поэтому вылитая на жирную поверхность вода собирается в капли совершенно так же, как вылитая на стол ртуть. Шаровая форма капель определяется притяжением ее молекул друг к другу.

Жирную иглу можно осторожно положить на поверхность воды, причем она не погрузится в воду, а только немного вдавит поверхность — совершенно так, как будто поверхность покрыта кожей, прогибающейся под тяжестью иглы. Еще более замечательно плавающее жирное проволочное сито. Сито погружается в расплавленный парафин, который затем стряхивается, чтобы отверстия были открыты; затем сито высушивается, причем лучше не касаться его пальцами. Оно будет после этого плавать и может нести значительный груз. Такое сито можно наполнить водой (рис. 43); однако воду следует наливать осторожно, лучше всего подложив кусок бумаги, который можно затем вынуть. Чтобы показать, что отверстия совершенно открыты, мы можем сообщить ситу резкое движение, тогда водяная пленка прорвется, и вода прольется на пол.

Смачиванием объясняются также и следующие явления. Если наливать содовую воду в чистый бокал, то на поверхность выходит очень мало пузырьков. Если же поверхность бокала грязна или шероховата, то возникают целые потоки



Рис. 43. Сито, смазанное жиром, держит воду.

пузырьков. Существует прекрасный старый опыт для иллюстрации этого явления; это — опыт с «виноградом и шампанским». Вместо шампанского мы воспользуемся содовой водой. Виноград не смачивается водой и потому, если мы опустим в бокал виноградную ягоду, то она, опустившись на дно, начнет собирать на себе пузырьки в большом количестве (рис. 44). Вскоре она покроется слоем пузырьков, выглядящих подобно жемугу, и эти пузырьки вынесут ее на поверхность. Виноградина немногим тяжелее воды, и потому ее нетрудно вынести на поверхность, где пузырьки и начинают лопаться; это продолжается до тех пор, пока виноградина не погрузится вновь в воду, где она снова набирает пузырьки и затем снова всплывает. Явление продолжается в течение нескольких минут, пока содовая вода не теряет весь газ.

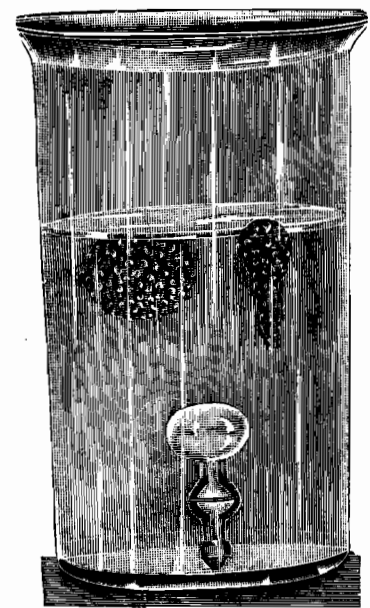


Рис. 44. Виноградные ягоды в содовой воде.

Интересно поместить в бокал два стеклянных шарика вместо винограда. Предварительно их надо хорошенько вычистить: достаточно вымыть их водой с мылом. На них не образуется никаких пузырей и они лежат на дне. Вынем один из них и потрем жирным пальцем; после этого он подобно винограду начинает собирать на себе пузырьки, всплывать и т. д.

Когда пузырь углекислоты образуется в содовой воде, частицы газа должны собраться вместе и оттолкнуть в стороны частицы воды. Молекулы воды крепко связаны друг с другом и противодействуют этому расталкиванию; по этой причине мы не замечаем образования пузырей в самой воде. Стекло, если оно чисто, смачивается водой, иначе говоря, — молекулы воды сцеплены со стеклом еще сильнее, чем они сцеплены между собой. При этих условиях пузырьки не могут образоваться и здесь, так как им пришлось бы отрывать молекулы воды от стекла.

Другое дело, если поверхность стекла жирная и молекулы воды не сцеплены со стеклом, а только прижаты к стеклу давлением остальной жидкости. В этом случае пузырьки получают возможность расти и быстро увеличиваются в объеме. Оттолкнуть назад окружающую воду легче, когда пузырьки уже немного выросли.

Прекрасной иллюстрацией этого положения является следующий опыт Бойса с мыльными пузырями. Два пузыря различных размеров выдуваются на двух концах одной и той же трубки; если, открыв кран, мы сообщим их друг с другом, воздух из маленького шара перейдет в большой и маленький пузырь спадет.

Точно также и в новом опыте: большие пузыри в содовой воде, лежащие рядом со стенкой сосуда или на виноградной ягоде, поглощая маленькие, увеличиваются в размерах.

Маленькие потоки пузырей, которые иногда можно наблюдать поднимающимися в определенных точках поверхности бокала, обязаны своим происхождением каким-либо шероховатостям на стекле, например маленькой неровности; если на такой неровности образуется пузырь, он быстро проходит первые стадии своего развития.

Стремление тел, находящихся под водой, собирать пузыри и подыматься на поверхность недавно было положено в основу важного процесса в металлургии. Руды различных металлов, будучи измельчены, представляют смесь частиц горной породы — например, кварца или различных силикатов — и частиц сернистых соединений металлов. Оказалось возможным обрабатывать эту смесь так, что металлические частицы покрываются тонким слоем масла не смачиваемого водой, тогда как частицы горных пород продолжают оставаться чистыми и вода смачивает их. Смесь затем вспенивается. При этом к частицам, несущим металл, прилипают пузырьки и они всплывают наверх в виде густой пены, порода же остается на дне чана. После этого руда оказывается отделенной от породы.

Есть еще один опыт, который может помочь разъяснению этих явлений. Мы знаем, что вода приподнимается у стенки чистого стеклянного сосуда, в который она налита. Молекулы прилипают к стеклу и как бы ползут вверх по стенке на плечах других молекул, которые также стремятся стать к стенке. Вода между двумя погруженными в нее стеклянными пластинками подымается выше, чем с наружной стороны их. Молекулы, подымающиеся по стенке,

Помогают другим, подымающимся по другой стенке. Это явление называется «капиллярностью». Название это происходит от того, что оно особенно резко выражено в очень тонких «капиллярных» трубках. В тонком канале вода подымается на большую высоту. Например в трубке с диаметром

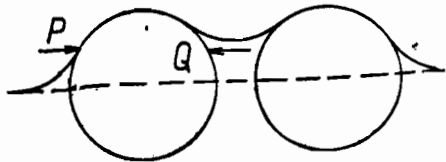


Рис. 45. Пузыре стеклянные шарики, плавающие в воде, стремятся сблизиться.

приблизительно в один миллиметр вода подымается на двадцать пять миллиметров. Пустив на поверхность воды маленький пустой стеклянный шарик, увидим, что вода подымается вокруг него. Если сблизить два таких стеклянных шарика, то, когда они окажутся на расстоянии друг от друга примерно в один сантиметр, они начнут сами двигаться друг к другу, и чем ближе они будут сходить, тем энергичнее это движение будет происходить.

Для уяснения этого явления рассмотрим рис. 45. Два стеклянных шарика плавают в воде. Давление в точке Q меньше, чем на уровне пунктирной линии, так как Q находится на уровне более высоком, чем пунктир. Давление же на уровне пунктира равно атмосферному, так как эта линия является продолжением свободного уровня жидкости. Таким образом давление на шарик слева, обозначенное буквой P, есть атмосферное давление, тогда как давление с противоположной ему правой стороны, обозначенное буквой Q, меньше атмосферного. Вследствие этого шарик стремится сблизиться.

Пустив в воду два парафиновых шарика или два стеклянных шарика, покрытых парафином, увидим, что они взаимно притягиваются

так же, как и шарик из чистого стекла. Однако механизм этого притяжения несколько иной. Как видно из рис. 46, между шариками теперь образуется углубление в поверхности воды. Легко сообразить, что действующие при этом силы стремятся сблизить шары.

Чистый стеклянный шар отталкивает парафиновый шар.

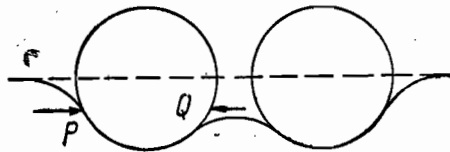


Рис. 46. Парафиновые шарики также стремятся сблизиться.

Это явление несколько сложнее, но и его ход можно проследить на рис. 47, который показывает, какие силы действуют в этом случае.

Если сосуд, содержащий воду чист и вода подымается у его стенки, то чистые стеклянные шарики притягиваются к стенкам так же, как они притягиваются друг к другу. Парафиновые же шарики избегают стенок сосуда. Если теперь осторожно наполнять сосуд водой до тех пор, пока она не дойдет до самых краев и там не станет загибаться вниз к краю сосуда (раньше она загибалась по стенке вверх), то стеклянные шарики оторвутся от стенок и поплывут к середине, а парафиновые поплывут к стенкам, где и остановятся.

Все рассмотренные нами здесь факты иллюстрируют один общий принцип, характеризующий жидкое состояние тел, а именно:

или сцепления между атомами и молекулами в жидкостях достаточны лишь для того, чтобы держать их постоянно вместе, и недостаточны для того, чтобы связать их в одно твердое, неизменяемое тело.

Важно помнить, что молекулы сцепляются друг с другом некоторыми определенными точками: некоторая часть молекулы способна крепко удерживать некоторую определенную часть другой молекулы. Может оказаться, что, соприкасаясь другими частями, они вовсе не будут склонны к взаимному сцеплению.

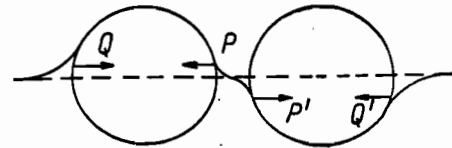


Рис. 47. Слева стеклянный шарик, справа — парафиновый. Шары отталкиваются.

ЛЕКЦИЯ ЧЕТВЕРТАЯ

О ПРИРОДЕ КРИСТАЛЛОВ. АЛМАЗ

Отличие твердого тела от жидкого и газообразного. Кристалл. Анализ кристаллов при помощи рентгеновых лучей. Отражение рентгеновых лучей от кристаллических решеток. Структура кристалла алмаза. Строение некоторых органических молекул.

Мы видели, что в тех случаях, когда собственное движение атомов имеет перевес над их взаимным притяжением, атомы и молекулы существуют независимо друг от друга и образуют газ. Далее, мы видели, что когда силы притяжения больше или движение слабее, то молекулы сцепляются вместе и образуют жидкость. Мы предполагали, что в этом состоянии связи между молекулами настолько слабы, что с достаточной легкостью допускают изменение положения молекулы.

Мы должны теперь рассмотреть то состояние, при котором силы взаимного притяжения атомов получают окончательный перевес, связи между молекулами становятся более многочисленными и действуют сильнее. В этом случае каждая молекула оказывается привязанной к своим соседям многими точками и прикрепленной к своему месту. Таким образом образуется твердое тело.

Между молекулами существуют значительные различия в отношении их формы и сил взаимодействия с другими молекулами. Если силы велики, то необходимы очень сильные движения молекул, чтобы удержать их от образования твердого тела. Иными словами, точка плавления относительно высока.

Атомы веществ, подобных алмазу или вольфраму (из которого готовят нити электрических лампочек), так тесно связаны друг с другом, что приходится поднять температуру до нескольких тысяч градусов, чтобы молекулы ослабили свои связи. Вещества вроде масла или нафталина остаются твердыми лишь при обыкновенных температурах. Другие вещества, как, например, углекислота

и в еще большей степени кислород и водород, требуют громадного понижения температуры, прежде чем они образуются в твердое состояние. Все дело заключается, таким образом, в балансе двух противоположающихся факторов — движения и взаимного притяжения.

При этом молекулы нельзя представлять себе в виде тела неопределенной формы, являющегося центром действия сил, направленных во все стороны. Когда две молекулы сходятся вместе, они могут вовсе не сцепиться и могут сцепиться очень прочно в зависимости от того, как они обращены друг к другу. Каждый сорт молекулы, мы могли бы сказать, имеет определенное устройство; однако при употреблении этих слов следует помнить, что выяснение их значения требует особой осторожности, если мы глубже вникнем в суть дела. Молекулы соединяются вместе таким образом, как если бы на них были особенные точки, предназначенные для сцепления. Взаимодействие между молекулами большею частью нельзя сравнить с притяжением двух противоположно заряженных тел; скорее его можно уподобить соединению склепанных друг с другом частей механического сооружения, например железного моста. Совершенно так же, как в железном мосте отдельные части должны быть известным образом расположены, чтобы заклепки можно было поместить на свои места, так и две молекулы твердого вещества стремятся стать друг к другу определенными частями, причем эти части сцепляются между собой со значительной прочностью.

Может существовать несколько способов соединения одних и тех же молекул, следовательно, они могут давать различные структуры. Например, существуют различные виды кварца, серы и других веществ. Часто случается, что один способ расположения молекул имеет место при одной температуре, а другой — при иных температурных условиях.

Следствием указанных здесь свойств является то, что если молекулы содержат много атомов и потому имеют сложную структуру и причудливую форму, то образованные из них тела оказываются ажурными. Такое тело можно сравнить с мостом, построенным из железных арок и ферм; вся постройка является прозрачной, так как каждая ее составная часть имеет совершенно особую форму, большей частью узкую и длинную, и связана с соседними частями лишь в определенных точках. Большинство органических веществ, вроде нафталина или одного из твердых

парафинов, имеет такую сложную структуру и ее ажурность является причиной малой плотности этих веществ. Лишь немногие из органических соединений тяжелее воды.

Когда молекулы менее сложны и не имеют особо причудливой формы, они могут укладываться гораздо плотнее, и мы будем иметь относительно тяжелые вещества. Таковы будут молекулы рубина или железных пиритов, содержащих лишь небольшое число атомов. Молекулы еще более тяжелого золота или железа содержат лишь по одному атому (в этом случае термины атом и молекула совпадают).

Бесконечное разнообразие свойств твердых тел, существующих в мире, в действительности выражает бесконечное разнообразие способов, которыми можно связать атомы и молекулы между собой, а также различие в прочности этих связей. Невозможно понять свойств даже самых обычных материалов, не зная расположения атомов и молекул в них и не определив величины и свойств сил, удерживающих атомы вместе.

В течение последних лет открытие лучей Рентгена дало нам возможность глубоко заглянуть в строение твердых тел, выяснить детали и план их строения. Мы значительно продвинулись вперед к цели наших исследований, т. е. к такому состоянию наших знаний, при которых мы сможем сказать, почему материал, состоящий из таких-то атомов, имеет такие-то свойства: плотность, прочность, упругость, теплопроводность, электропроводность и т. п.; иными словами, мы сможем сказать, почему этот материал реагирует определенным образом на электрические силы, на свет или теплоту. Мы еще не можем сказать, как далеко удастся пойти по этому пути, но можно быть уверенным, что эти новые знания позволят глубже проникнуть в природу явлений, которыми сопровождается воздействие на материальные предметы — сознательное или бессознательное — в каком-либо техническом процессе или в отправлениях живого организма.

Новый метод особенно применим к твердым телам. Метод этот основан на комбинированном использовании кристаллов и рентгеновых лучей, и мы должны остановиться на обоих его сторонах.

Начнем с кристаллов. Представим себе, что медленно охлаждающаяся жидкость достигла того состояния, о котором я только что говорил, т. е. интенсивность теплового движения настолько уменьшилась, что атомы начинают связываться друг с другом твердой связью. Они распо-

жаты один возле другого таким образом, что полностью будет компенсироваться стремление различных точек одного атома притянуться к различным точкам другого. Две молекулы могут быть связаны между собой в одной точке и при этом совершать все уменьшающиеся колебания относительно друг друга, пока, наконец, между ними не возникнет какая-то новая связь; это может произойти совершенно внезапно. Далее, может возникнуть третья связь, причем она либо соединит нашу молекулу с первыми двумя, либо с какой-то третьей. В конце концов молекула окажется укрепленной в некотором определенном положении.

Таким образом по мере охлаждения жидкости молекула за молекулой занимает свое место и связывается с другими молекулами: твердое тело, в которое превращается жидкость, растет.

Твердое тело может быть получено и иначе — оно может выпадать из раствора. При этом растворитель испаряется и молекулы растворенного тела встречаются между собой более часто, а это способствует их соединению друг с другом.

Когда жидкость совершенно исчезает, растворенное вещество нацело переходит в твердое состояние. Если испарение было достаточно медленным, то молекулы в своих странствованиях по раствору приходят к местам, где уже несколько других молекул сцепились вместе и присоединяются к ним, как бы спокойно устраиваясь некоторым определенным образом или же отказываясь занять свои места, пока они не повернутся друг к другу правильным образом.

Совершенно ясно, что подобные обстоятельства обуславливают строгую правильность в расположении атомов. Пусть мы имеем плоское тело формы А (рис. 48) и пусть оно имеет четыре центра притяжения — два положительных и два отрицательных, расположенных, как указано на рисунке. Если бы нам нужно было расположить некоторое число таких тел по плоскости и соединить их так, чтобы положительные и отрицательные центры притяжений лежали друг около друга, то мы получили бы расположение, подобное изображенному на рис. 48.

Какое бы расположение мы ни избрали, мы, конечно, в результате получим некоторую правильность, как это;

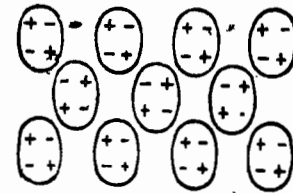


Рис. 48.

например, имеет место на рисунке. И, повидимому, природа действует таким же образом: молекулы располагаются одна около другой правильными рядами. Это обстоятельство имеет громадное значение. Порядок и правильность являются следствием полной компенсации всех сил притяжения, которые действуют между атомами и молекулами. Когда такое твердое тело выросло до таких размеров, что его можно рассмотреть в микроскоп или даже простым глазом, то правильность расположения атомов проявляется в самой форме твердого тела: возникает то, что мы называем кристаллом.

Кристалл ограничен рядом плоских поверхностей, часто очень гладких на вид; поэтому, кристалл производит на зрителя очаровывающее впечатление сверканием и блеском своих граней и весьма совершенной правильностью формы. Природа рассказывает нам, как она располагает молекулы если они предоставлены самим себе. У природы есть только два или три основных образца для расположения; и когда такое сочетание закончено, оно имеет все свойства целого кристалла, так как далее может повторяться лишь такое же расположение. Изучение кристаллов вводит нас в самые тайники строения тел. Все это мы можем увидеть только с помощью очень сильных очков, которыми являются методы исследования, основанные на применении лучей Рентгена.

Некоторые формы кристаллов изображены на рис. 49.

Есть три ступени в сочетаниях частиц, образующих материю: во-первых, отдельный атом, как мы встречаем его, например, в газе гелие; следующая ступень — молекула, какую изучают химики, и наконец, кристаллическая структура которую мы изучаем теперь с помощью лучей Рентгена.

Например, существуют отдельные атомы кремния или кислорода. Молекула окиси кремния содержит один атом кремния и два атома кислорода, расположенные, без сомнения, некоторым определенным образом. Наконец, существует вещество кварц, каждая кристаллическая единица которого состоит из трех молекул окиси кремния, расположенных опять-таки некоторым совершенно определенным образом; расположение это, как мы теперь знаем, имеет винтообразный характер. Кристалл кварца состоит из неисчислимого количества таких единиц. Каждая такая единица или ячейка имеет все свойства кварца и в действительности является им, но отдельная

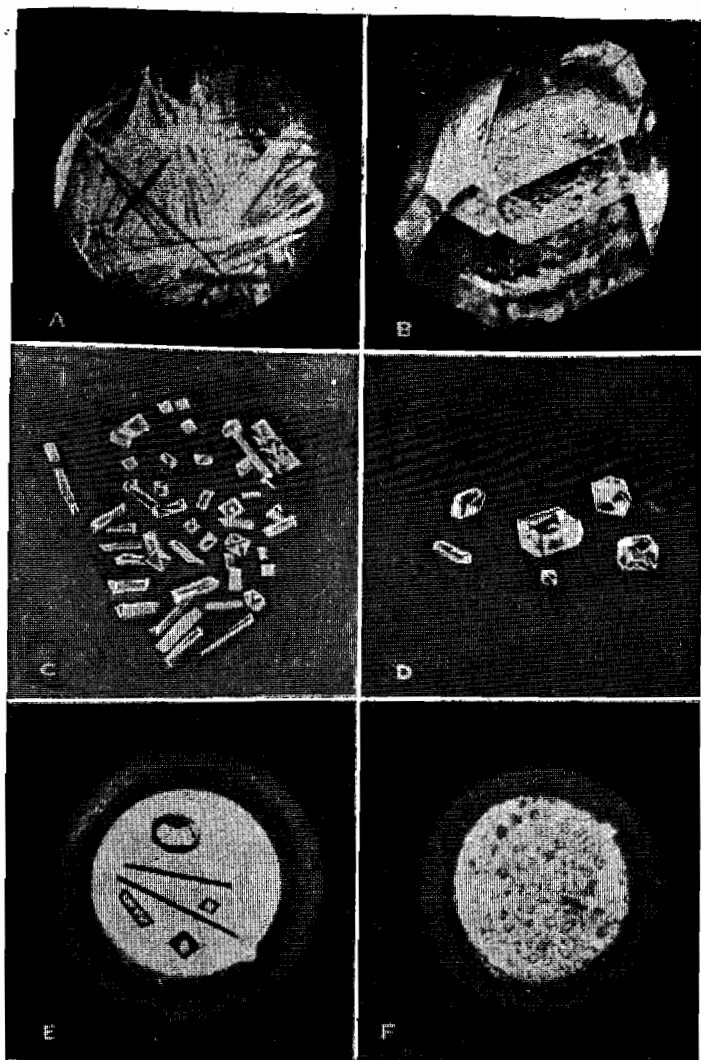


Рис. 49. Кристаллические формы.

A — кристаллы серного ангидрида, полученные из его паров в стеклянном сосуде; B — эритритоловые кристаллы, выпавшие из раствора; C — хлористый аммоний; правильные и искаженные кубические кристаллы из раствора, содержащего мочевины; D — кристаллические формы: аверцит, кокозит; E — кристаллические формы: ализарин, рубидиевые квасцы, хлористый натр, сернокислая соль аммония и кобальта, фталевая кислота; F — хлористый аммоний; кристаллы октаэдрические и кубические из раствора, содержащего мочевины.

молекула окиси кремния еще не представляет и варца. Так, одним из наиболее известных свойств кварца является его способность вращать плоскость поляризации света, и это свойство связано с «винтовым строением» элементарной ячейки кристалла, состоящей из трех молекул.

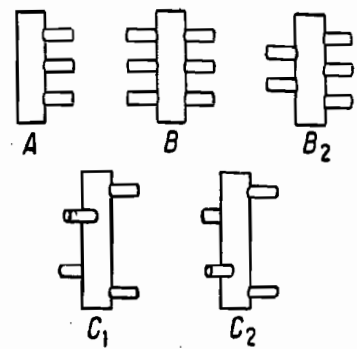


Рис. 50. Модель винтовой структуры кристаллов кварца.

которые в свою очередь могут быть вида C_1 или C_2 , называемые обычно правым и левым винтами.

Рентгеновы лучи говорят нам, что ячейка кварца действительно содержит три молекулы, расположенные винтом; с этим открытием находится в полном согласии форма кристаллов кварца. Существуют две разновидности кварца, как показано на рис. 51. В одной из двух разновидностей существует ряд граней x, s, r , расположенных по правому винту, тогда как в другой эти грани расположены по левому винту. Может быть, такая двойственность в расположении является следствием существования двух видов винта, но мы еще не знаем, почему именно эти грани выделяются.

Будем вбивать в круглую палку совершенно одинаковые колышки. Если мы захотим изобразить единичную ячейку одним колышком, то получим расположение типа A (рис. 50). Если единичную ячейку образуют два колышка, то можно получить расположение вроде B_1 или B_2 . С тремя колышками в единичной ячейке мы получим расположения типа C , ко-

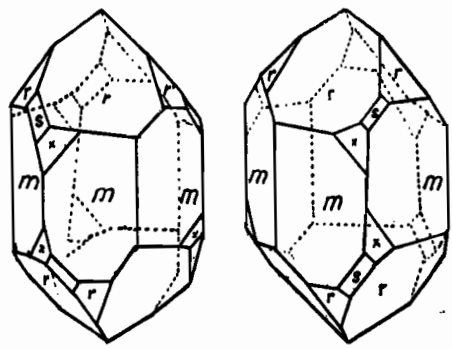


Рис. 51. Кристаллы кварца с правой и левой винтовой структурой.

Кварц или горный хрусталь назывался греками «кристаллос»; это название давали также и льду, так как эти два

вещества часто смешивали. Мы можем поэтому воспользоваться кварцем для выяснения того, что понимают под кристаллической структурой и кристаллической ячейкой.

Мы можем теперь задать себе вопрос: если естественное расположение молекул правильно, почему не все тела являются кристаллическими? На это следует ответить таким образом: во-первых, большой правильный кристалл должен расти из одного центра кристаллизации. Трудно сказать, что именно в известный момент задерживает движение двух или трех молекул охлаждающейся жидкости настолько, что образуется их соединение, дающее начало связыванию всех остальных молекул. Возможно, что главную роль играет самый факт их случайной встречи; или же в жидкость попадает ничтожная частица постороннего вещества, которая и служит основой (затравкой) для кристаллизации; может играть роль и какая-нибудь неровность на стенке содержащего жидкость сосуда. Если в жидкости есть много центров кристаллизации, то вырастет очень много кристаллов, беспорядочно расположенных друг относительно друга, так как мало вероятно, чтобы эти кристаллы росли все в одинаковых направлениях. Эти кристаллы могут быть так малы, что на-глаз тело кажется сплошной массой без всякой правильности форм.

Чтобы получился большой правильный кристалл, молекулы должны иметь только немного мест, где они могли бы нарастать. И кристаллы должны расти очень медленно и спокойно, чтобы у каждой молекулы было время правильно осесть на соответствующем месте. Чтобы это имело место, молекулы должны обладать достаточной свободой движения.

Условия эти ясно выражаются в методах, которые применяются кристаллографами при выращивании кристаллов. Если, например, выращивается большой кристалл соли из раствора, то в растворе подвешивается маленький, хорошо образованный кристалл, причем температура раствора тщательно поддерживается такой, чтобы атомы натрия и хлора лишь постепенно и чрезвычайно медленно лишались своей свободы, когда они встречаются с совокупностью атомов, уже расположенных правильными рядами (т. е. при встрече этих атомов с подвешенным кристаллом). Если раствор слишком горяч, то подвешенный кристалл растворится в ненасыщенном растворе; если раствор очень холоден, то кристаллы образуются во многих точках.

Иногда раствор слегка перемешивается, чтобы различные части его последовательно встречались с подвешенным кристаллом. Основными условиями являются время, покой и такое состояние раствора, в котором он готов выделить растворенное вещество. Это состояние определяется температурой и концентрацией раствора. Наконец, необходимо наличие упомянутой затравки из маленького правильного кристалла и осторожное движение раствора. Мы, конечно, не знаем, как эти или подобные условия удовлетворялись во время роста кристаллов алмаза или рубина, но при выращивании кристаллов в лаборатории эти условия необходимы.

Когда эти условия удовлетворены только частью, может получиться беспорядочная масса мелких кристалликов. Одного этого обстоятельства достаточно для объяснения кажущейся редкости кристаллов. Кроме того, следует помнить, что многие тела чрезвычайно сложны и состоят из различных веществ, каждое из которых имеет свою собственную кристаллическую форму.

Однако рентгеновы лучи показывают нам, что кристаллы встречаются в природе не так редко, как можно было бы думать. Даже в тех случаях, когда отсутствуют видимые признаки кристаллического строения, природа пыталась расположить атомы в правильном порядке. До сих пор мы не могли обнаружить этой правильности, так как наши средства были для этого недостаточны. Именно эта правильность и явилась, как мы увидим, одной из причин успеха новых методов анализа.

Обратимся теперь к рассмотрению лучей Рентгена. Мы выясним сперва в общих чертах, почему именно лучи Рентгена оказались способными помочь нам в разрешении указанной задачи.

Лучи Рентгена отличаются от световых лучей лишь длиной волны¹. Все длины световых волн, посылаемых солнцем, электрической лампой или свечой и воспринимаемых нашим глазом, по величине заключаются в небольшом промежутке. Наибольшая длина волн равна приблизительно восьми стотысячным сантиметра, тогда как наиболее короткие видимые волны вдвое меньше. Для целей, которым эти волны служат, указанные размеры как раз подходят. Вспомним, что когда мы видим какой-

¹ Длиной волны называется расстояние между двумя соседними «гребнями» волны.

либо предмет, то это происходит потому, что мы замечаем те изменения, которые этот предмет производит в свете, идущем от какого-либо источника и достигающем нашего глаза, проходя через этот предмет.

Наши глаза и мозг долгим упражнением достигли замечательной ловкости в обнаружении и истолковании этих изменений. Нас, однако, может постичь неудача, если предмет чересчур мал. Это произойдет не только потому, что малый предмет производит в свете малые изменения, но и сама природа этого действия меняется в том случае, когда размеры объекта, примерно, той же величины, что и длины волн или даже меньше.

Представим себе, что мы гуляем по берегу моря и наблюдаем набегающие на берег волны. Во время прогулки мы подходим к месту, где сила волн меньше, и, отыскивая причину этого, мы замечаем риф, выступающий из моря и загораживающий побережье. Мы имеем в этом случае явление, подобное световой тени: далекий шторм, поднявший волны, можно сравнить с солнцем, берег, о который ударяют волны — с освещенной землей, а риф — с тучей, отбрасывающей тень. Тень помогает нам обнаружить тучу, а затишье на берегу заставляет подозревать присутствие рифа. Размеры рифа, вероятно, гораздо больше длины волны. Если бы вместо рифа стоял столб, вбитый в дно моря и выступающий на поверхность, эффект был бы слишком мал, чтобы его можно было наблюдать.

Даже и в том случае, если бы число столбов, вбитых подобным образом, было настолько велико, что общий их эффект равнялся бы действию, производимому рифом, получающаяся тень ничего не сказала бы нам об отдельном столбе. Диаметр столба чересчур мал по сравнению с длиной волны, и столб не может произвести какого-либо постоянного изменения в волне: волна проходит мимо столба, замыкаясь за ним снова, и на этом все действие кончается. Но если бы море было спокойно, если не считать небольшой ряби, вызываемой ночным ветром, то каждый столб мог бы «отбросить тень», причем эта тень сохранялась бы, по крайней мере, на небольшом расстоянии с наветренной стороны столба. Длина волн ряби меньше диаметра столба, и потому каждый столб дает свою тень.

Совершенно таким же образом световые волны, проходя мимо молекул, много меньших их собственной длины,

не получают никаких изменений, которые могли бы дойти до нашего глаза и сознания и могли бы быть замечены. Таким образом отдельные молекулы не могут вызвать эффекта, заметного для глаза. И совершенно бесполезно пытаться побороть это затруднение при помощи инструментов. Микроскоп увеличивает нашу способность замечать малые предметы: с его помощью мы можем обнаруживать предметы в тысячу раз меньше тех, которые можно заметить невооруженным глазом. Но микроскоп уже не сможет помочь нам, если мы попытаемся рассматривать предметы тех же размеров, что и длины волн света. Никакие технические усовершенствования его уже не поведут нас дальше.

Длина волн лучей Рентгена, примерно, в десять тысяч раз короче длины волн обыкновенного света, и если только найти достаточно чувствительный способ для их обнаружения, который сможет заменить наш глаз, то лучи Рентгена помогут нам проникнуть в десять тысяч раз глубже в тонкости структуры вещества. Они приводят нас как раз в мир атомов и молекул, которые в различных направлениях имеют размеры нескольких стомиллионных долей сантиметра; такого же порядка и длины волн лучей Рентгена. Одним словом, открытие рентгеновых лучей увеличило остроту нашего зрения в десять тысяч раз, и мы можем теперь «видеть» отдельные атомы и молекулы.

Нам нужно теперь применить рентгеновы лучи к исследованию кристаллов, и мы опять рассмотрим вопрос сперва в общих чертах. Хотя отдельная молекула и оказывает влияние на рентгеновы лучи совершенно так же, как отдельный столб отбрасывает тень при падении на него тонкой ряби, но все же единичный эффект слишком мал. В кристалле, однако, имеется громадное количество молекул, расположенных правильными рядами, и оказывается, что когда группа волн рентгеновых лучей падает на кристалл, действия отдельных молекул складываются и делаются заметными.

Мы опять воспользуемся аналогией. Если солдат делает движение винтовкой со штыком, то отблеск солнца на штыке будет незаметен на расстоянии мили от него: он слишком мал. Но если целый отряд людей, марширующих в одном направлении сомкнутым строем, сделал бы одно и то же движение в одно и то же время, то суммарный эффект был бы легко заметен и на далеком расстоянии.

Малая длина волны рентгеновых лучей дает возможность каждому атому произвести на них некоторое действие, а правильность расположения атомов в кристалле складывает эти действия вместе.

Теперь мы рассмотрим более подробно, каким образом свойства рентгеновых лучей и свойства кристаллов сочетаются в новом методе анализа.

Мы видели, что атомы и молекулы в кристалле расположены правильными рядами и даже нашли причины этого явления. Пусть мы стоим перед оклеенной обоями стеной

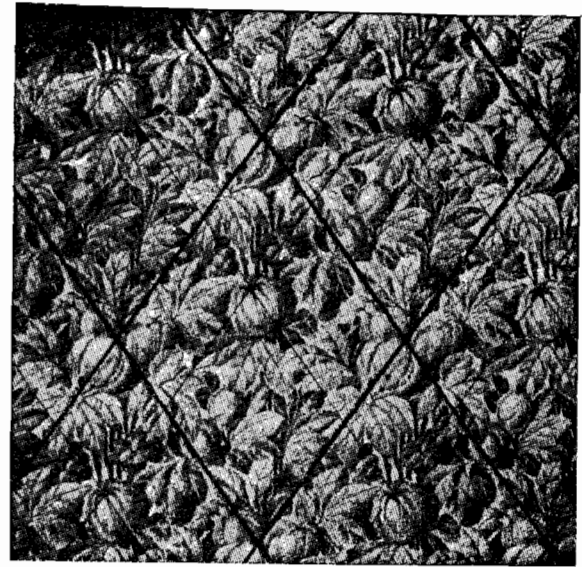


Рис. 52. Рисунок обоев.

Сетка рисунка может быть дана двумя способами: а) толстыми и б) тонкими линиями. Вид и состав каждой ячейки обеих сеток один и тот же, хотя узлы сеток выбраны различно.

комнаты и рассматриваем узор на обоях. Он представляет повторения некоторой единичной ячейки (рис. 52). Будем отмечать какую-либо определенную точку рисунка, где бы она ни встречалась. Если нельзя сделать действительной отметки, то достаточно отметить подобные точки мысленно. Легко обнаружить, что метки лежат на ромбовидной сетке и сетка эта имеет одинаковую форму, какую бы точку рисунка не выбрать для отметки. На

различных обоях ромбы будут иметь различные размеры и форму, хотя всегда четыре стороны ромба равны между собой; ромб, наконец, может оказаться квадратом. Весь рисунок из отмеченных точек можно назвать сеткой. Каждый ромб содержит единичную ячейку нашего образца со всеми его деталями.

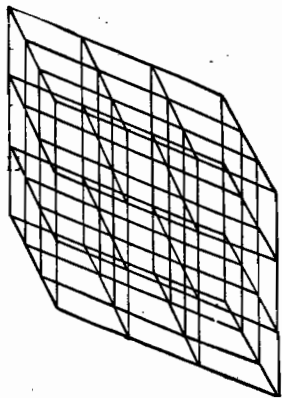


Рис. 53. Пространственная решетка.

Пространственное расположение единичных ячеек кристалла совершенно подобно расположению единичных элементов рисунка обоев на стене с той только разницей, что плоская решетка заменена пространственной (рис. 53). Каждая маленькая ячейка решетки ограничена шестью гранями, причем каждые две противоположные грани параллельны друг другу. Ячейка может иметь различные длины ребер и различные углы; наиболее простая и правильная форма ячейки — куб. Каждая

клетка содержит один полный единичный элемент во всех его деталях, но не больше: она представляет единичный кристалл, обладающий всеми свойствами наблюдаемого кристалла, как бы последний ни был велик. Например, в случае кварца ячейка имеет вид, изображенный на рис. 54, и содержит три молекулы окиси кремния. Как мы увидим, это обстоятельство, равно как и размеры единичной ячейки, могут быть обнаружены при помощи лучей Рентгена. Но гораздо более трудной задачей является обнаружение расположения атомов и молекул внутри ячейки.

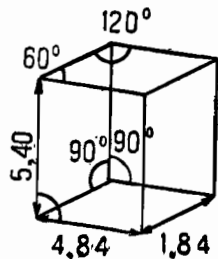


Рис. 54. Размеры и форма ячейки кристалла кварца (в сто-миллионных долях сантиметра).

Допустим, что мы оказались в состоянии заглянуть внутрь кристалла вдоль одного из ребер рис. 53 и можем изобразить виденное, примерно, так, как показано на рис. 55. Вокруг каждой точки решетки группируется по несколько атомов; эту группировку мы изображаем совершенно произвольной системой кругов на рисунке. Вид и состав такой группы не имеют никакого значения: она может содержать любое количество атомов или молекул. Существенно лишь то, что с каждой точкой

решетки связаны совершенно такие же группы атомов, как и на рисунке на обоях. Пусть группа рентгеновых волн падает на кристалл; на рис. 56, А волны эти изображены линией *WW* и параллельными ей прямыми.

Когда волны эти достигают ряда атомных групп, расположенных вдоль линии *AA* (на рис. 56, А группы эти изображены просто точками), новый ряд таких же волн распространяется от каждой группы, хотя волна в целом проходит мимо; совершенно также шесты, вбитые в дно моря, оказываются центрами новых волн, когда через них проходит волна. На небольшом расстоянии от ряда *AA* эти малые возмущения складываются вместе в связанную систему волн, изображенную параллельными

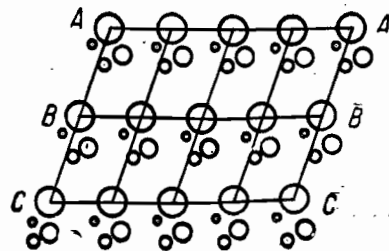


Рис. 55. С каждой точки решетки связана группа атомов.

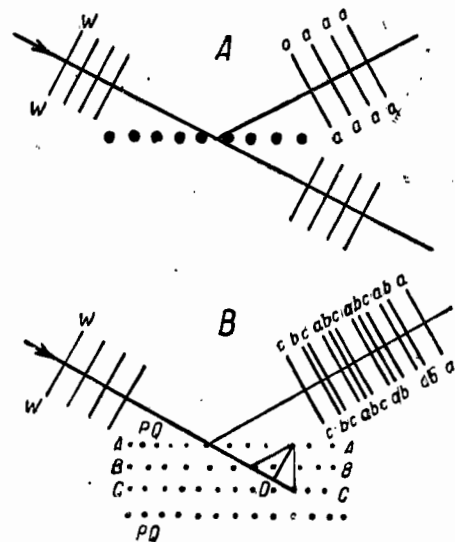


Рис. 56. Отражение рентгеновских лучей от кристаллических решеток.

прямыми *aa*. Явление аналогично отражению звука от ряда столбов (палисада или натянутого куска материи). В обоих случаях большая часть волн проходит мимо, но часть отражается, образуя с отражающим слоем тот же угол, что и падающие волны.

Отраженные волны образуют группу с такой же длиной волны, как и у падающих, но отраженные волны гораздо слабее: можно было бы думать, что отражение даст просто беспорядочную рябь, но это не так. В непосред-

ственной близости от атомных групп есть некоторый кажущийся беспорядок, но немного далее в направлении отражений мелкие волны сливаются в устойчиво двигающийся ряд волн *aa* и т. д.

За рядом атомных групп AA лежит ряд BB , совершенно подобный первому (рис. 56, B). Первоначальные волны, которые, как показывает опыт, мало изменяются при прохождении через ряд AA , падают, далее, на ряд BB , и здесь опять имеет место отражение, причем новые отраженные волны изображены рядом параллельных линий bb . Далее, лежит ряд CC , образующий группу волн cc , еще далее ряд DD , дающий отраженные волны dd , и т. д.

Вообще говоря, линии aa , bb , cc не совпадают друг с другом. Но если длина волны лучей, расстояние между AA и BB (в действительности это плоскости, видимые с краю), и угол, под которым волны встречают плоскости

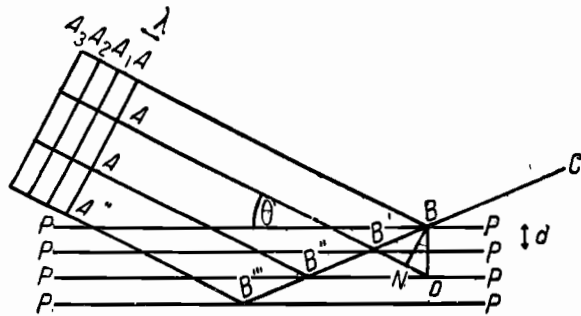


Рис. 57. Закон отражения рентгеновских лучей.

AA , BB , подобраны определенным образом, то линии aa , bb , и т. д. совпадают между собой. На практике в отражении участвуют тысячи отражающих плоскостей, и если все отражения подогнаны друг к другу точно таким образом, то общее отражение достаточно сильно.

Если условия подобраны недостаточно правильно, то отражения, складываясь вместе, не дают заметного эффекта; гребни некоторых волн (или то, что соответствует гребням морских волн) попадают во впадины других и при этом происходит взаимное уничтожение волн. Подбор условий должен быть исключительно точным ввиду того, что отражающих плоскостей, расположенных одна за другой, очень много.

Легко найти формулу, выражающую условия правильного расположения опыта и, следовательно, условия отражения. На рис. 57 линия $A'B'B'$ должна быть длиннее

линии AB на целое число длин волн. Если λ — длина волны, d — расстояние между плоскостями и θ — указанный на чертеже угол, то

$$n\lambda = A'B'B' - AB = A'B'D - AB = DN = 2d \sin \theta,$$

где n какое-либо целое число.

Как я уже сказал, читателю нет надобности вдумываться в вычисления, из которых вытекает основная формула, определяющая эти явления.

Если направление первичных лучей постепенно изменяется по отношению к плоскости AA , BB и т. д., то заметного отражения не будет, пока не окажется достигнутым подходящий наклон лучей. Как только этот наклон будет достигнут, сейчас же появляется отраженная волна. Угол наклона при этом можно измерить. Если, как это всегда имеет место при анализе кристаллов, длина волны лучей известна, то оказывается возможным измерить расстояние между плоскостями.

Отраженные лучи нельзя, конечно, обнаружить глазом, но они могут оставить след на фотографической пластинке или же дать о себе знать иными способами, на которых мы здесь останавливаться не будем.

Прибор, построенный для этих опытов, называется спектрометром для X-лучей (лучей Рентгена); он измеряет углы, при которых имеет место отражение. Отсчеты такого спектрометра прежде всего используются для определения расстояний между плоскостями, а затем — для нахождения углов между различными плоскостями кристалла. Можно, например, измерить не только расстояния между плоскостями AA , BB , но также и между плоскостями PP , QQ (рис. 56, B) и угол между AA и PP . Таким образом можно определить размеры и форму единичной элементарной ячейки кристалла.

Определение из опыта плотности кристалла большей частью не представляет затруднений, и тогда мы можем найти вес вещества, заключенного в единичной ячейке кристалла. Так как мы всегда знаем вес одной молекулы, то легко узнать, сколько молекул заключается в единичной ячейке; обычно это очень небольшое число. Более того, измерения со спектрометром для рентгеновых лучей дают нам некоторые указания относительно расположения молекул, составляющих единичную ячейку. Будь у нас возможность правильно толковать наблюдения, мы могли

бы узнать из этих измерений еще больше, но в настоящее время мы еще не имеем достаточных знаний для этого. Мы только еще изучаем новый язык.

Наиболее важным обстоятельством, о котором следует помнить, является то, что с помощью рентгеновых лучей мы узнаем расстояние от некоторого слоя, в котором расположены атомные группы, до следующего слоя атомных групп, совершенно подобного первому.

Это расстояние тождественно с расстоянием между противоположными гранями единичной ячейки. Единичную ячейку можно изобразить различными способами, соединяя между собой различные углы пространственной решетки. Поэтому в кристалле можно измерить не только три различных элементарных расстояния (т. е. расстояния по ребрам элементарной решетки), но и произвольное число их; обычно нам достаточно определить лишь немногие из них.

В некоторых случаях анализ кристаллов зашел так далеко, что мы точно знаем место каждого атома в единичной ячейке. Для получения таких результатов пришлось воспользоваться не только рентгенографическим анализом, но и многими другими методами химии и физики. Во всяком случае я не стану останавливаться на дальнейших подробностях: общее объяснение, приведенное выше, достаточно для уяснения методов, которыми пользовались в этих исследованиях.

Однако некоторые из полученных результатов, я думаю, представят для нас интерес.

Прежде всего рассмотрим алмаз. Это не только прекрасная и ценная игрушка: из структуры его мы можем почерпнуть много выводов, относящихся к основным истинам химии, особенно органической. Алмаз построен всего только из одного атома — атома углерода, но атом этот представляет для нас жизненный интерес. Углерод — одна из основных составных частей пищи и топлива, красок и взрывчатых веществ, нашего собственного тела и многого другого.

Структура алмаза замечательно проста, хотя, как и всякое пространственное расположение, ее трудно уловить сразу. Мы так привыкли рисовать на плоскости, бумага и карандаш так удобны, что наш ум легко схватывает все детали плоского рисунка. Но мы не можем рисовать в пространстве, мы можем лишь строить модели с большой затратой времени и энергии. Поэтому наша способность представлять себе пространственные расположения

развивается за отсутствием практики слабо. Некоторые имеют естественную способность мыслить в трех измерениях, другие, изучая кристаллографию, научились этому. Большинство же испытывает громадное затруднение при первых попытках представить себе пространственное расположение атомов и молекул кристалла. Тем не менее, структура алмаза, изображенная на рис. 58, будет ясна, если только немного вдуматься в нее.

Черные шарики представляют расположение атомов углерода (понятно, они не могут дать никакого представления о форме или размерах атомов углерода, о которых мы знаем очень мало). Каждый атом углерода расположен в центре тяжести четырех других; эти четыре лежат в вершинах тетраэдра¹, и первый атом, конечно, лежит на одинаковых расстояниях от этих вершин.

Есть основание считать, что связи между этими атомами очень сильны и что по всей структуре существует лишь один тип связи.

В простоте и правильности этой структуры мы должны искать причину того, что алмаз занимает высшее место в шкале твердости. При прижимании алмаза к другому кристаллу атомам последнего приходится давать дорогу атомам алмаза.

Алмаз имеет плоскость спайности². На рисунке она параллельна плоскости стола, на котором стоит модель; существуют четыре таких плоскости, каждая из которых параллельна одной из граней тетраэдра. Модель можно поворачивать так, чтобы она покоилась на каждой из четырех

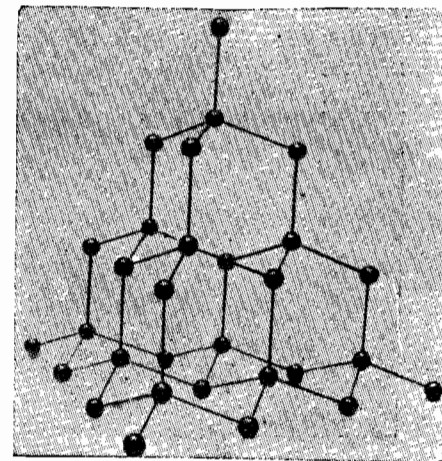


Рис. 58. Модель кристалла алмаза.

¹ Тетраэдр — треугольная пирамида, грани и основание которой являются правильными равными треугольниками.

² Плоскостью спайности кристалла называется та плоскость, по которой он раскалывается.

граней, и она выглядит при этом совершенно одинаково в каждом положении. Расстояние между центрами двух соседних атомов углерода (а значит, и плоскостями спайности) равно 1,54 единиц Ангстрема (эта единица равна одной стотысячной доле сантиметра). То, что именно плоскости, параллельные граням кристалла, являются плоскостями спайности, не удивительно, так как они проходят как раз через вертикальные соединения между горизонтальными слоями, изображенными на рисунке. Каждый такой слой можно назвать вдавленной шестиугольной сеткой. Кристалл можно, конечно, считать состоящим из ряда слоев, параллельных любой из четырех граней тетраэдра, а не обязательно той, на которой он случайно покоится.



Рис. 59. Алмаз Куллимана, расколотый на три части (он имел размеры небольшого кулака).

Существование этих плоскостей спайности хорошо известно шлифовщикам алмазов, которые избавляют себя от лишней работы, используя эти плоскости. В лондонском Тоуэре показывают инструменты, при помощи которых был расколот большой алмаз Куллимана во время его шлифовки. Рис. 59 показывает этот алмаз, расколотый на три части, а на рис. 60 изображены примененные при этом инструменты. Возможно расколоть алмаз и по другой плоскости, содержащей какое-либо ребро тетраэдра и перпендикуляр к другому ребру, но произвести такой скол очень трудно, и он редко применяется.

Рассматривая строение алмаза, мы не можем не заметить удивительной вещи: в каждой части модели атомы

углерода располагаются в кольца шестиугольной формы. Если вынуть одно из этих колец из модели, оно имеет вид, изображенный на рис. 61. Это — правильный шестиугольник, если смотреть сверху, но он не плоский.

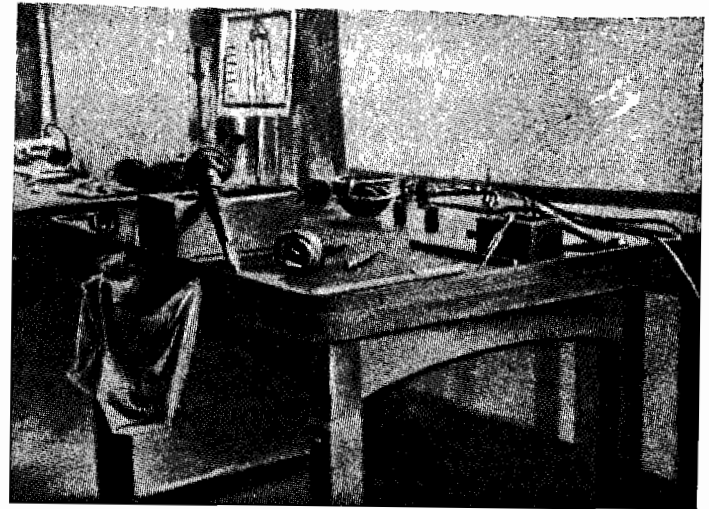


Рис. 60. Стол и инструменты для раскалывания алмазов.

Кольцо из шести атомов углерода занимает совсем исключительное место в химии. И хотя никто не видел этого кольца, но химики угадали его существование при помощи весьма остроумных и интересных соображений.

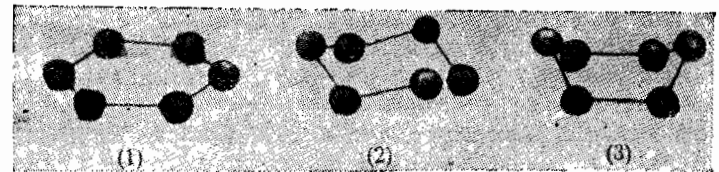


Рис. 61. Возможные формы углеродного кольца.

Даже те из нас, кто не знает химии, не испытают особых затруднений, чтобы понять кое-что из этих соображений.

Еще в середине прошлого столетия было, например, хорошо известно, что можно образовать некоторые моле-

кулы, основная структура которых состоит из ряда или цепочки атомов углерода, причем каждый атом углерода мог быть окружен четырьмя атомами водорода, связанными с ним. Это было известно потому, что молекула не могла принять в себя более ни одного атома водорода: она была полна, или, как говорят химики, насыщена, так как каждый отдельный атом углерода насыщен, когда с ним связаны четыре других атома; например, это имеет место в болотном газе или метане (CH_4). Относительное число атомов углерода и водорода было как раз такое, какого следовало бы ожидать согласно этой гипотезе. С шестью атомами углерода должны быть связаны четырнадцать атомов водорода, как показано на рис. 62, и опыт показал, что это действительно так. Такие вещества называются «парафинами» (речь о них будет в следующей главе). Различные парафины имеют различное число углеродных атомов в цепочке.

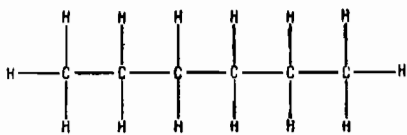


Рис. 62. Гексан.

То вещество, которое изображено на рис. 62, называется гексаном.

В 1825 г. Фарадей выделил из остатков от возгонки светильного газа особое вещество, которое

он назвал двууглеродистым водородом; теперь его называют бензолом. Несколькая капель первого препарата, полученного Фарадеем, и сейчас хранится в Королевском институте в Лондоне как историческая реликвия. Молекула этого вещества содержит, подобно гексану, шесть атомов углерода и, кроме того, шесть атомов водорода. К ней можно присоединить еще шесть атомов водорода, и тогда новая молекула в химическом отношении почти совершенно подобна гексану. Но она не может иметь ту же структуру, что гексан, так как у нее двумя атомами водорода меньше.

Загадка эта была разрешена в 1867 г. Кекуле, который указал, что остов молекулы бензола представляет кольцо (а не цепочку) из шести атомов углерода; мы можем себе представить его происходящим из цепочки рис. 62 благодаря удалению двух атомов водорода, расположенных по концам; затем цепочка изогнута так, что концы ее соединены вместе. Мы получаем, таким образом, структуру, изображенную на рис. 63. Химическое название этого вещества гексагидробензол. Сам бензол имеет лишь

по одному атому водорода у каждого угла шестиугольника.

Углеродная цепочка и углеродное кольцо являются основаниями двух больших подразделений органической химии. Цепочкообразные молекулы встречаются не только среди парафинов, но также и в жирах, маслах, мыле и многих других важных веществах. Кольцо лежит в основе многих тысяч известных молекул, в том числе красок, взрывчатых веществ, лекарств (например хинин и сахарин) и т. п.

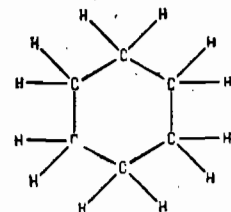


Рис. 63. Гексагидробензол.

Представление о замкнутом шестиугольном кольце ведет непосредственно к простому и удобному объяснению ряда замечательных химических фактов, из которых мы остановимся на одном примере. Молекула бензола состоит из шестиугольного кольца углеродных атомов с одним атомом водорода у каждого угла. Каждый углеродный атом имеет в этой молекуле лишь трех соседей, но он может присоединить еще четвертого, так что в общем оказывается место еще для шести атомов или групп атомов, которые можно присоединить по углам кольца. Но молекула бензола может прекрасно существовать и без них. Беря молекулу бензола как она есть, химики нашли, что можно изменять ее структуру, удаляя один из водородных атомов и заменяя его другим атомом или группой атомов. В одном из хорошо известных и важных случаев удаляется один атом водорода и взамен его помещается группа из одного атома углерода и трех атомов водорода; группа эта известна под названием метиловой. Новая молекула имеет структуру, изображенную на рис. 64, и называется толуолом. Это очень важное

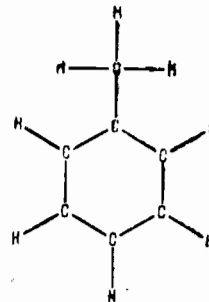


Рис. 64. Толуол.

вещество при обыкновенных температурах представляет жидкость. Второй атом водорода может быть также удален от углеродного кольца и заменен, например, бромом; новое вещество называется бромтолуолом.

Весьма замечательно, что при этом можно получить три различных вещества, все с одним и тем же составом, именно — шесть атомов углерода, четыре атома водорода,

один атом брома и одна метиловая группа, которую мы будем считать неизменной. Как объяснить существование этих трех веществ с совершенно различными свойствами, но с тождественным составом?

Гипотеза о существовании кольца дает непосредственный ответ. Замену водородного атома бромом можно произвести тремя различными способами, изображенными на рис. 65. Атом брома может быть непосредственно рядом с метиловой группой, или через одно место, или через два.

Три таких молекулы имеют различные формы. Поэтому следует ожидать, что и свойства их различны; и нет сомнения, что три эти вещества действительно существуют. Химикам даже удалось выяснить, какому именно веществу соответствует определенное расположение.

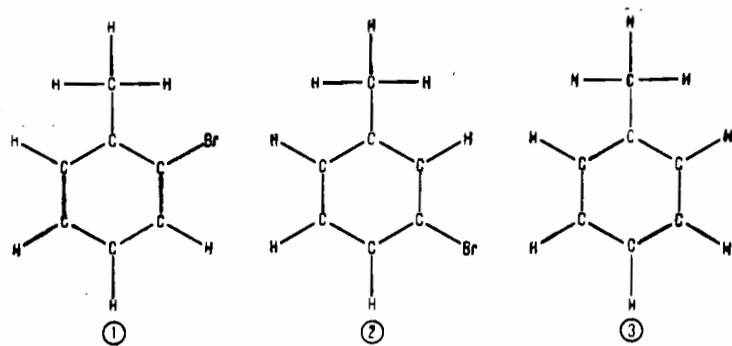


Рис. 65. Бромтолуол.

Можно было бы привести много подобных примеров, но и этого одного достаточно, чтобы показать значение расположения наряду с составом; три описанных молекулы отличаются лишь взаимным расположением тех составных частей, которые поставлены вместо водорода. Методы анализа при помощи рентгеновых лучей особенно удобны для выяснения вопросов подобного рода, так как при помощи их мы измеряем размеры единичной ячейки, в которой расположены две или более молекул; мы можем при этом обнаружить результаты изменения формы молекулы.

Очень интересно отметить, что в цепочкообразных молекулах число углеродных атомов меняется в очень широких пределах; бутиловая кислота имеет, например, четыре атома углерода, тогда как пальмитиновая кислота,

входящая в пальмовое масло и другие вещества, имеет шестнадцать углеродных атомов.

Кольцо из шести атомов углерода встречается чаще, чем всякое другое. Очевидно, оно легче всего образуется и крепче всего по своему строению. Алмаз — единственный из кристаллов, не считая графита, состоящий только из атомов углерода — полон шестиугольных колец.

Естественно допустить, что причина образования такого кольца из шести атомов лежит в структуре алмаза. Но основой этой структуры является просто то, что каждый атом углерода окружен четырьмя другими, расположенными симметрично относительно первого. Две прямых, соединяющих атом углерода с двумя соседними атомами, наклонены друг к другу под углом в $109^{\circ} 28'$.

Если при определенных условиях соединение двух атомов углерода с третьим должно быть всегда таково, чтобы выявлялся этот угол, то наиболее коротким сомкнутым кольцом окажется кольцо из шести атомов (для иллюстрации этого обстоятельства можно самому построить модель: можно достать в большом числе деревянные шарики, употребляемые для изготовления больших пуговиц; в каждом шарике на соответствующих местах просверливаются че-

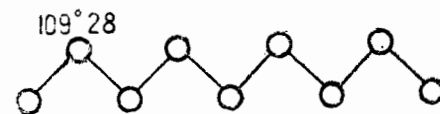


Рис. 66. Цепочка алмаза.

тыре дырочки; в качестве соединений можно воспользоваться, например, иглами от граммофона; таким образом можно построить модель алмаза и многих кольцеобразных и цепочкообразных молекул). Пять атомов углерода могут приблизительно составить кольцо, так как угол пятиугольника равен 108° . Но если угол должен быть равен $109^{\circ} 28'$, то нужно взять шесть атомов и расположить их в виде вдавленного кольца, изображенного на рис. 61, (2). В настоящее время еще трудно с уверенностью сказать, представляется ли кольцо бензольной молекулы всегда вдавленным или оно иногда может быть плоским с углами в 120° , как на рис., 61, (1), или, наконец, оно может иметь форму, изображенную на рис., 61, (3), представляющую другую структуру с тетраэдрическим углом. Опытный материал накапливается, но еще нет решительного ответа на этот вопрос; быть может, встречаются все три формы.

Подобно алмазу, вещество, называемое графитом, состоит исключительно из атомов углерода. Графит гораздо

легче алмаза, плотность его приблизительно 2,30, тогда как плотность алмаза равна 3,52. Ясно, что при переходе от алмаза к графиту произошло какое-то изменение в расположении атомов, причем расстояния между атомами в среднем значительно увеличились. Лучи Рентгена показывают, что это увеличение произошло только в одном направлении.

В графите есть такие же слои, как в алмазе (рис. 67). Если смотреть на такой слой сверху, то он представляется

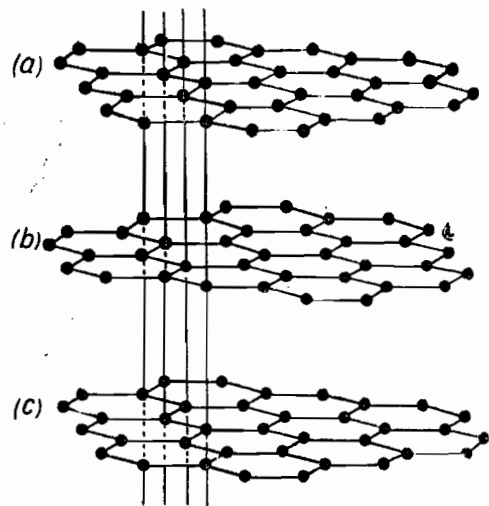


Рис. 67. Атомные слои в кристалле графита.

(а) и (с) подобны во всех отношениях; (b) становится тождественным (а) при повороте в его собственной плоскости на 180° (два прямых угла) около любой из вертикальных осей, показанных на рисунке.

в всяком случае они не ослабли; с другой стороны, связи между отдельными слоями значительно ослабели. Поэтому слои могут легко скользить один по другому, хотя каждый слой в отдельности остается очень прочным. Именно существование этих двух свойств делает графит столь хорошим средством для смазки; существенным является не только склонность слоев к скольжению, но и то, что каждый слой не легко рассыпается в порошок. Если поскользнуться на графитной плите, вроде тех, которые кладутся у очагов, то часть слоев пристает к подошве,

прежней сеткой из шестиугольников; более того — стороны шестиугольников совершенно той же длины. Но расстояния между слоями значительно увеличились, и именно это изменение сделало вещество более легким. Недавние опыты показали, что, повидимому, слои эти сделались более плоскими, так что каждый атом углерода окружен тремя другими, расположенными в одной с ним плоскости. Если связи между атомами в каждом слое вообще изменились, то во

и часть остается на камне: эти слои и скользят друг по другу. Любопытно, что такое незначительное изменение обращает вещество, принимаемое за образец твердости, в одно из лучших смазочных средств.

Другой ряд фактов, подтверждающих мысль о реальности существования углеродного кольца, размеры которого можно измерить и предвидеть, дает сравнение свойств двух кристаллов — нафталина и антрацена. Эти вещества имеют громадное значение в производстве красок; первое из них применяется при изготовлении искусственного индиго (синяя краска), второе — при изготовлении ализарина (красная краска), являющегося существенной составной частью морены.

Нафталин — очень распространенное вещество; большинству из нас он хорошо знаком в виде белых сильно пах-

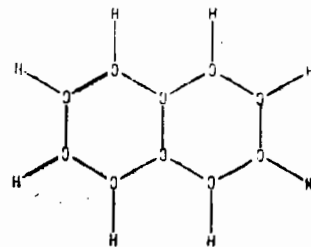


Рис. 68. Нафталин.

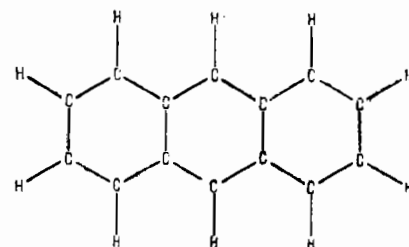


Рис. 69. Антрацен.

нущих кристаллов, которые кладутся в шкафы против моли. Если растворить нафталин в эфире и постепенно выпаривать раствор, то при этом образуются кристаллы.

Химики обнаружили, что молекула нафталина состоит из двойного бензольного кольца, изображенного на рис. 68, антрацен состоит из тройного кольца, как показано на рис. 69.

При анализе обоих веществ рентгеновыми лучами оказывается, что единичная ячейка кристалла содержит по две молекулы, причем она имеет форму, изображенную на рис. 70. Размеры ячеек указаны внизу рисунков. Если сравнить две эти ячейки между собой, то следует отметить что вдоль двух из ребер ячейки имеют одинаковые размеры, но третьи ребра сильно отличаются по своей длине. Естественно предположить, что двойные или тройные кольца соответствующих молекул в обоих случаях лежат параллельно направлению *OC*; разницу между дли-

нами ребер OC (11,18 и 8,69) следует приписать большой длине молекулы антрацена. Антрацен имеет по сравнению с нафталином одно лишнее кольцо, что дает его молекуле излишек в длине 11,18 — 8,69 = 2,49. Если измерить ширину кольца, какое встречается в алмазе, то она оказывается равной 2,50.

Таким образом мы опять получаем подтверждение того, что кольцо имеет определенную форму и что размеры его остаются приблизительно постоянными; мы получаем, таким образом, руководящее начало в попытках распознавания структуры кристаллов, в которых это кольцо принимает участие.

Рентгеновы лучи дают нам сведения о размерах и форме единичной клетки и о том, сколько молекул она содержит;

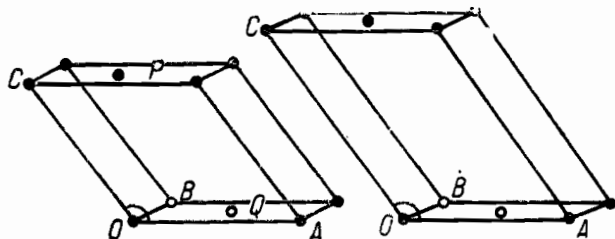


Рис. 70. Ячейки нафталина и антрацена, изображенные в одинаковом масштабе.

	OA	OB	OC
Нафталин	8,34	6,05	8,64
Антрацен	8,58	6,02	11,18

Числа выражены в единицах Ангстрема

кое-что также можно узнать и об относительных положениях молекул. Зная более или менее точно размеры кольца или колец, входящих в молекулу, мы можем продолжать исследование структуры, так как теперь известно, что тела определенных размеров должны быть помещены в клетки вполне определенной формы. Работа этого рода исключительно интересна, так как она дает нам новые сведения относительно расположения атомов в органических молекулах, а также о силах, связывающих атомы в молекулу, а молекулы в кристаллы. Это — новая область исследований, в которой некоторые из полученных результатов определены и ясны, другие же более темны и пока не будет накоплен большой опыт, затруднительны для толкования.

Органическая молекула представляется нам в настоящее время легкой неизменяемой рамой, крепко связанной внутри, но слабо скрепленной со своими соседями в кри-

сталле. Органические вещества почти всегда легки (немногим тяжелее воды). Тот факт, что плотность нафталина равна только 1,15, показывает всю прозрачность, ажурность структуры. Даже алмаз, как губка, полон дыр. Если бы эти пустые пространства были заполнены атомами углерода, плотность алмаза увеличилась бы вдвое, так как размеры отверстий как-раз таковы, что в них можно поместить по одному атому углерода; число же дыр как-раз равно числу атомов.

Слабость связей, соединяющих молекулы между собой, является причиной мягкости органических кристаллов и легкости, с какой они плавятся. По той же причине происходит сублимация нафталина: он испаряется, будучи в

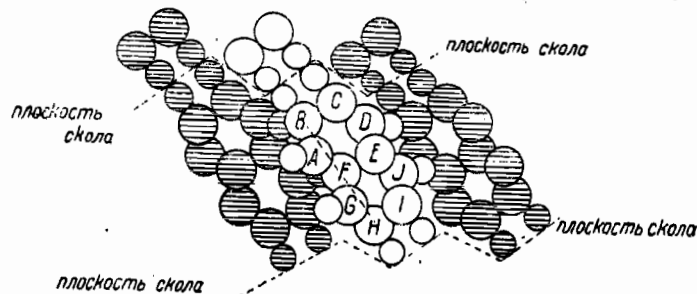


Рис. 71. Взаимное расположение трех молекул нафталина и частей, соседних с ними.

твердом состоянии. Целые молекулы отрываются от твердого вещества и образуют пар, который может затем кристаллизоваться в другой, более холодной части сосуда.

Нафталин и антрацен имеют хлопьеобразную структуру: они имеют хорошо развитую способность раскалываться. Пунктирные линии на рис. 71 показывают плоскости скола; ясно, что на концах молекулы отделяются друг от друга легче, чем в средней части. В каждом кусочке молекулы расположены, примерно, стоя, подобно колосьям, сгибающимся на ветру.

Общий вывод, к которому мы приходим в результате этих рассуждений, тот, что бензольное кольцо является материальным объектом определенной формы и размеров, участвующим в кристаллических структурах только с малыми изменениями своей формы. Мы должны теперь перейти к рассмотрению цепочкообразных молекул: они являются основой такого же большого отдела органической химии, как тот, который основан на кольце.

О ПРИРОДЕ КРИСТАЛЛОВ: ЛЕД И СНЕГ

Формы снежинок. Образование святающегося круга вокруг солнца. Ледяные цветы. Анализ строения кристаллов льда с помощью рентгеновых лучей. Плавление льда под давлением. О строении некоторых углеродных молекул. Кристаллы каменной соли.

В поисках кристаллов для исследования с помощью рентгеновых лучей наше внимание, несомненно, будет привлечено кристаллами льда и снега. Вода является одним из наиболее распространенных веществ в мире. Поэтому естественно, что мы стремимся познакомиться со всеми теми формами, которые может принять вода. С научной точки зрения не менее интересно изучить вещество, построенное из относительно простых молекул, состоящих из одного кислородного и двух водородных атомов. Наконец, нас побуждает к этому красота снежных кристаллов, узор которых так изящен и закончен, и то очарование, которое заключается в причудливых ледяных цветах, появляющихся зимой на окнах.

Правда, глыбы искусственного льда не отличаются особой красотой своих очертаний, процесс изготовления продажного льда происходит слишком быстро, для того чтобы могли образоваться отдельные достаточно большие кристаллики. Лед, конечно, обладает кристаллической структурой, но он состоит из множества мельчайших, незаметных для невооруженного глаза кристаллических индивидуумов, ориентированных по всем направлениям; кроме того, он полон воздушных прослоек и пузырьков.

Если мы хотим видеть, на что способна природа, когда она предоставлена самой себе, то для этого достаточно взглянуть на снежинки, которые выпадают в суровые северные зимы. Наблюдатели в Швеции и Америке сделали много превосходных фотографий, рассеянных по физическим и метеорологическим журналам. Некоторые из них воспроизведены на рис. 72

Мы можем следующим образом представить себе процесс роста снежинок. В верхних слоях атмосферы несколько молекул воды прилипают друг к другу, далее одна моле-

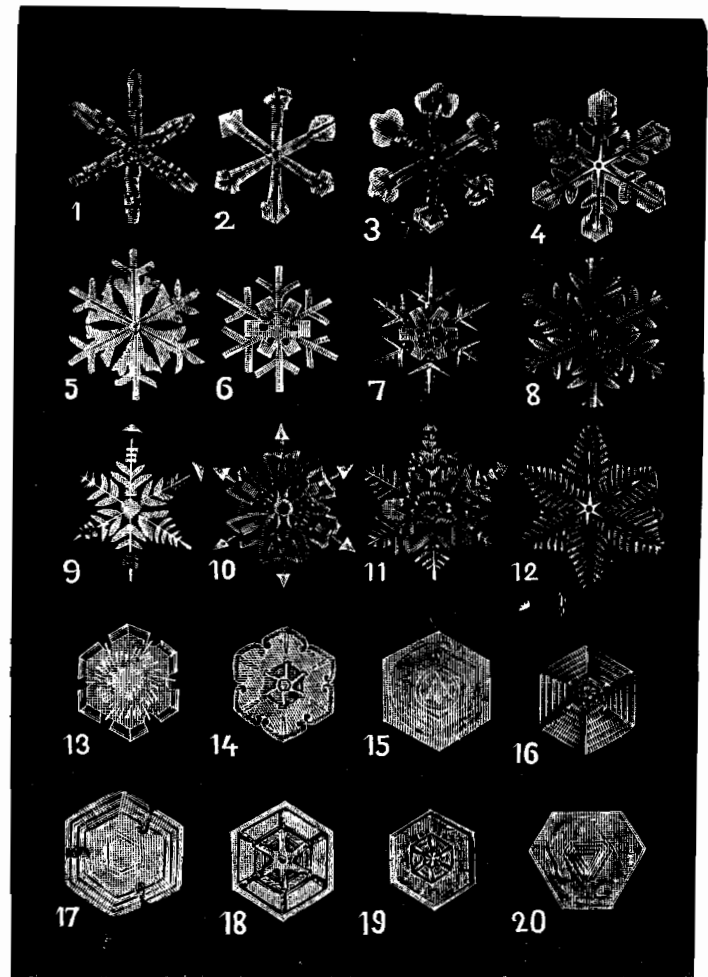


Рис. 72. Различные виды снежных кристаллов.

кула за другой пристает к растущему, надающему вниз кристаллу; постепенно обрисовываются все детали его строения, пока, наконец, шестиконечная снежинка не падает на землю. В холодную погоду снежинка, упав на

землю, будет продолжать расти таким же образом; на кристалле разовьются правильные маленькие грани, которые под солнечными лучами сверкают подобно алмазам.

Только что образовавшиеся снежные кристаллы часто имеют перистую форму; наружу торчат шесть выступов, от каждого из них направо и налево вырастают другие маленькие ответвления, и т. д., все эти отростки сходятся под углом в 60° , так что весь кристалл представляет собой как бы тончайшую кружевную шестиконечную звезду (рис. 72, 1—12). Перистые формы свойственны начальной стадии кристаллизации и, очевидно,

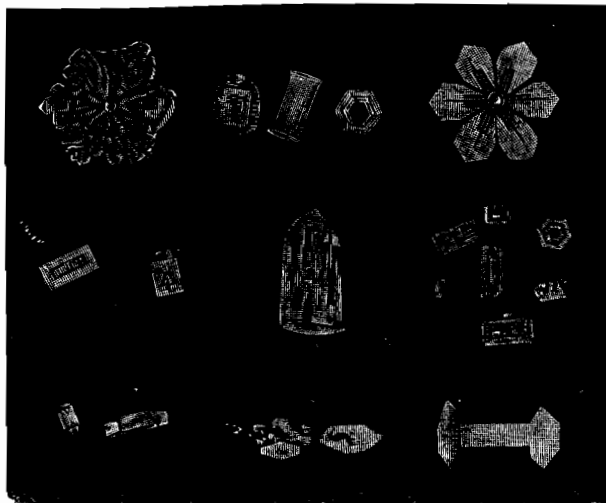


Рис. 73. Различные виды снежных кристаллов (в нижнем правом углу столик).

являются следствием внезапного и быстрого охлаждения. Отростки выходят из центра, потому что ближайшие к центру молекулы уже приняли участие в постройке и процесс кристаллизации захватывает новые области.

Описанное явление часто наблюдается в других случаях быстрой кристаллизации; замечательный пример этого рода представляет образование «колющих» кристаллов железа в смеси расплавленного и охлажденного металла. Для того чтобы их сохранить, необходимо остаток жидкого металла удалить раньше, чем кристаллы успеют потерять свою оригинальную форму. Они получили название дендритов и своим

видом напоминают деревья с сучьями, ветвями, веточками и т. д., но в железном кристалле два ответвления сходятся под прямым углом, а не под углом в 60° , форма его не так красива, как кристаллика льда.

В этом случае, когда снежный кристалл имеет в своем распоряжении достаточно времени для роста и необходимое количество молекул для заполнения всех промежутков, он принимает форму шестиугольной пластинки (рис. 72, 13—20). Но существует предположение, что иногда такая форма образуется с самого начала. Как это ни странно, шестиугольные пластинки часто бывают соединены попарно с помощью шестигранных же призм; одна пластинка по большей части крупнее другой, и все сооружение напоминает чайный столик (рис. 73).

Предполагают, что призмы, пластинки и «столики» обуславливают появление ложных солнц и светящихся кругов вокруг солнца (гало), наблюдаемых на далеком севере.

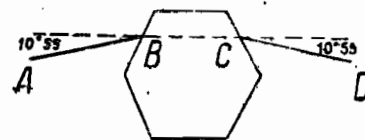


Рис. 74. Преломление луча в шестиугольной снежной призме.

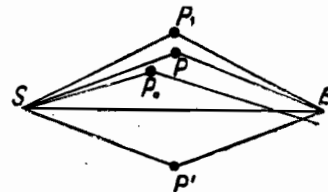


Рис. 75. Образование светящегося круга около солнца (гало).

Предположим, что шестиугольник на рис. 74 изображает сечение одной из этих призм или пластинок. Пусть $ABCD$ представляет собой путь светового луча, проходящего через это сечение. Он отражается в точках B и C ; луч в общем отклоняется на угол не меньше $21^\circ 50'$; последний, говоря языком физики, представляет собою угол наименьшего отклонения.

Если на рис. 75 в S помещается источник света, в E — глаз, то луч света, выходящий из S и преломляющийся при прохождении через призму, попадает в глаз только в том случае, когда призма установлена надлежащим образом. На рис. 75 призма P расположена симметрично относительно точек S и E ; как известно, в этом случае отклонение луча достигает наименьшей величины. Какая-либо призма, расположенная между P и P' , например P_0 , отклонит луч из S в таком направлении, что он не сможет попасть в глаз, каково бы ни было при этом

положение призмы. Призма может послать световой луч в глаз и при несимметричном положении, как, например, призма P' на рис. 75. Угол отклонения должен превосходить наименьший угол, вот почему призма должна быть косо поставлена, как изображено на рисунке. Если, далее, наблюдатель стоит в E , обратившись лицом к солнцу в S , он увидит свет в направлениях PE и $P'E$, а также в других направлениях, лежащих за пределами этих лучей; но интенсивность этого света будет относительно меньше, потому что большинство отклонений близко к минимальному — чем они дальше от него, тем они немногочисленнее, как это следует по известным законам оптики. Из пространства же внутри PEP' свет совсем не приходит, вслед-

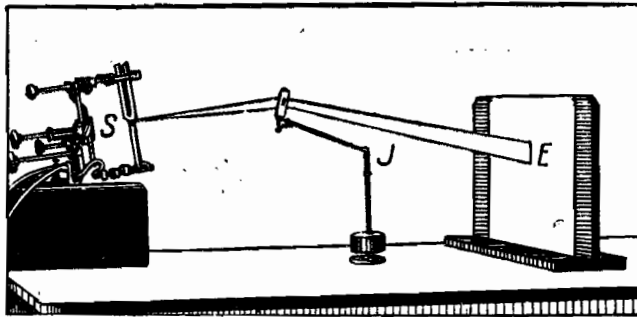


Рис. 76. Прибор, выясняющий образование гало.

ствие этого резко выделяется яркая полоса света в направлении наименьшего отклонения.

Сказанное выше относится к лучам, приходящим от солнца по различным направлениям. В результате наблюдатель должен видеть вокруг солнца кольцо, ярко освещенное с внутренней стороны, расплывающееся — с наружной. Вследствие того, что для красного света угол PEP' меньше, чем для синего, гало не совсем белого цвета: оно окрашено с внутренней стороны в красный цвет, а с наружи — в синий.

Гало наблюдается в тех случаях, когда в воздухе имеется достаточное количество ледяных призм, точно так же, как радуга появляется только тогда, когда имеется достаточное количество дождевых капель.

Небольшая модель поможет лучше понять это объяснение. Дуговая лампа в S (рис. 76) является источником

света; глаз находится в E . Между S и E расположена подставка с держателем для стеклянной призмы. Размеры всей установки подобраны таким образом, чтобы световой луч, отраженный призмой, попадал в E . При вращении призмы вокруг J глаз остается освещенным.

Если бы призмы были расположены по кругу, то глаз видел бы освещенный круг вокруг центрального пятна.

Если бы вследствие каких-либо причин призмы стремились занять только некоторые определенные положения, то гало было бы неполным.

Нечто в этом роде действительно имеет место в природе.

Когда в воздухе падает длинная призма, то ее ось стремится занять горизонтальное положение. В том же случае, когда призма имеет на обоих концах пластинки (как показано на рис. 73), или весь кристалл представляет собой шестиугольную пластинку, которую можно считать очень короткой призмой, то ее ось стремится встать вертикально или, другими словами, сама пластинка стремится занять горизонтальное положение.

Это несколько странное явление находится, однако, в полном согласии с хорошо известным законом, относящимся к движению тел в газах или жидкостях. Все тела стремятся занять такое положение; при котором сопротивление движению было бы максимальным. Сложим вместе две или три почтовых открытки; затем, держа их горизонтально и отняв по возможности быстро руку, предоставим им падать с некоторой высоты. Во время падения открытки не изменяют своего горизонтального положения, но если мы бросим их на ребро, то они во время полета будут переворачиваться. Если мы опустим в воду матовую пластинку, то увидим, что хотя она наклоняется с боку на бок, тем не менее, все время стремится вернуться в горизонтальное положение.

Таким образом среди массы падающих ледяных кристаллов вертикальные и горизонтальные кристаллики находятся в различной пропорции. Части гало, лежащие на концах горизонтального и вертикального диаметров солнца, отличаются особенной яркостью и выделяются на общем фоне солнца в виде резких пятен, которые часто получают название ложных солнц.

Лед, образующийся на открытом воздухе на поверхности воды, кристаллизуется в форме, аналогичной снежным кристаллам; при этом все шестисторонние фигуры горизонтальны. Равным образом, когда вскрывается ледяной покров

озера, лед сначала разбивается на вертикальные колонны, которые в течение некоторого времени поддерживают друг друга; когда начинается подвижка льда, то лед быстро распадается, и озеро вскоре же очищается.

В отчетах антарктических исследователей часто упоминается о том, что в пресноводных озерах лед был найден разделенным на шестиугольные призмы, вертикально стоящие на поверхности. Пузырьки воздуха ясно указывали на плоскости, по которым происходило разделение призм. В морском льду образование кристаллов сопровождается выделением соли, которая отлагается в промежутках между кристаллами, а иногда собирается на поверхности. Призмы почти не содержат внутри соли; отделив сначала наружные слои, можно получить почти пресную воду. Кристаллы

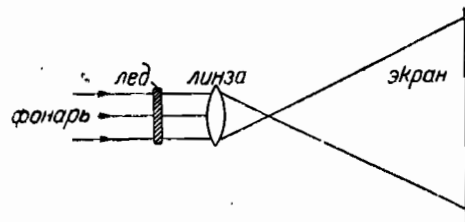


Рис. 77. Прибор Тиндала для демонстрации «ледяных цветов».

настолько прозрачны, что сквозь них, как через трубу, можно наблюдать лежащие подолдом скалы. Существует следующий прекрасный способ для наблюдения кристаллической структуры льда, описанный Тиндалем в его книге о теплоте.

Брусочек прозрачного льда помещается по пути лучей, выходящих из дугового фонаря и отбрасываемых на экран, как показано на рис. 77. Теплота от фонаря начинает расплавлять кристаллы, которые распадаются на отдельные части в порядке, обратном их образованию. Сначала появляются и растут маленькие шестилучевые углубления, похожие на цветки с шестью лепестками, другие углубления имеют форму папоротника, в котором листья образуют со стеблем угол в 60° . Скоро весь экран покрывается подобными «ледяными цветами», картина производит впечатление великолепной рельефной резьбы (рис. 77).

Описанное явление не наблюдается в обыкновенном искусственном льде, поступающем в продажу; для этой цели пригоден только специально приготовленный лед. Но лучше всего, конечно, естественный лед. Весьма существенным является требование, чтобы образование льда происходило в спокойной обстановке; вероятно, немалую роль играет и то условие, чтобы вода охлаждалась лишь

с одной стороны; последнее как раз и имеет место на поверхности воды в спокойную морозную ночь.

В середине ледяного цветка часто появляется небольшое черное пятно. Тиндаль чрезвычайно заинтересовался этим явлением и объяснил его происхождение. При плавлении льда внутри большой массы образовавшаяся вода занимает меньший объем, чем лед. Возможно, что первоначально вода действительно заполняет весь тот объем, который раньше был занят льдом; при этом она находится в чрезвычайно напряженном состоянии. Наконец, это напряжение достигает столь большой величины, что вода отрывается от льда и сжимается до своего естественного объема, вследствие чего образуется пустота, которая действует в качестве крошечной линзы и рассеивает проходящий через нее свет. Результатом является черное пятно, которое свидетельствует о том, что свет не проходит в прямом направлении через это место.

Ледяные цветы можно наблюдать в ледниковом льде, где они создаются солнечным теплом. Когда несколько ледниковых потоков сливаются в один или к леднику примерзают упавшие на него ледяные глыбы, то такой ледник представляет собой нагромождение примерзших друг к другу ледяных масс, на каждой из которых можно обнаружить ледяные цветы. Ориентация этих цветов в каждом отдельном случае дает указание на первоначальное положение соответствующей массы; дело в том, что цветы всегда образуются в таких плоскостях, которые когда-то занимали горизонтальное положение. На рис. 79, взятом из старинной книги Агассиса, изображен разрез ледникового льда, отчетливо показывающий различные

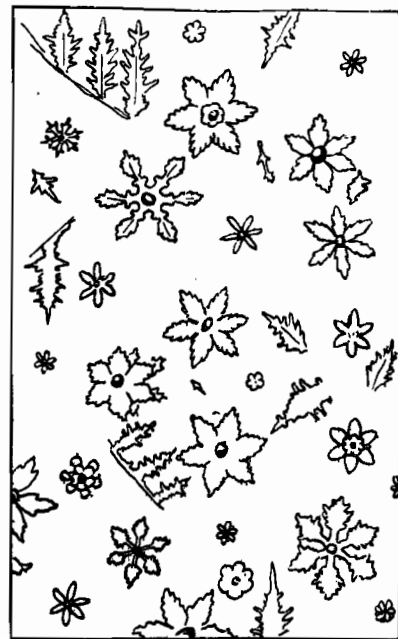


Рис. 78. Ледяные цветы.

с одной стороны; последнее как раз и имеет место на поверхности воды в спокойную морозную ночь.

положения углублений: некоторые спереди, другие — сбоку, и, наконец, часть в промежуточном положении.

Перейдем теперь к анализу структуры кристаллов льда с помощью рентгеновых лучей. Мы должны надеяться найти здесь объяснение их формы и других рассмотренных нами физических свойств. Оказывается, что структура льда до некоторой степени сходна со строением алмаза: здесь вокруг каждого атома имеется такое же симметричное расположение четырех одинаковых атомов.

В рассматриваемом случае в центре тетраэдра находится кислородный атом; четыре других кислородных атома помещаются в четырех вершинах. Однако имеются и некоторые небольшие различия в структуре обоих тел. Во-первых, в алмазе углеродные атомы примыкают друг к другу, во льду между кислородными атомами внедряются водородные.

Если между каждой парой кислородных атомов мы поместим один водородный, то получим такое симметричное расположение, в котором оба сорта атомов присутствуют в правильном количественном соотношении. Каждый кислородный атом окружен четырьмя водородными соседями, каждый водородный атом имеет двух кислородных соседей; отсю-

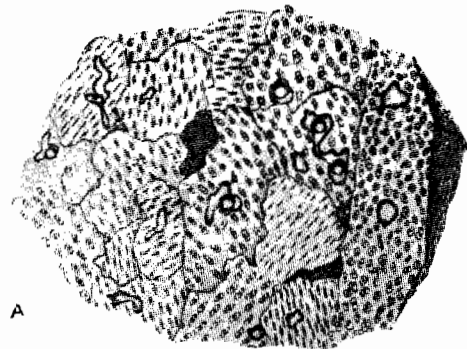


Рис. 79. Ледяные цветы в глыбе ледникового льда.

да мы видим, что водородных атомов в два раза больше кислородных.

Модель, показывающая описанное здесь расположение, изображена на рис. 80. Белые шарики представляют кислород, черные — водород. Рекомендуется отчетливо уяснить себе, что рентгеновы лучи не позволяют определить размеры кислородного или водородного атома. Все, что они дают, это — возможность найти расстояние между центрами двух кислородных атомов, которое равно сумме диаметров атомов кислорода и водорода. Кислород может занимать все пространство, в то время как водород может не занимать никакого объема, потому что, как предполагают, водородный атом отдает свой электрон кислороду,

а сам остается с голым ядром. Рентгеновы лучи не могут сказать, какие размеры должны быть приписаны последнему. Между тем, при постройке модели мы должны выбрать для шариков какие-нибудь размеры; поэтому, рассматривая модель, мы не должны упускать из виду некоторую ее условность.

Существует еще другое различие между кристаллическим строением алмаза и льда, гораздо более тонкое и более трудное для понимания, но все же стоит попытаться выяснить его. Если читатель найдет наше объяснение слишком

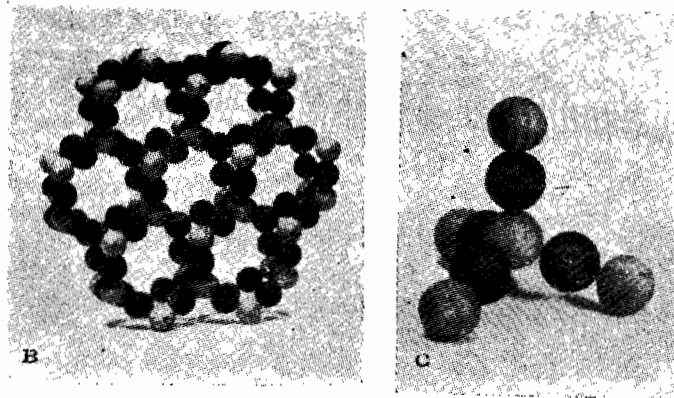


Рис. 80. Модель кристалла льда.

Белые шарики — кислородные атомы, черные — водородные атомы, справа — деталь, показывающая их взаимное расположение.

трудным и не сможет его осилить, он смело может его пропустить без опасения потерять руководящую нить изложения.

Предположим, что мы смотрим на модель алмаза сверху вниз: мы видим один слой, как показано на рис. 81, А. Углеродные атомы, лежащие в основании кристалла, обозначены цифрой 1; атомы же, слегка приподнятые над своими соседями по слою, обозначены цифрой 1'. Возьмем второй слой, в точности подобный первому, и напомним всюду 2 вместо 1 и наложим этот слой на первый таким образом, чтобы 2 совпало с 1' — другими словами, нижние атомы во втором слое придутся над верхними (выступающими атомами) в первом слое. Последнее обстоятельство как раз имеет место в алмазе. Вся эта комбинация изобра-

жена на рис. 81, B, где 1'2 обозначает, что атом 2 лежит над атомом 1'. Возьмем теперь третий слой, для разметки которого употребим цифру 3, и наложим его таким образом, чтобы 3 пришлось на 2'. Мы тогда получим расположение, изображенное на рис. 81, C. Повторив все это наложение множество раз в том же порядке 1 2 3, 1 2 2, мы получим структуру алмаза.

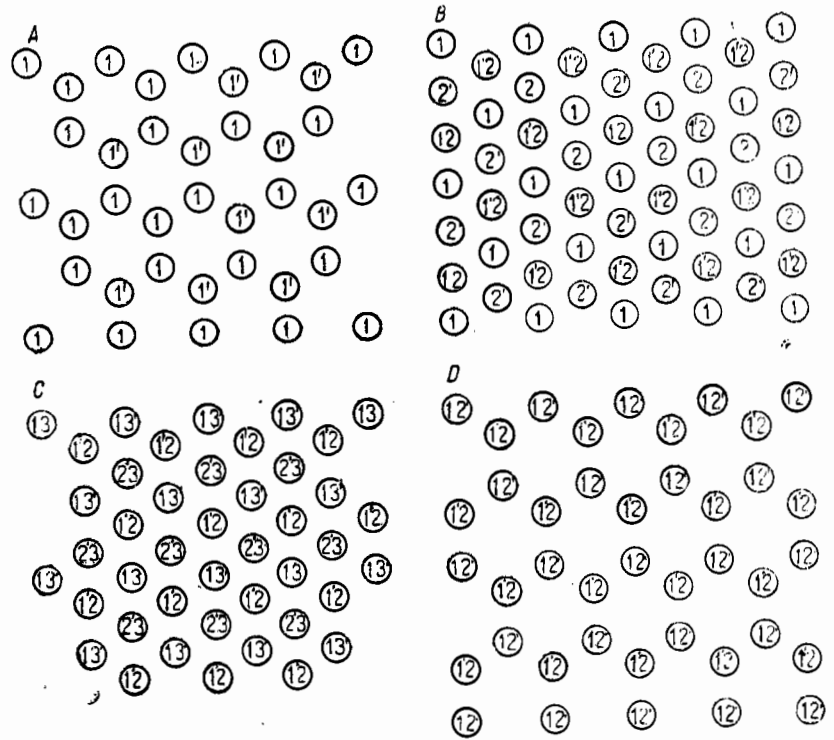


Рис. 81. Расположение атомов в кристаллах алмаза и льда.

Начнем опять со слоя 1, но расположение в слое 2 берем такое, которое представлено на рис. 81, D. Если мы внимательно в него всмотримся, то увидим, что оно отличается от предыдущего: слой 2 был повернут в своей собственной плоскости на 180° и после этого опять наложен на первый слой. Затем попеременно будем накладывать 1 и 2. Таким образом мы получаем размещение кислородных атомов в кристалле льда. Мы получим всю структуру

полностью, поместив один водородный атом между каждой парой кислородных.

Мы сможем уяснить себе размещение атомов в кристалле льда, взглянув на модель, изображенную на рис. 80. Остается только совершенно непонятным, почему в одном кристалле непрерывно повторяется ряд из трех слоев, а в другом — только из двух.

Если мы опять обратимся к модели кристалла льда, то заметим несколько интересных особенностей, которые помогут объяснить уже известные нам свойства льда. Это касается прежде всего шестиугольной структуры, которая сразу бросается в глаза. Далее, ажурность модели, конечно, связана с легкостью льда и пушистостью снега. Лед не тонет в воде; следовательно, молекулы воды, соединившись вместе для образования кристалла, занимают больше места, чем раньше. Мы можем, раздавив модель, заставить ее занимать меньший объем; последнее, несомненно, имеет место в том случае, когда лед плавится под давлением. Для иллюстрации этого явления может служить следующий хорошо известный опыт. Брусок льда опирается концами на две подставки; на нем висит проволока, оттягиваемая тяжелым грузом, как показано на рис. 82. Проволока врезается в лед и, пройдя через весь брусок, наконец, па-

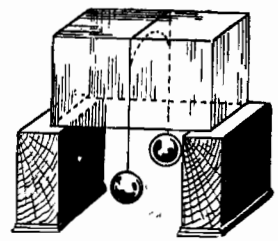


Рис. 82. Проволока, разрезающая лед.

дает вместе с грузом на пол, но так как лед смыкается позади проволоки, то брусок остается той же монолитной массой, как и до начала опыта. Очевидно, давление проволоки на брусок разрушает структуру льда; при этом освобождаются некоторые молекулы. Другими словами, под действием давления лед под проволокой плавится и превращается в воду, которая выдавливается из-под проволоки и занимает пустое пространство над ней; после этого вода опять примерзает к остальной массе льда. Мы можем представить себе, что молекулы воды становятся на свои места, потому что их окружает со всех сторон кристаллический лед, как бы протягивающий к ним свои объятия.

Из истолченного льда можно под большим давлением формовать различные предметы. Мы можем, например, сделать «хрустальный бокал»: для этого необходимы две

или три подходящих деревянных формы. Одна из них послужит для формовки верхней части бокала, другая — ножки и, наконец, третья — подставки. После этого соединим их вместе. Формы, изображенные на рис. 83, применялись Тиндалем для аналогичного опыта.

В то время, когда Тиндаль показывал эти опыты, он разрабатывал теорию движения ледников; опыты служили для иллюстрации выводов этой теории. Мы должны вспомнить, что Тиндаль посвятил много усилий исследованию ледниковых движений: он интересовался этим вопросом как с научной точки зрения, так и вследствие своего крайнего пристрастия к восхождению на горы.

Ледники спускаются с покрытых вечными снегами горных вершин, скользят по долинам, растекаются по равнине и ведут себя подобно жидкости, но эта жидкость должна быть очень вязкой, движение ледников происходит чрезвычайно медленно — несколько сантиметров в день, а в некоторых случаях даже меньше, в других случаях — около метра в день.



Рис. 83. Изготовление ледяного бокала прессованием льда.

Грандиозность этого движения всегда возбуждала удивление и вызывала интерес так же, как и то обстоятельство, что такое ломкое кристаллическое вещество может течь подобно реке, может огибать острые углы долин и низвергаться со скал, не теряя своей монолитности. Во времена Тиндаля много внимания уделялось теории, предполагавшей, что ледник расплавляется внутри в тех местах, где напряжение достигает большой величины, и что образовавшаяся таким путем вода уходит прочь, вследствие чего давление в этих местах уменьшается. Освободившаяся вода, говорила эта теория, опять замерзнет, попав в пустое пространство или трещину, где отсутствует давление, необходимое для того, чтобы сохранять лед в расплавленном виде. Таким образом ледник должен сжиматься под действием давления и расширяться в другом месте, в результате чего и произойдет приспособление ледника к его ложу. Объяснение это встретит серьезные возражения, если мы вспомним о ледниках в Арктической и Антарктической областях, где господствует настолько низкая температура, что никакое давление не в состоянии расплавить лед.

Ознакомившись более близко с поведением кристаллических тел, можно придумать другое объяснение для движения ледников, не столь уже отличное от взглядов Тиндаля, но встречающее меньше возражений. Существует множество веществ, которые можно заставить течь, подобно леднику: металлы текут сквозь отверстия, проволока протягивается, листы прокатываются. Как показал Джордж Бейльби, можно заставить «течь» даже поверхность стекла или такого совершенного кристалла, каким является исландский шпат. Но все эти вещества обладают кристаллическим строением; если это и не было известно раньше, то рентгеновы лучи открыли их кристаллическую структуру. Далее, указанные вещества сохраняют свое кристаллическое строение и после течения.

Когда мы будем говорить о металлах, мы увидим несколько примеров описанного явления. Вещество само приспособляется к испытываемому им давлению и изменяет при этом свою форму. Целые слои атомов или молекул мгновенно срываются со своих мест, переходят по головам — если можно так выразиться — атомов или молекул, находящихся под ними, в новое положение или, быть может, в течение некоторого промежутка времени находятся в движении. Когда они приобретают оседлость, то кристалл восстанавливает свою однородность; во время же перехода часть связей разрушается, как если бы вещество начинало плавиться. Так именно должно обстоять дело в тех случаях, когда, как во льду, вещество при плавлении уменьшается в объеме и когда, после разрушения связей под действием давления, атомы и молекулы переходят в такие положения, в которых они занимают меньший объем, чем в твердом состоянии.

При сгибании металла, когда ему придается новая форма, происходит сдвиг кристаллов, из которых он состоит, т. е. другими словами, — одна часть скользит по другой. Отсюда ясно, что путем нескольких последовательных сдвигов можно придать куску металла любую форму. То же самое может иметь место в случае льда: изменение формы может быть обусловлено как сдвигами, так и плавлением. Скольжение во льду наблюдается очень часто. Вырежем из массы льда, образовавшегося на какой-либо водной поверхности, небольшой брусок. Если положить его боковыми концами на подставки и придать ему то же положение, в котором происходило его образование, то брусок будет прогибаться под действием груза, подобно упругому

стержню, как показано на рис. 84, А. Если, далее, повернуть его и положить таким образом, чтобы горизонтальные слои заняли теперь вертикальное положение и чтобы плоскость, в которой они лежат, была параллельна прямой, соединяющей подставки (рис. 83, В), то брусок будет прогибаться лишь в весьма незначительной степени. В том же случае, когда плоскости, бывшие горизонтальными, встанут перпендикулярно к прямой, соединяющей подставки, эти плоскости будут скользить одна по другой, вследствие чего произойдет изменение формы бруска (рис. 83, С). Если под

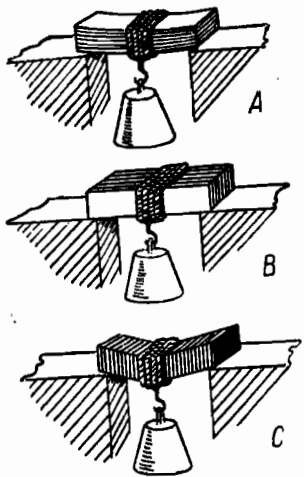


Рис. 84. Изгиб льда под действием тяжести.

сокупным действием давления и местного плавления освобождается некоторое количество молекул, то они, как мы видели на стр. 115 в случае разрезания льда проволокой, опять примерзнут ко льду, потому что для них всегда имеются свободные места. Но мы можем рассматривать описываемое явление с более общей точки зрения и считать его обусловленным скольжением плоскостей.

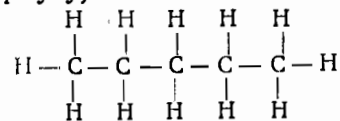
Любопытно, с какой жадностью куски льда соединяются друг с другом. Достаточно сложить вместе два плоских куска и держать их несколько мгновений, чтобы они уже не отделялись друг от друга под действием собственного веса. Два куска льда соединяются вместе, примерзают друг к другу даже в том случае, если их держат в теплой воде.

Вернемся теперь опять к рассмотрению своеобразных цепочечных молекул углерода. Изучая структуру алмаза, мы видели, что основным ее элементом является некоторое определенное расположение углеродных атомов — шесть атомов углерода образуют кольцо. Мы видели, что аналогичное расположение составляет основание так называемого бензольного ядра или кольца, которое состоит из шести углеродных атомов, окаймленных шестью водородными атомами; существует также множество других важных молекул, обладающих тем же расположением, в котором водородные атомы замещены другими отдельными атомами или целыми группами. Изучение подобных моле-

кул составляет предмет целой отрасли органической химии. Эти молекулы образуют вещества, получившие название ароматического ряда, потому что многие из них испускают благовонный запах.

Существует другая большая отрасль органической химии, имеющая дело с другого рода веществами, носящими название жирного ряда; последний термин указывает, на то, что представителями этих веществ являются масла и жиры. Химикам удалось доказать, что в этом случае молекула представляет собой цепочку из углеродных атомов, к которой присоединены как по длине, так и на концах различные атомы, главным образом, водородные. Мы знаем, что в структуре алмаза существует кольцо; из недавно произведенных опытов можно вывести заключение, что в алмазе имеется также и цепочка; таким образом алмаз содержит два главных элемента, из которых построены многие тела.

Ранее мы рассмотрели уже несколько примеров кольцевых соединений, сейчас мы рассмотрим цепочкообразные соединения. Цепочка может быть образована из любого числа звеньев, каждое из которых, вообще говоря, состоит из одного атома углерода и двух атомов водорода; концы образованы различными группами атомов; некоторые из них весьма обычны и сообщают цепочке ее хорошо известные свойства. В простейшем случае концы образованы водородными атомами; мы имеем тогда молекулу так называемого предельного углеводорода или парафина. Химик следующим образом напишет, например, символическое обозначение (формулу) пентана:



Пентан представляет собой горючую жидкость, применяемую в так называемых стандартных лампах, т. е. в таких лампах, которые служат для сравнения с другими источниками света, потому что они горят спокойным и постоянным пламенем. Приведенный выше схематический чертеж представляет собой попытку изображения того способа, с помощью которого различные атомы прикреплены друг к другу. Каждый углеродный атом соединен с четырьмя другими. Так как он не может соединиться больше чем с четырьмя атомами, то отсюда следует, что такое обра-

зование нельзя дополнить, не отняв предварительно какой-либо части. Подобная молекула называется насыщенной.

На чертеже она изображена помещающейся целиком в одной плоскости частью для удобства, а частью вследствие того, что слишком мало известно о действительном ее устройстве.

Одной из задач рентгенографического анализа, основанного на применении рентгеновых лучей, является более точное определение положений атомов в молекуле, чем это удавалось до сих пор, и, кроме того, определение линейных размеров. В случае рассматриваемых здесь длинных цепочкообразных молекул с

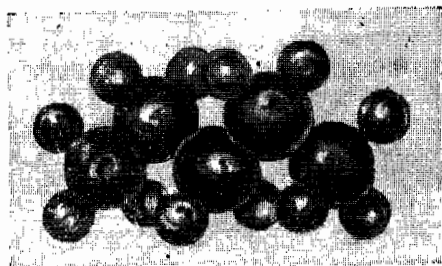
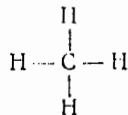


Рис. 85. Модель молекулы пентана.
Большие шарики — атомы углерода, маленькие — атомы водорода.

помощью рентгеновых лучей удалось достигнуть неожиданных успехов. Для того чтобы сделать понятными результаты новейших исследований, мы построим наиболее вероятную модель молекулы пентана, изображенную на рис. 85.

В нефти находят многих представителей парафинового ряда. Они горючи, потому что весьма охотно распадаются при надлежащих условиях в присутствии кислорода; отдельные атомы вступают в новые соединения, выделяя при этом большие количества тепла. Самый короткий представитель этого ряда содержит только одно звено. Он представляет собой газ, называемый метаном, или болотным газом, и изображается следующей формулой:

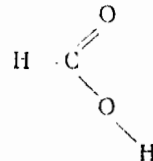


Метан выделяется в виде пузырьков из стоячей воды, содержащей разлагающиеся растительные остатки.

По мере роста цепочки уменьшается летучесть образующихся веществ. Пентан, имеющий пять звеньев, при обыкновенных температурах представляет собой жидкость, кипящую при 36° ; пентадекан — с пятнадцатью звеньями —

кипит при 257° С, при обыкновенных температурах он находится в твердом состоянии и плавится при 54° С. Предполагают, что длинные молекулы стремятся укладываться рядом подобно спичкам в коробке; впоследствии мы увидим, что такой взгляд находит весьма веское подтверждение в результатах исследований с помощью рентгеновых лучей. Далее, следовало бы ожидать, что чем длиннее молекулы, тем больше должны быть силы, необходимые для того, чтобы оторвать их друг от друга; поэтому чем длиннее цепочка, тем выше точка кипения и точка плавления соответствующего вещества. Вообще говоря, силы сцепления между отдельными молекулами не очень велики: точки кипения и плавления лежат сравнительно низко. Оболочка из водородных атомов, которой окружена каждая молекула, очевидно, препятствует их соединению с другими молекулами, как, например, с кислотами. Название парафин, собственно говоря, содержит в себе определение последнего свойства этих веществ, потому что оно образовано из двух латинских слов «parum affinis», обозначающих «недостаток сродства». Но, как я уже сказал, эти молекулы при известных условиях жадно соединяются с кислородом.

Свойства этих цепочек сильно меняются, если убрать группу атомов, находящихся на конце, и заменить ее какой-либо другой. Так, например, заменив один из водородных атомов, находящихся на конце цепочки, определенной группой, содержащей углеродный атом, два кислородных и один водородный, мы получим весьма важный ряд соединений, называемых жирными кислотами. Эта группа известна под именем карбоксильной группы. В последнем случае цепочка также может иметь произвольную длину. Если она содержит только один углеродный атом, то химики изображают ее следующей формулой:

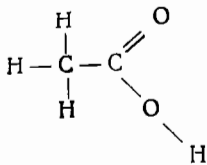


Эта форма показывает, что из общего числа четырех связей, с помощью которых углеродный атом удерживает четыре других атома, одна связь отдана водороду, две другие — одному кислородному атому и, наконец, последняя — другому кислородному атому, соединенному с водо-

родом. Описанное соединение называется муравьиной кислотой, или формилом, она выделяется муравьями и, как хорошо всем известно, оказывает чрезвычайно сильное раздражающее действие на кожу.

Присоединив к цепи еще одно новое звено, получим ацетон, или уксусную кислоту, которая сообщает уксусу его специфические свойства; самое слово ацетон происходит от латинского названия уксуса.

Строение уксусной кислоты выражается следующей формулой:



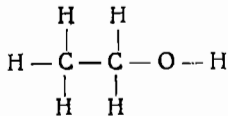
Масляная кислота, или бутирил, содержит четыре углеродных атома; она является тем веществом, которое сообщает прогоркшему маслу его специфический запах и вкус.

Лавровая кислота обладает двенадцатью углеродными атомами; она содержится в оливковом и кокосовом масле.

Все эти вещества являются жидкостями. Пальмитиновая кислота, которую находят в пальмовом масле, имеет шестнадцать, а стеариновая кислота — восемнадцать углеродных атомов. Последние два вещества при обыкновенных температурах находятся в твердом состоянии; их применяют при изготовлении стеариновых свечей. В несколько измененном виде они являются одной из главных составных частей животного жира.

Спирты составляют другой ряд цепочкообразных соединений. Они образуются из предельных углеводородов путем замены водородного атома на одном из концов цепи комбинацией из кислородного и водородного атомов, так называемой группой гидроксила.

Таким образом формула



представляет собой обыкновенный спирт.

Мы можем идти дальше по тому же пути, описывая огромное множество веществ, состоящих из звеньев CH_2 , с различными группами атомов на концах. Иногда один

или несколько боковых водородных атомов замещаются другими атомами или группами атомов; иногда происходят еще более сложные изменения. Есть что-то поразительное в простоте, лежащей в основе всего этого замечательного многообразия. В силу каких причин различные растения и животные и отдельные части этих самых растений и животных содержат углеродные цепи различной длины, от которых в значительной степени зависят их рост и основные свойства?

Несомненно, что все эти явления в первую очередь зависят от свойств углеродного атома; последнее обстоятельство придает особенный интерес кристаллическим формам углерода — алмазу и графиту.

Вернемся опять к модели алмаза. Не замечаем ли мы в структуре алмаза элементов цепи, подобно тому как раньше мы в ней обнаружили остов углеродного кольца? Оказывается, что модель (рис. 58) может быть разрезана на произвольно длинные цепочки, в которых угол каждого поворота равен $109^\circ 28'$.

Мы могли бы предположить, что подобное образование является простой формой цепочки. Конечно, мы основываемся только на предположениях, пытаемся представить себе возможные решения нашей задачи; последние еще должны быть подвергнуты опытной проверке. Если бы это действительно была цепь, то два водородных атома были бы присоединены к каждому углеродному атому в тех точках, которые вместе с двумя точками присоединения соседних атомов образовывали бы четыре симметрично-расположенных точки, как показано на рис. 85, подобные четырем точкам, в которых каждый углеродный атом присоединяется к своим четырем соседям в алмазе. Этот рисунок дает гораздо больше представления о деталях, чем обычный способ изображения, применяемый химиками; последний не выходит за пределы плоскости, наша же фигура пользуется тремя измерениями. Не подлежит никакому сомнению, что в природе атомы располагаются в трех измерениях. Химики не прибегали к способу пространственного изображения, потому что не имели прямых непосредственных указаний на истинное расположение атомов. Мы пытаемся сделать следующий шаг, правда, несколько нерешительный, потому что мы далеки еще от совершенства в деле истолкования результатов наших новых методов, но мы надеемся, что они принесут еще немало пользы.

За последние годы оказалось возможным весьма точно измерить длину цепочкообразных молекул с помощью рентгеновых лучей. Открытием нового метода мы обязаны любопытному случаю. С помощью рентгеновых лучей производилось исследование одного кристалла; так как последний очень быстро разрушался под действием влаги, содержащейся в воздухе, то его покрывали тонким слоем твердого парафина, который обыкновенно применяется в лабораториях в качестве электрического изолятора. При этом были обнаружены определенные отражения рентгеновых лучей, которые никак не могли быть объяснены. Оказалось, что они были вызваны парафином. Продажный парафин представляет собой смесь нескольких цепей жирных кислот и непригоден для точных опытов. Но случилось так, что один ученый химик (доктор Лесюер) приготовил большое число этих цепочкообразных веществ в чистом состоянии. Они, а также многие другие вещества, были подвергнуты исследованию, которое привело к весьма интересным и, вообще говоря, очень простым результатам.



Рис. 86. Схема расположения молекул в слоях.

Рассматриваемый метод представляет собой хороший пример того, как применяются для подобных исследований рентгеновы лучи. Небольшое количество твердого вещества помещается на стеклянную пластинку и крепко придавливается. Рассмотрим значение такого сжатия. Оказывается, что теперь все вещество состоит из слоев, параллельных стеклу. Молекулы в каждом слое более или менее к нему перпендикулярны и сцеплены друг с другом. Их расположение изображено на рис. 86, на котором представлены три слоя. Каждый слой, вероятно, не толще одной стомиллионной доли сантиметра; толщина пропорциональна длине молекулы. При прохождении пучка рентгеновых лучей через подобную пленку лучи частично рассеиваются каждым из слоев подобно тому, как это происходило бы в случае пучка света, проходящего через стопку стеклянных пластинок. Принципы, на которых основывается этот опыт, уже описаны на стр. 88.

Предположим, что S (рис. 87) представляет собой источник рентгеновых лучей, а C — стеклянную пластинку с нанесенными на нее слоями. Пучок рентгеновых лучей, идущий в направлении стрелки, падает на пластинку; в том случае, когда последняя наклонена под надлежащим углом,

отражения от различных слоев согласованы по фазе и усиливают друг друга. Мы можем себе представить, что отраженные лучи идут по направлению CR_1 и в R_1 оставляют след на фотографической пластинке M . Если повернуть стеклянную пластинку вокруг вертикальной оси, проходящей через C (на рисунке все изображено в одной плоскости), то отражения не произойдет, так как лучи, отражающиеся от отдельных слоев, больше уже не совпадают по фазе и вместо того, чтобы друг друга усиливать, как в предыдущем случае, теперь взаимно ослабляются.

Однако можно повернуть пластинку на такой угол, когда отражение опять будет иметь место, потому что при новом положении пластинки лучи, отражающиеся от отдельных слоев, опять будут усиливаться. Первый максимум появляется в том случае,

когда луч, отражающийся от какого-либо слоя, опережает или отстает на одну длину волны по сравнению с лучами, отражившимися от соседних слоев по обе стороны от рассматриваемого; следующее отражение появляется тогда, когда эта разность хода равна двум длинам волн и т. д. В результате на фотографической пластинке после проявления можно обнаружить целый ряд отражений. Обычно вращения пластинки производят таким образом, чтобы отраженные лучи попадали выше и ниже центральной прямой SM .

Центральное пятно M вызвано действием рентгеновых лучей, прошедших без отражения весь путь до фотографической пластинки — по большей части эта часть пластинки бывает прикрыта, чтобы не очень сильно проявилось действие прямого пучка; по обе стороны от центрального пятна размещаются все отражения различных порядков.

На рис. 88 представлен снимок, изображающий отражения от предельного углеводорода, содержащего 18 углеродных атомов; он был выполнен доктором Мюллером.

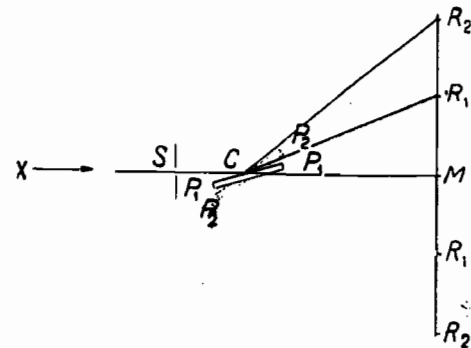


Рис. 87. Исследование углеводорода с помощью рентгеновых лучей.

Все отражения весьма интенсивны. Можно весьма точно измерить расстояние между отдельными линиями и отсюда вычислить толщину отдельного слоя, отражающего вещества.

Мы не вполне уверены в том, что молекулы в каждом слое торчат вверх и перпендикулярно к нему, но все же мы имеем достаточно оснований для того, чтобы предполагать, что дело обстоит именно таким образом. Нет необходимости подробно останавливаться на соображениях, подтверждающих высказанный здесь взгляд. Оказывается, что длина цепи вырастает с замечательной правильностью по мере прибавления углеродных звеньев.

Вся совокупность подобных опытов подтверждает то представление, которое составили химики о форме этих молекул: оно оказалось правильным. Рентгеновы лучи помогли детализировать это представление, приведя к за-

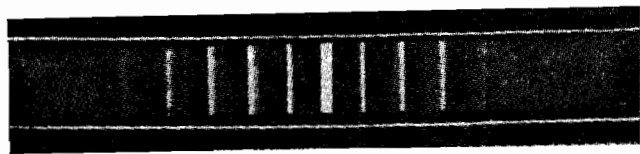


Рис. 88. Рентгеновский спектр предельного углеводорода, содержащего 18 атомов углерода.

ключению, что молекулу следует изображать в трех измерениях. В то же самое время они позволили измерить длину молекулы. Я могу к этому добавить, что оказалось возможным определить и поперечные размеры.

Вернемся опять к тому любопытному обстоятельству, что для получения хороших отражений рентгеновых лучей вещество должно быть придавлено к стеклянной пластинке.

Возможно, что в обыкновенном состоянии в веществе образуются комочки и что в каждом комочке молекулы перпендикулярны к его поверхности. Как я уже сказал, они сцепляются друг с другом боковыми сторонами гораздо сильнее, чем отдельные комочки — между собой. Взаимное сцепление комочков обусловлено более слабыми связями на концах молекул. Здесь налицо то самое явление, которое мы нашли в графите, где слои (по существу совершенно апологичные нашим комочкам) — каждый в отдельности — обладали большой прочностью, но скользили друг вдоль друга. В этом и заключается то обстоя-

тельство, благодаря которому сало, жиры, а также и графит хорошо смазывают.

В том случае, когда вещество подвергается действию давления, комочки (или слои) сплющиваются, становятся плоскими; с ними происходит то же, что с поверхностью графита после шлифовки; при этом получаются хорошие отражения рентгеновых лучей, потому что отражающие слои (отдельные комочки) расположились теперь правильным образом. Когда вещество расплавлено и потом охлаждается, то при этом происходит разрушение комочков; хотя после они и восстанавливаются, но расположение их является случайным и неправильным, вследствие чего создаются неблагоприятные условия для отражения рентгеновых лучей.

Существует другая любопытная особенность длинных цепочкообразных молекул, также заслуживающая нашего внимания. А именно — в случае жирных кислот (стр. 199—200) рентгеновы лучи показывают, что толщина отдельного слоя равна двум молекулам, поставленным одна на другую. Этого, действительно, следует ожидать, потому что, как известно, карбоксильная группа стремится соединиться с точно такой же группой, вследствие чего цепочки соединяются попарно, образуя цепочку двойной длины; обе карбоксильные группы находятся в центре. Этот результат был получен из измерений с помощью рентгеновых лучей. Здесь, как и раньше, рентгеновы лучи подтверждают результаты химических исследований и проливают на них новый свет.

Существует другой тип кристаллической структуры, совершенно отличный от того, который рассматривался нами до сих пор; значение его настолько велико, что мы не можем пройти мимо. Кристаллы обыкновенной каменной соли представляют собой хороший пример структуры нового типа.

Выше мы видели, что в некоторых случаях при образовании молекулы из двух атомов один из них, нуждаясь в добавочном электроны, приобретает его за счет другого атома, к которому этот электрон был привязан не очень сильно. Так, например, хлор имеет семнадцать электронов: два в самой внутренней оболочке и восемь в следующей. В наружной оболочке находятся семь электронов; хлор стремится заполнить наружную оболочку, которая должна для этого содержать восемь электронов, после чего атом приобретает внешнее сходство с аргоном. Атом натрия

при нормальных условиях имеет одиннадцать электронов: два — в самой внутренней оболочке и восемь — в следующей, в наружной же оболочке вместо семи электронов, как у хлора, присутствует только один. Связь с этим единственным электроном у натрия не очень сильна, вследствие чего он отдает его хлору, после чего натрий приобретает внешнее сходство с атомом неона (стр. 50).

Оба атома несут теперь электрический заряд: хлор — отрицательный, потому что он приобрел один лишний

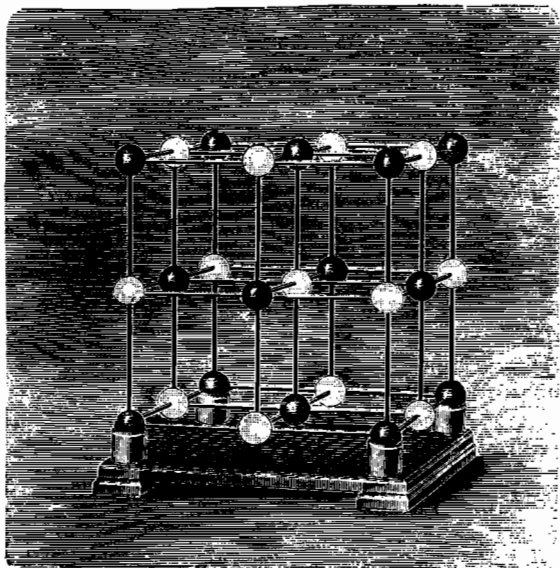


Рис. 89. Модель, изображающая расположение атомов натрия (черные шарики) и хлора (белые шарики) в кристалле каменной соли.

электрон, натрий — положительный, потому что он один электрон потерял. При образовании кристалла господствующим началом является стремление к равновесию между силами, испытываемыми отдельными атомами со стороны окружающих их соседей. Природа остановилась на таком способе расположения или «упаковки» атомов, при котором каждый атом хлора окружен шестью атомами натрия, и наоборот. Описываемая структура изображена на рис. 89: она носит весьма простой характер и представляет собой пример кубического размещения атомов,

при котором ребра куба состоят из чередующихся между собой атомов натрия и хлора. Белые шарики изображают хлор, черные — натрий или наоборот. Подобного типа структурой обусловлено то обстоятельство, что соль выкристаллизовывается из раствора в виде кубиков. Кристаллы не всегда представляют собой кубы, по большей части они встречаются в виде прямоугольных брусков с одинаковыми гранями. Обычно наблюдаемые различия и отклонения обусловлены исключительно случайными влияниями во время процесса кристаллизации.

По описанному здесь принципу построены весьма многие кристаллы: в частности, все соли металлов, в которых металлический атом потерял один или несколько электронов, захваченных остатком молекулы, образующим особую группу. Структуры солеобразных соединений не всегда имеют столь простой характер, как в случае обыкновенной соли, хотя бы потому, что указанная группа может и не иметь столь простой формы, как атом хлора. В кальците металлический атом кальция отдает два электрона группе CO_3 , и в результате получается ромбоэдрическая структура исландского шпата. Здесь также каждый металлический ион окружен шестью отрицательно заряженными тельцами, а каждое из последних, в свою очередь, окружено шестью металлическими ионами; кристалл не является прямоугольным вследствие того, что CO_3 не обладает сферической симметрией.

ЛЕКЦИЯ ШЕСТАЯ

О ПРИРОДЕ КРИСТАЛЛОВ: МЕТАЛЛЫ

Кристаллическая структура металлов. Растяжение и разрыв металлических образцов. Свободные электроны и электропроводность металлов. Теплопроводность. Сплавы и их свойства. Твердость стали.

Употребление металлов явилось одним из величайших факторов в развитии человечества. Начало применения металлов уходит в далекое прошлое, и мы можем только высказывать гипотезы о том, каким образом человек впервые изготовил металлические орудия и оружие.

Весьма возможно, что медь была найдена в чистом виде, и ее тяжелый вес должен был натолкнуть на мысль о возможности ее применения в качестве оружия. Медь слишком мягка для того, чтобы из нее можно было изготовить лезвие, и по всей вероятности, вскоре же было сделано открытие, что сплав меди с оловом гораздо тверже и более пригоден для этой цели, чем чистая медь. Возможно, что олово находилось в тех камнях, из которых была построена печь для выплавки меди, или, быть может, медь и олово очутились вместе в одной руде. Тогда начался бронзовый век. Железо явилось, конечно, позже.

На всем протяжении человеческой истории существовали и существуют до настоящего времени люди, занимающиеся обработкой металлов. В течение целых тысячелетий было накоплено большое количество опыта, часть его попала в книги, часть же в виде преданий передается от квалифицированного рабочего ученику.

Существует целый ряд навыков, особое инстинктивное знание свойств или состояния металла, которые не могут быть выражены словами и только на примере могут быть показаны другим.

Свойства металлов должны зависеть, во-первых, от свойств отдельных атомов, а во-вторых, — от взаимного положения и размещения атомов, выражающегося в определенной кристаллической структуре. За последние годы

десятилетия металлопромышленности пришли к убеждению, что научный исследователь, вооруженный микроскопом, может привести в некоторую систему всю массу разрозненных и разбросанных знаний, улучшить качество продукта и внести уверенность и определенность в процесс производства. Но, как я уже сказал, применению микроскопа положен некоторый естественный предел: микроскоп бесполезен для решения вопроса о взаимодействиях атомов, обуславливающих те или иные специфические свойства металлов. Он может обнаружить существование в металле отдельных кристаллов, но не в состоянии показать размещение атомов в кристаллах (рис. 90 и 91).

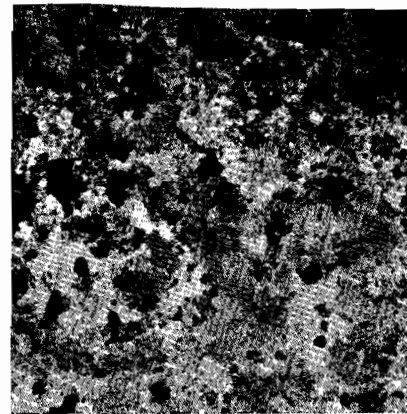


Рис. 90. Фотография особо обработанной поверхности алюминия (почти в натуральную величину).



Рис. 91. Часть рис. 90, значительно увеличенная.

успехи. Ведь должен быть изучен и объяснен опыт целых тысячелетий.

Рентгеновы лучи принесли с собою новые надежды, новые чаяния, которые не остались только надеждами. Мы можем быть уверены, что возможность благодаря им проникать в самую «интимную» сущность явлений прольет целые потоки света на смысл и значение всех сложных свойств и особенностей металлов. Пройдет, быть может, еще много времени, прежде чем будут достигнуты ощутимые и важные

Совершенно иначе обстоит дело в таких областях, как электротехника или беспроводная телефония, являющаяся отраслью электротехники. Здесь весь успех коренится в работах физических лабораторий, и развитие основывается на точном знании. Металлурги в течение веков бродили ощупью, имея для руководства весьма малое количество знаний. Процесс развития металлургии происходил

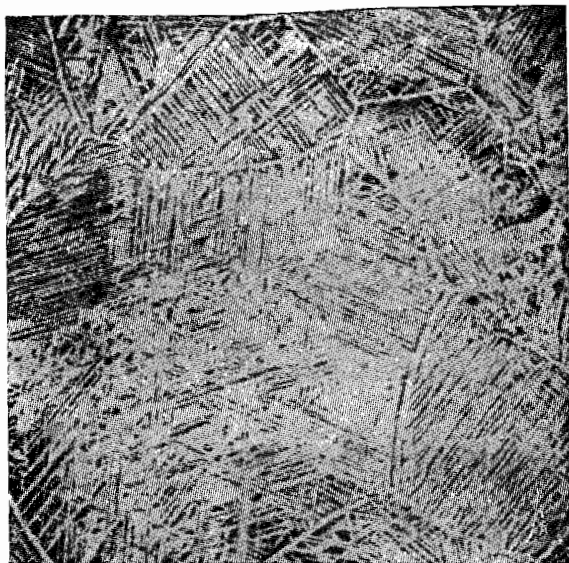


Рис. 92. Кристаллические зерна неправильных очертаний в стали.

весьма медленно, тем не менее ее достижения внушают невольное уважение. Они нуждаются в тщательном изучении в новом свете, который принесли с собой рентгеновы лучи.

Мы начинаем уже находить объяснения некоторых свойств металлов, которые зависят от кристаллической структуры. Иногда кристаллы заметны для невооруженного взгляда; иногда их можно увидеть, подготовив особым образом поверхность металла и поместив ее под микроскоп. Но самый простой и совершенный способ обнаружения кристаллической структуры заключается в применении рентгеновых лучей, проникающих далеко за

пределы, доступные самым усовершенствованным микроскопам.

С помощью рентгеновых лучей было произведено определение структуры почти всех металлических кристаллов; оказалось, что большинство структур принадлежит к весьма простым типам. Так, например, атомы золота, серебра, меди и алюминия размещены таким же образом, как складывались артиллерийские ядра около ста лет назад. Это расположение заслуживает внимания; ниже мы увидим, что существует некоторая аналогия между этим расположением и структурами льда и алмаза.

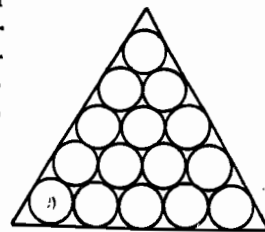


Рис. 93. Наиболее тесная упаковка шаров в одном слое.

Предположим, что мы сложили вместе некоторое число шаров, как показано на рис. 93, и образовавшийся треугольник обнесли небольшим заборчиком совершенно так же, как складывается пирамидка при игре на бильярде. На этот слой наложим другой, также образующий треугольник, но меньших размеров; на него — другие слои и так до тех пор, пока не образуется треугольная пирамида (рис. 94). Очевидно, что невозможно более тесно сложить вместе круглые шары. Если мы взглянем в это расположение, то мы увидим, что каждый шар в каком-либо слое приходится над шаром в ближайшем слое, отделенном от рассматриваемого двумя слоями. При отсутствии модели для уяснения себе сути дела лучше всего воспользоваться

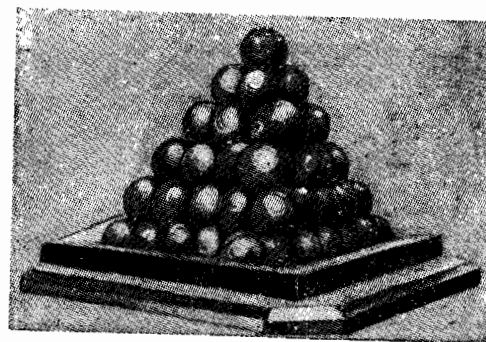


Рис. 94. Пирамида, построенная наложением друг на друга слоев, изображенных на рис. 93.

рис. 95. Крестики изображают центры шаров в некотором слое, кружки — центры шаров в следующем слое, наконец, черный кружок — в третьем. Центры шаров в четвертом слое придутся над крестиками, в пятом — над кружками, в шестом — над черными кружками и т. д.

Когда шары размещены указанным образом, то из этого расположения можно вырезать куб, как показано на рис. 96. Последнее обстоятельство сначала всегда вызывает удивление, но дело в том, что многие кристаллы состоят из атомов, нагроможденных друг на друга именно таким способом; часто эти кристаллы вырастают в виде кубов или тем или иным путем обнаруживают свою связь с кубической формой.

Предположим, что, положив первые два слоя, мы, приступая к третьему, поместим его таким образом, чтобы каждый его шар в точности оказался над соответствующим шаром в первом слое; подобное расположение является другим возможным размещением шаров при условии их наиболее тесной упаковки.

В последнем случае два слоя, в которых шары находятся друг над другом, разделяются только одним промежуточным слоем; рис. 95, А должен быть, заменен рис. 95, В, а распо-

ложение рис. 95 — размещением изображенным на рис. 96.

Если мы соединим шары, то все сооружение не будет рассыпаться и при отсутствии ограждающих его стенок. Смотри на модель сверху вниз, мы заметим проходящие через нее насквозь шестигранные каналы, которых мы не увидим, рассматривая модель в каком-либо другом направлении. Она имеет только одну вертикальную ось; расположение отдельных атомов вокруг этой оси таково, что образованный из них кристалл, естественно, имеет форму шестигранных столбиков

В случае куба можно представить себе четыре различных способа для размещения

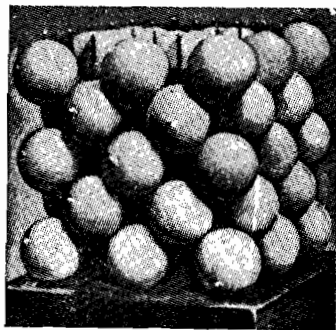


Рис. 96. Кубическая упаковка. Этот куб можно вырезать из пирамиды рис. 94.

слоев; могут существовать слои, перпендикулярные каждой из диагоналей куба и, следовательно, четырем диагоналям куба будут соответствовать четыре ряда слоев. Это не значит, что атомы в одном из слоев каким-либо особенным образом связаны друг с другом; суть дела заключается в том, что все атомы, образующие кристалл, можно разбить на подобные слои четырьмя различными способами.

Оказывается, что эти слои имеют огромное значение для объяснения свойств металлических кристаллов, построенных по типу наиболее тесной кубической упаковки шаров. Золото, серебро, медь, алюминий и другие похожие на них металлы могут быть вытягиваемы в виде проволоки, могут подвергаться прокатке, наконец, ковкой или штамповкой им можно придавать любую форму. Они, как принято говорить, ковкие; последнее свойство делает их весьма полезными. Их можно как угодно сгибать. Наконец, эти металлы можно заставить течь подобно патоке. Золото можно сплющить в столь тонкие листочки, что металла, содержащегося в золотой монете, хватает для того, чтобы покрыть большую площадь; другие металлы можно сгибать почти с такой же легкостью, как олово. Пользуясь этими важными свойствами, можно изготовлять всевозможные кубки и сосуды, цепи и украшения и огромное множество других полезных предметов.

Первое, чего мы ждем от рентгеновых лучей — обнаружения в структуре этих металлов таких особенностей, которые бы полностью объяснили это весьма ценное свойство. Мы желали бы также выяснить смысл закалки или других изменений, вызываемых так называемой холодной обработкой, т. е. проковкой, или вытягиванием металла в холодном состоянии. Далее, мы хотим знать, что такое отпуск, смягчение и уничтожение внутренних напряжений, которые получаются при медленном охлаждении после нагрева. Почему все эти явления так резко проявляются

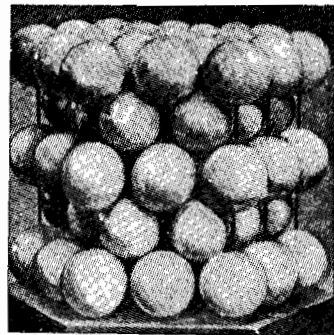


Рис. 97. Гексагональная упаковка. Слои, как на рис. 94, лежат в горизонтальной плоскости, тогда как на рис. 96 они перпендикулярны диагонали куба.

в металлах, почему они не появляются, например, в алмазе, в каменной соли или в кварце?

Перед нами уже начинает намечаться путь, ведущий к решению этих трудных вопросов. В частности, мы уже нашли некоторое объяснение того, каким образом металл поддается давлению или какому-либо другому усилию; далее, мы узнали, какое к этому имеют отношение те слои, о которых я раньше говорил.

Металл очень редко представляет собой один целый кристалл: вообще говоря, он является совокупностью кристаллов, ориентированных по всем направлениям. Иногда легко обнаружить эти отдельные кристаллы; иногда для этой цели требуется прибегнуть к помощи микроскопа. Очень часто они бывают слишком малы даже для микроскопа, и тогда их могут обнаружить только одни рентгеновы лучи.

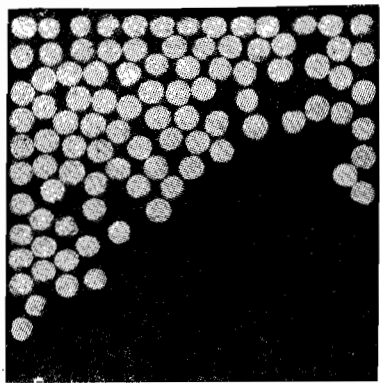


Рис. 98. «Наиболее тесная упаковка» дробинки внутри отдельных групп. Между группами неправильные промежутки.

Если мы положим некоторое количество дробинки на поднос и, встряхнув слегка поднос, заставим их расположиться в один слой (рис. 98), мы увидим, что дробинки стремятся разместиться подобно шарикам на рис. 92. Весьма мала вероятность такого случая, когда дробинки

образуют одно вполне определенное размещение: вероятнее всего, что они разобьются на отдельные группы, внутри которых дробинки будут расположены в полном порядке, но при этом между соседними группами не будет вполне определенного разграничения. Точно таким же образом располагаются атомы в металле; другими словами, кристаллизация начинается одновременно во многих центрах, вследствие чего образуется множество групп различных размеров. Мы сразу замечаем, что связь между отдельными группами отнюдь не слабее связи между атомами внутри какой-либо группы. Трудно сказать, почему это так. Нас это не должно удивлять, потому что силы сцепления между атомами имеют весьма сложный характер и не настолько полно изучены, чтобы возможно было пред-

сказывать ход явлений в том или ином случае. Так, например, когда золото нагрето до высокой температуры, то излом в куске металла проходит через отдельные кристаллы, в холодном же металле — излом не задевает отдельных кристаллов; последний пример иллюстрирует сложность рассматриваемых явлений.

Поэтому следует ожидать, что кусок металла должен состоять из большого количества кристаллов, как больших, так и малых; рентгеновы лучи показывают, что дело обстоит именно таким образом даже в том случае, когда микроскоп не обнаруживает кристаллов, так как последние слишком малы.

Если мы теперь возьмем отдельный кристалл и попытаемся его изогнуть или искривить, то увидим в нем сдвиг,

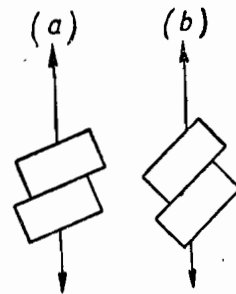


Рис. 99. Сдвиг при растяжении двух стеклянных брусков, склеенных жиром.

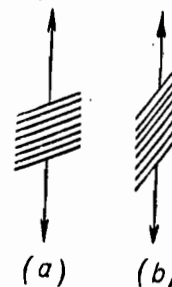


Рис. 100. Схематическое изображение скольжения слоев в кристалле алюминия при растяжении кристалла.

происшедший в определенной плоскости: часть кристалла, находящаяся по одну сторону этой плоскости, сдвинута относительно части кристалла, находящейся по другую сторону.

Как раз об этих, имевших, плоскостях мы говорили раньше когда рассматривали размещение атомов, изображенное на рис. 92. Направление сдвига в одиночном металлическом кристалле отнюдь не совпадает с направлением, в котором действует приложенная к нему сила. Предположим, что мы имеем два стеклянных бруска, сложенных вместе и склеенных жиром, как показано на рис. 99; приложив к ним усилие, мы увидим, что они сдвинутся друг относительно друга по плоскости, их разделяющей.

Вполне естественно, что под действием приложенной силы куски не разломаются на части, а сдвинутся друг относительно друга в этой именно плоскости. Отличие металла от описанного здесь случая сводится к тому, что в металле существует множество таких плоскостей.

Мы можем схематически изобразить кристалл рядом прямых, как на рис. 100, (а), которые под действием силы в направлении, указанном стрелками, перейдут в положение, представленное на рис. 100, (b). Часто в тех случаях, когда напряжению подвергается одиночный кристалл, на его поверхности можно видеть следы направлений, в которых происходили сдвиги.

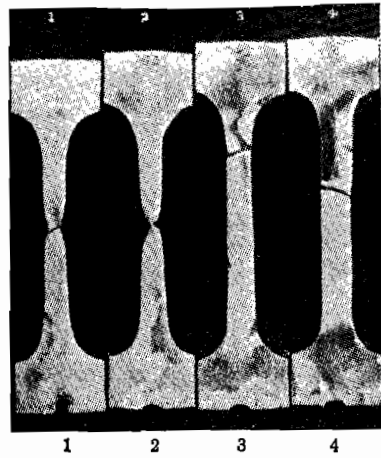


Рис. 101. Изменение поперечного сечения образца при растяжении. В 1 и 2 плоскости сдвига расположены, как на рис. 102. В 3 и 4 — наоборот: ширина осталась неизменной, а образец стал тоньше.

Образцы, выбранные для опыта, имели форму, обычно применяемую при испытаниях прочности технических материалов; образцы изображены на рис. 101. Длина их достигла 20 см. Широкие концы (головки образца) захватывались специальными приспособлениями, вставляемыми в машину, которая растягивала образцы; разрыв происходил в узкой части. По растяжению образца и величине вызвавшей его силы можно было судить о сопротивлении металла разрыву.

Профессор Карпентер и мисс Элам недавно показали на больших кристаллах алюминия несколько прекрасных примеров этого явления. Кусок обыкновенного металла состоит из множества кристаллов, ориентированных самым различным образом. С помощью довольно сложного процесса термической и механической обработки можно заставить несколько маленьких кристалликов «встать в шеренгу» и образовать некоторое количество больших кристаллов подобно тому, как если бы мы нашли способ встряхиванием и постукиванием по подносу с дробью из отдельных правильных скоплений дроби получить одно большое.

После испытания образец приобретает любопытный вид, который различен для разных образцов. Иногда ширина образца (имеющего прямоугольное сечение) остается без изменения, но по мере удлинения он становится тоньше, вытягиваясь в ленту той же ширины, что и первоначальный образец. Прежде чем образец разорвется, это удлинение может достигнуть нескольких сантиметров. Иногда не изменяется толщина образца и последний оседает в сторону; при этом образуется шейка, которая и является тем местом, где впоследствии происходит разрыв. В других случаях происходят еще более любопытные изменения. Все образцы были исследованы с помощью рентгеновых лучей; при этом оказалось, что природа деформации всецело зависит от того, каким образом большие кристаллы ориентированы относительно направления, в котором действует приложенная сила. Металл разрывается по плоскости сдвига. Если, например, кристалл ориентирован таким образом, что слои, о которых мы раньше говорили, расположены, так как показано на рис. 100 (при этом мы ничего не говорим о том, как, лежал кристалл во время его термической и механической обработки), то при растяжении этот кристалл вытянется в боковом направлении.

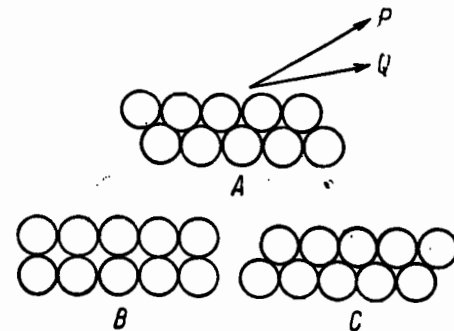


Рис. 102. Когда сила направлена вдоль P , то верхний слой легче сдвинуть в положение B и затем в C , чем когда сила направлена вдоль Q .

В некоторых случаях вопрос о направлении, в котором должен разрываться кристалл, допускает несколько решений. Если скольжение может иметь место не вдоль определенного ряда плоскостей, а существует несколько направлений для сдвига, то кристалл выбирает то направление, которое меньше всего отклоняется от перпендикуляра к направлению действия силы.

Мы можем искать объяснение в том, что скольжение является не чем иным, как сдвигом одного слоя атомов относительно другого; всякая сила, стремящаяся оторвать один слой от другого, очевидно, будет способствовать этому движению. Если мы имеем твердое тело, состоящее

из ряда шаров, расположенных в два слоя, как показано на рис. 102, то легче оттянуть верхний слой от нижнего в том случае, когда сила направлена вдоль P , чем когда она направлена вдоль Q . Так как (рис. 99) под действием внешней силы плоскость сдвига всегда стремится совпасть с направлением этой силы, то вследствие этого сдвиг в кристалле происходит вдоль одного ряда плоскостей до тех пор, пока направление этого ряда не сблизится с направлением силы, после чего сдвиг начнет

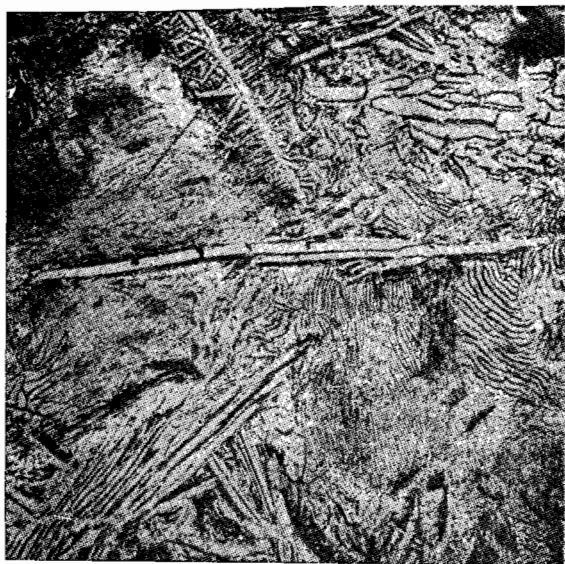


Рис. 103. Длинные игольчатые образования — цементит, являющийся составной частью стали.

происходить вдоль других плоскостей. В результате направление, в котором действует сила, рассекает пополам угол между двумя рядами плоскостей. При этом место разрыва принимает своеобразные очертания; так, например, на рис. 101 3 концы краев образца в месте разрыва похожи на лезвие ножа. Две стороны его параллельны двум различным рядам плоскостей скольжения и образуют равные углы с направлением, в котором действовала разрывающая образец сила.

В случае алюминия сопротивление металла столь мало, что кусок, состоящий из одного кристалла, легко может быть согнут силой одних только пальцев. Наоборот, обыкновенный кусок алюминия отличается значительной прочностью. Поэтому объяснение в различии их поведения заключается в том, что когда кристаллы ориентированы в различных направлениях, то среди них имеются такие, которые и несут всю нагрузку, создаваемую действием внешней силы. Прочность цепи определяется сопротивлением ее слабейшего звена; самой слабой частью кристалла являются его плоскости скольжения. Указанное обстоятельство приобретает огромное значение при производстве и обработке металлов, хотя оно большей частью до такой степени связано с другими явлениями, что его влияние бывает очень трудно отделить от других. Качество стали, пригодность ее для тех или иных специальных целей определяется весьма большим числом различных факторов, но одним из них, несомненно, является величина кристалликов, из которых состоит металл. Мелкозернистость и однородность кристалликов одинаково повышают свойства стали.

Когда одиночный кристалл алюминия разрывается вдоль какого-то слоя, то мы можем предположить, что существует определенный момент, в который один слой атомов смещается относительно другого: из расположения A через промежуточное расположение B получается C (рис. 102). В расположении C опять осуществляется наиболее тесная упаковка атомов. Металл не утрачивает своей кристаллической структуры. Мы уже знаем, что правильная кристаллическая структура является как бы врожденным свойством вещества. Легко поэтому понять, что последнее без особого труда переходит от одного первоначального природного распределения атомов к другому, приспособляясь к внешним воздействиям. Не подлежит сомнению, что в указанном обстоятельстве заключается одна из главнейших причин ковкости металлов.

Но чем вызывается явление наклепа — упрочнения металла при холодной обработке? Что происходит с ним при отжиге? Мы до некоторой степени приближаемся к ответу на поставленные здесь вопросы, рассматривая явление, происходящее с золотом, когда из него выковывается тонкий листочек, который затем подвергается нагреванию.

Золотая фольга, как мы видели, отличается чрезвычайно малой толщиной. Она даже прозрачна для световых лучей,

причем поглощает часть цветных лучей, из которых состоит проходящий через нее пучок белого света, пропускаемая зеленоватый свет. Золотая фольга в отраженном свете имеет желтую окраску. Чрезвычайно любопытно, что при нагревании до температуры темнокрасного каления она становится прозрачной и в отраженном свете приобретает белую окраску. Фарадей был сильно заинтересован последним фактом; он думал частично объяснить его с помощью предположения, что в такой фольге свет проходит через отверстия, образовавшиеся вследствие нагревания.

Джордж Бейльби произвел много опытов и значительно расширил и дополнил наши знания о поведении и свойствах веществ, нагреваемых таким же образом. Если в нагретой фольге существуют отверстия, — говорит он, — то они настолько малы, что не могут быть обнаружены с помощью микроскопа. Рентгеновы лучи оказались полезными и в этом вопросе. При исследовании с их помощью золотой фольги оказалось, что она состоит из множества кубических кристаллов золота, грани коих параллельны поверхности листочка. Кристаллы не должны непременно являться правильными кубиками. Подобно обыкновенной соли, также обладающей кубической структурой, они представляют собой прямоугольные параллелепипеды всевозможных размеров. При нагревании листочка отдельные кристаллики нагромождаются друг на друга и, как предполагал Фарадей, образуют как бы складки, которые настолько малы, что не могут быть обнаружены при помощи микроскопа. Вследствие этого золотые и серебряные листочки при нагревании становятся прозрачными. Совершенной загадкой до настоящего времени является то обстоятельство, что золото при рассматривании его насквозь кажется зеленым.

Мы видели, что в результате обработки грани отдельных кристалликов параллельны поверхности листочка; нагревание уничтожило правильный характер этого расположения. При сдавливании нагретого золотого листочка ровной твердой поверхностью (например, агатом) в листочке создаются новые условия: как мы и должны были ожидать, происходит выравнивание отдельных кристалликов. В обоих случаях металл обладает кристаллическим строением, но в ненагретом золотом листочке господствует большая правильность расположения отдельных индивидуумов, чем в листочке, подвергнутом отпуску.

То же самое явление было обнаружено в серебре. Чтобы показать его в меди, опыт следует производить в такой обстановке, где бы воздух не имел доступа к металлу. При нагревании меди на открытом воздухе на ее поверхности быстро образуется пленка окиси меди; это явление также может быть прослежено с помощью рентгеновых лучей. Мы часто наблюдаем, как поверхность меди с течением времени медленно тускнеет даже при отсутствии нагревания. С помощью рентгеновых лучей легко показать, что в медной фольге существует точно такое же расположение мелких кристалликов, как и в золотых листочках. С другой стороны, в куске обыкновенной меди отдельные кристаллики расположены совершенно случайным образом.

Упрочнение этих металлов при холодной обработке является, таким образом, следствием того, что в них возникает напряжение благодаря перераспределению кристаллов; это обнаруживается рентгеновыми лучами. Отжиг уничтожает эти напряжения и разрушает распределение кристаллов. Почему это так, мы до сих пор не знаем: мы должны быть просто удовлетворены тем, что сделали новый шаг вперед.

Следует отметить, что при таком переходе металла в состояние напряжения он более подвержен действию химических реактивов, чем можно было бы думать. Он не так хорошо переходит в то состояние, которое можно было бы назвать устойчивым.

Мы должны теперь перейти к рассмотрению других свойств металлов, которые, как можно ожидать, вызваны более или менее общими причинами. Два из наиболее замечательных свойств металлов заключаются в их способности проводить тепло и электричество. Все мы знаем, как быстро теплота распространяется по металлам: можно было бы даже считать, что это свойство является отличительным признаком металла. Мы также все знаем, что металлы, в особенности медь, употребляются в качестве проводников электрического тока.

Возвращаясь к нашим первым рассуждениям о природе атомов и различиях между разными атомами, мы сразу можем найти одно свойство металлов, которое в общих чертах может дать удовлетворительное объяснение их проводящим способностям: нет сомнения также, что это свойство имеет большую связь с их кристаллической структурой и с их поверхностью.

Атомы металлов всегда имеют один или два электрона, связанных очень слабо. Например, в атоме натрия одиннадцать электронов; два из них расположены очень близко к ядру, восемь других образуют очень прочную систему, окружающую первые два. Последний электрон принадлежит к наружной системе, которая постепенно заполняется, если от натрия перейдем к магнию, имеющему два внешних электрона, далее, к алюминию с тремя электронами и т. д. Этот последний электрон не очень крепко удерживается атомом. Если он по той или иной причине оторвется, то атом с внешней стороны оказывается похожим на несоединяющийся (инертный) атом неона, если только не считать того, что он в целом несет положительный заряд благодаря нарушению баланса вследствие потери одного электрона. Кристалл алюминия представляет собрание сфер, как у неона, причем все они крепко и тесно связаны; лишние же электроны более или менее свободно могут передвигаться по всему кристаллу. Следует, впрочем, отметить, что вся эта картина очень груба, и в действительности рассматриваемое явление зависит от еще многих факторов, о которых мы ничего не знаем. Но до известной степени наша картина правильна.

Мы сразу видим, почему металлы являются проводниками электричества: это потому, что электроны—элементарные заряды отрицательного электричества—могут передвигаться с такой легкостью. При прохождении тока по металлической проволоке электроны движутся по ней потоком.

Следует отметить то обстоятельство, что благодаря отрицательному заряду электронов они движутся в направлении, как раз противоположном тому, в котором мы представляем себе идущим электрический ток. Представление о направлении электрического тока было до сих пор только вопросом терминологии. То, что при этом на самом деле что-то движется, представляет совсем новое открытие, и потому нам не следует удивляться, что истинное направление движения противоположно тому, которое подразумевалось раньше.

Мы не должны, таким образом, представлять себе батарею или динамомашину, как место, где производится электричество; они только гонят по замкнутому контуру поток электронов, которые уже раньше там находились и которые более или менее способны двигаться. Совершенно так же машина на фабрике заставляет кожаный ремень непрерывно двигаться по некоторому замкнутому

пути, но машина вовсе не фабрикует кожу этого ремня. При нагревании металла содержащиеся в нем электроны двигаются во все стороны более быстро и могут даже вырваться наружу. Электроны вылетают непрерывным потоком из накаленной нити в катодной лампе, употребляемой в беспроволочной телефонии; их вылет обуславливает действие лампы.

В горячем металле электроны движутся не так легко, как в холодном. Нетрудно понять, почему это происходит. Ясно, что электронам труднее пролагать себе путь среди атомов металла, которые благодаря нагреванию движутся взад и вперед и таким образом попадают на дорогу электронам. Гораздо труднее объяснить странный факт, открытый в Лейдене Каммерлинг-Оннесом и состоящий в том, что некоторые вещества при понижении их температуры до некоторой очень низкой точки (различной для различных металлов) вовсе не оказывают сопротивления движению электронов; ток, однажды возникший, протекает по металлу в течение многих дней, прежде чем не исчезнет; металл должен, конечно, все время быть при этой очень низкой температуре.

До известной степени электроны принимают участие в способности металлов проводить тепло так же, как электричество, так как электроны из теплого конца металлического стержня должны отдавать часть своей избыточной энергии электронам холодного конца.

Таким образом присутствие в металле электронов, способных свободно двигаться между атомами, является достаточной причиной того, что металл хорошо проводит и теплоту и электричество. Напомним опять, что мы набросали лишь грубую картину; много деталей еще нужно установить и, без сомнения, многие важные факты остались без рассмотрения благодаря недостаточности наших знаний.

Возвратимся к вопросу о ковкости металлов и посмотрим, не поможет ли наличие электронов объяснить ее. Мы рассматриваем наши атомы как сферы, заряженные положительно и расположенные очень тесно по отношению друг к другу; и мы были бы правы, рассматривая внешние электроны, как цемент, удерживающий их вместе. Но наиболее важно то, что атомы в металле не связаны вместе свободными электронами, как в алмазе: будучи заряжены положительным электричеством, они скорее отталкиваются друг от друга. Они катаются или скользят друг по другу, так как они не связаны между собой в

определенных точках, как это часто имеет место в других кристаллах. Рассуждения подобного рода оказываются полезными при рассмотрении относительного скольжения плоскостей в металле.

До сих пор мы рассматривали кристаллическую структуру и свойства некоторых металлов в чистом виде. На практике сплавы применяются гораздо чаще чистых металлов; и это потому, что сплавы обладают своими особыми свойствами, имеющими большое практическое значение. По громадному разнообразию своих свойств и по широкой области их применения сплавы представляют исключительный интерес. Новые виды их постоянно открываются. Вне зависимости от того, какие особые свойства могут понадобиться для какой-нибудь специальной цели, всегда можно подобрать сплав, удовлетворяющий поставленным требованиям более или менее полно. Мы должны попытаться объяснить, если возможно, эти свойства теми фактами, которые мы только что обнаружили. Конечно, мы знаем еще так мало, а объяснить нужно так много, что в течение ближайших лет вряд ли много выйдет из наших попыток, но начать эту работу нужно.

Часто случается, что прибавление к металлу совсем малого количества другого металла (или даже не металла) вызывает значительное увеличение его твердости. Чистые металлы обычно очень мягки, так как их плоскости легко скользят. Первым из всех известных сплавов была бронза, смесь меди и олова, которая оказывается гораздо тверже каждого из этих металлов в отдельности. Смесь меди с цинком дает обычную латунь; свойства ее сильно меняются в зависимости от отношения, в котором произведена смесь. Сталь образуется при прибавлении ничтожного процента углерода к чистому железу. Существуют сплавы меди и алюминия; они очень упруги и не ржавеют, но трудно обрабатываются на токарном станке. Есть нержавеющий и легко формуемый сплав меди с никелем; он употребляется для оболочек пуль. Германское серебро представляет белый, нержавеющий ковкий сплав, употребляющийся при изготовлении вилок, ложек и т. п., эти предметы затем покрываются серебром путем электролиза. Сплав никеля с хромом выдерживает очень высокие температуры, и проволока из него употребляется при намотке электрических печей. Определенная смесь хрома, кобальта и вольфрама представляет сплав стеллит — вещество исключительно твердое и нержавеющее; некоторые из эталонных

разновесов сделаны из этого материала. Существуют сплавы для литья колоколов, очень мягкие сплавы для типографского шрифта, много сортов припоев. Алюминиевая бронза, употребляемая при изготовлении дешевых украшений, состоит из алюминия в небольшом процентом меди. Можно было бы составить длинный список сплавов, если бы в этом была необходимость.

Рассмотрим наиболее простой случай: например, когда прибавление к меди небольшого количества алюминия вызывает увеличение твердости. Лучи Рентгена показывают, что структура кристаллов меди при этом остается прежней, если не считать того, что кое-где атомы меди заменены атомами алюминия. Непрочность кристаллов, как мы видели, объясняется тем, что одна часть скользит по другой вдоль определенных плоскостей. Такая плоскость называется теперь неровной: по ней рассеяны атомы алюминия, которые, как мы можем предположить, затрудняют скольжение слоев, а в этом и заключается причина большей твердости. Существует замечательное явление, заставляющее думать, что наше предположение правильно. Атомы алюминия должны вызвать в кристалле меди натяжения, так как медь не может принять в себя более известного числа атомов алюминия. Если приготовить сплав, содержащий более 10% алюминия, то рентгеновы лучи показывают нам, что кристаллы меди совершенно разрушены и образовалась совершенно новая структура.

Атомы алюминия разрушают кристаллы меди, и это находится в согласии с тем, что они вызывают увеличение твердости меди. С другой стороны, при прибавлении к меди никеля атомы последнего могут заменять атомы меди в любом количестве: очевидно, они становятся на места атомов меди, не вызывая натяжений в кристаллах меди. В этом случае увеличения твердости не получается, как этого и следовало ожидать. Оно возникает только тогда, когда мы помещаем в кристалл меди атомы, вызывающие натяжения и делающие плоскости скольжения неровными.

В случае стали мы имеем аналогичное явление, но здесь атомы углерода, являющиеся причиной большей твердости, не замещают атомов железа, но втискиваются в пустые места между ними. Легко видеть, что это искажает структуру кристалла железа и, как и в других случаях, затрудняет движение вдоль плоскостей скольжения. И в этом случае есть предел для количества сплавляемого вещества:

не изменяя совершенно обычной простой структуры железа, можно ввести в него лишь небольшой процент углерода.

Вопрос о железе и стали, однако, включает еще ряд затруднений. Зададим себе вопрос: что происходит, если прибавить к железу больше углерода, чем может выдерживать его структура? Здесь возникает совершенно новая задача. При этом получаются новые кристаллы, состоящие из молекул, в каждую из которых входит три атома железа и один атом углерода; это так называемый цементит. Новые кристаллы очень тверды и по форме напоминают

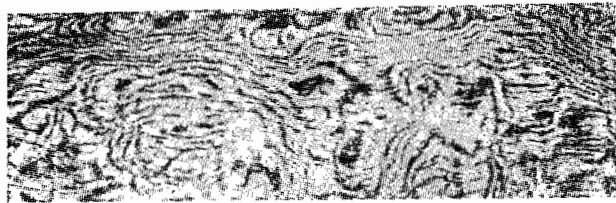
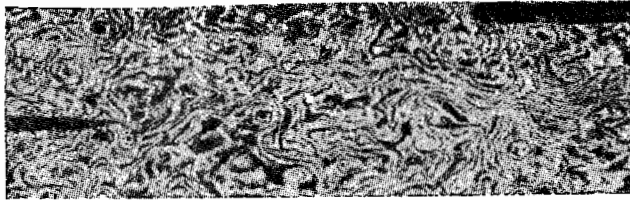


Рис. 104. Дамасская сталь.

иглы (рис. 103). Присутствие их делает железо чрезвычайно твердым и трудно обрабатываемым. Прекрасный пример этого действия представляют старые клинки, которые некогда проникли в Европу из Индии через Дамаск. Дамасская сталь очень ценилась благодаря своим прекрасным качествам. В некоторых коллекциях можно найти прекрасные экземпляры этой стали; на них заметен характерный волнообразный узор (рис. 104), который всегда считается признаком подлинности.

Под микроскопом линии этого узора оказываются состоящими из множества точек, образующих своего рода млечный путь на стали. Эти точки представляют мелкие кристаллы цементита. Как говорит русский металлург Беляев, обработка стали была сначала весьма затруднительна. Если кузнец в своем небольшом горне нагревал ее до крас-

на, то уже после немногих ударов по такой стали временное смягчение ее исчезало. Твердость, причиной которой являются кристаллы цементита, исчезала на мгновение. Более длительное нагревание и ковка делали сталь постепенно менее твердой. Кристаллы цементита изменяли свою форму. Они делались менее похожими на иглы, собирались вместе в круглые скопления и при этом сталь делалась более мягкой (рис. 105). Наконец, получалась дамасская сталь, оказавшаяся столь твердой и упругой.

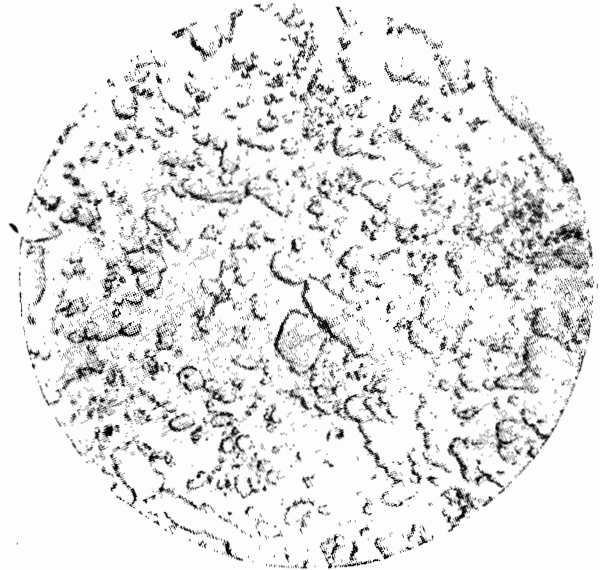


Рис. 105. Измельчение и закругление игл цементита.

Весьма возможно, что острота лезвий таких сабель объясняется присутствием очень твердых частиц, вкрапленных в более мягкое железо. Лезвие оказывается похожим на пилу с очень тонкими зубьями.

Во время состязания в ловкости между Саладином и королем Ричардом, которое Вальтер Скотт описывает в романе «Талисман», Саладин подбросил в воздух тонкое покрывало и рассек его своей саблей — прекрасное доказательство остроты клинка и ловкости. Ричард же разрубил своим мечом на две части железное копьё одного из своих рыцарей. Это тоже требовало высоких качеств стали; от человека же здесь требовалась страшная сила удара.

Правка, точка и полировка являются весьма интересными

операциями. Прикладывая нож к точильному камню, мы даем твердым кристаллам камня возможность прорезать мельчайшие царапины на стали и удалять часть материала. Это одна стадия процесса точки. Полировка же на камне с маслом или на ремне совершенно иная вещь. Мы при этом заставляем сталь стекать вдоль по царапинам; иной раз, как показал Джордж Бейльби, при этом возникает кожа из металла поверх более глубоких впадин. Во время этих операций металл, повидимому, остается все

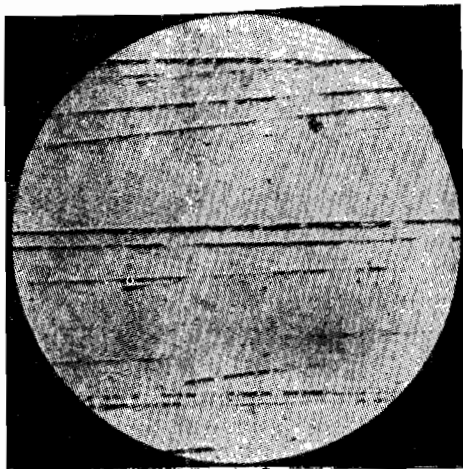


Рис. 106. Кусок зеркально отполированного наждаком и крокусом металла под микроскопом. Видны еще царапины от наждака.

время кристаллическим: рентгеновы лучи показывают присутствие кристаллов в лезвии бритвы. Описанные здесь процессы, повидимому, оказывают такое же действие, какое имело место в золотых листах при нагревании их. Употребляемое при этом масло смягчает процесс: металл приходит в состояние натяжения; с течением времени натяжение стремится исчезнуть, и нагревание может затупить лезвие (рис. 106 — 110).

Сплавы большей частью худшие проводники электричества, чем чистые металлы. Возможно, что при помещении посторонних атомов в кристаллическую решетку чистого металла, когда плоскости внутри кристалла перестают быть ровными, электроны гораздо сильнее задерживаются при

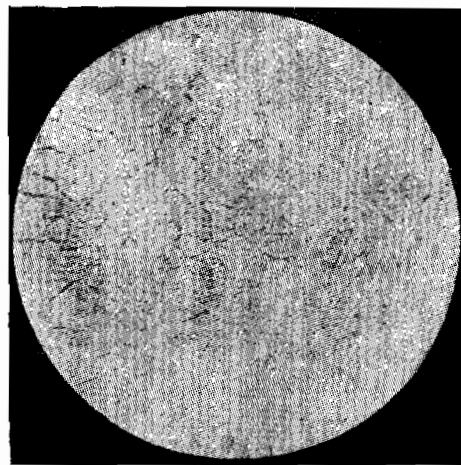


Рис. 107. На металлическом шлифе (рис. 106) тщательной полировкой уничтожены следы наждака. Начинают обрисовываться кристаллические зерна.

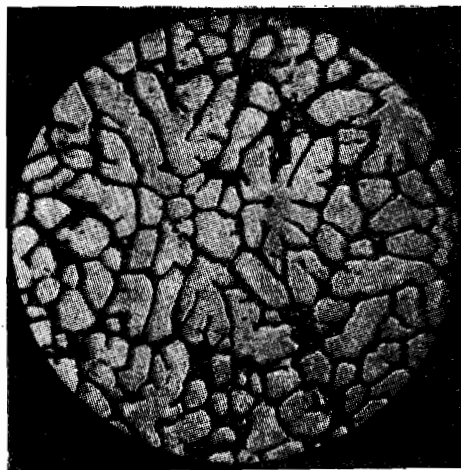


Рис. 108. Тот же шлиф, что на рис. 107, протравлен кислотой. Зерна отчетливо выступили.

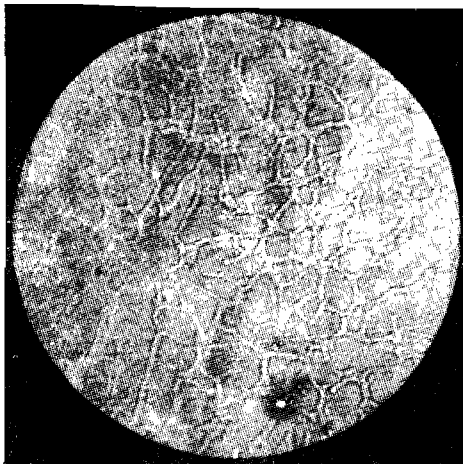


Рис. 10⁹. Тот же шлиф, что на рис. 108, вновь тщательно отполирован.



Рис. 110. Металлическое зеркало под микроскопом. Темная полоса — царапина от тончайшей стальной иглы. Тонкие вертикальные царапины — следы от полировки наждаком.

их движении сквозь металл. Нужно большее количество энергии, чтобы прогнать их вдоль металла, и сплав при этом нагревается от прохождения тока больше, чем чистый металл. Как я уже сказал, в случае чистого металла сопротивление увеличивается при повышении температуры. Можно представить себе, что электронам труднее продвигаться мимо атомов, когда движение последних более интенсивно; теплота заставляет атомы двигаться быстрее около их положений равновесия. Но в случае сплавов нагревание не вызывает таких резких изменений, как в чистом металле, потому что движение электронов и без того затруднено. Это можно показать на простом опыте.

Батарея посылает ток по замкнутому контуру, имеющему две ветви, как показано на рис. 111. Одна из ветвей содержит катушку *M* из медной проволоки и лампу L_1 ; в другую ветвь включена катушка из какого-либо сплава, например германского серебра, и лампа L_2 . Сопротивление катушки подобрано так, чтобы лампы горели тускло. Если

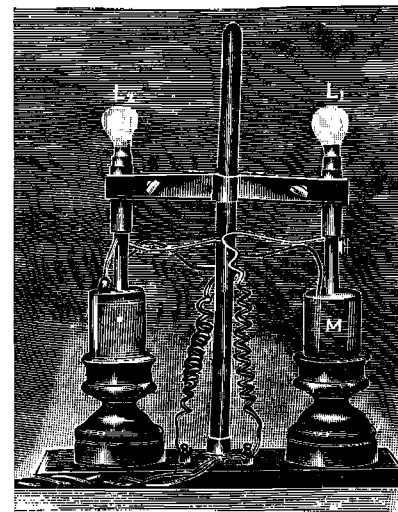


Рис. 111. Изменение сопротивления проволоки из чистого металла и из сплава при охлаждении.

погрузить катушку *M* в сосуд с жидким воздухом, лампа L_1 тотчас же вспыхивает ярко. Охлаждение медной проволоки понизило ее сопротивление прохождению электронов, и через лампу пошел более сильный ток. При погружении же в жидкий воздух катушки из сплава никаких изменений яркости света лампы L_2 не происходит.

Некоторые металлы кристаллизуются не одним только способом. Наиболее простой и замечательный пример представляет железо. При обычных температурах атомы железа расположены так, что каждый атом имеет восемь соседей. Последние расположены по вершинам куба, в центре которого лежит первый атом. Это не наиболее тесное расположение, как можно показать. Наиболее тесное распо-

ложение представляет, как я говорил, горку, сложенную из ядер; у каждого ядра в ней есть двенадцать соседей, из которых шесть касаются его по экватору, а по три вдоль круга широты со стороны каждой полусферы: иначе говоря, шесть ядер касаются первого ядра в его собственном слое и по три из двух соседних слоев. Такое расположение атомов имеет место в золоте, серебре, меди и алюминии. Весьма замечательно, что при нагревании железа до красного каления атомы изменяют свое расположение, группируются в кучи ядер. Явление легко наблюдать, если нагреть железную проволоку выше этой точки и затем

дать ей охладиться. Когда температура опустится ниже некоторой критической, атомы внезапно переходят в менее плотную группировку, и проволока немного растягивается: увеличение длины



Рис. 112. Железная проволока растягивается повешенным грузом. Стрелка показывает удлинение. Проволока нагревается электрическим током.

ее легко наблюдать при помощи какого-либо подходящего приспособления. Весьма замечательно также и то, что при этом переходе выделяется некоторое количество энергии, и проволока снова нагревается. Эти явления давно были наблюдаемы, но только совсем недавно было обнаружено, что причиной их является переход из одной кристаллической формы в другую (рис. 112).

Мы привели только немногие примеры соотношения между свойствами металлов и их кристаллической структурой. Это лишь несколько вопросов из громадной области, еще ожидающей исследования при помощи наших новых помощников — лучей Рентгена. Мы не можем сказать наперед, что именно будет обнаружено. Мы уверены, однако, что чем лучше мы будем понимать структуру материалов, тем лучше сможем ими пользоваться.